

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 3 (130)

Нижний Новгород 2020

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. №3(130).
– 156 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, Г.Я. Вагин, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев, Г.О. Котиев, В.В. Кондратьев, А.Л. Куликов, В.Н. Ланцов, М.А. Легчанов, А.Б. Лоскутов, В.С. Макаров, В.Н. Наумов, Н.А. Прибатурин, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов

В.П. Хранилов – ответственный секретарь рубрики
«Информатика и управление в технических и социальных системах»
М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Энергетические системы и комплексы»
В.С. Макаров – ответственный секретарь рубрики
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)
А.В. Крылова (выпускающий редактор)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Сергей Михайлович Дмитриев
(д.т.н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
Палкович Ласло	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
Варлаки Петер	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
Виджай Кумар Чакка	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
Ялчинер Ахмет	д., проф., METU, директор OERC, Турция

УЧРЕДИТЕЛЬ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.ru/content/trudy/>

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:*
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020

**MINISTRY OF SCIENCE EDUCATION AND OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

**TRANSACTIONS
of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV**

Published since 2010

№ 3 (130)

Nizhny Novgorod 2020

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science
in the «List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science» in specialties: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles;
05.13.01 – System analysis, management and information processing;
05.13.17 – Theoretical foundations of computer science;
05.14.02 – Electric power stations and electric power systems;
05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, G.Ya. Vagin, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev G.O. Kotiev, V.V. Kondratiev, A.L. Kulikov, M.A. Legchanov, V.N. Lantsov, A.B. Loskutov, V.S. Makarov, V.N. Naumov, N.A. Pribaturin, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrobostov

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section «Informatics and Management in Technical and Social Systems»
M.A. Legchanov – Executive Secretary of the Section «Energy Systems and Complexes»
V.S. Makarov – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

V.I. Kazakova (Executive Editor)
A.V. Krylova (Commissioning Editor)

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

S.M. Dmitriev
NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor
McMaster University (Ontario, Canada)

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor
Shiv Nadar University (India)

Yalciner Akhmet

Professor, Head of Ocean Engineering Research Center
of Middle East Technical University (Turkey)

*The certificate on registration of periodic printed editions:
ПН № ФС 77-56417*

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Гай В.Е., Шарутин К.Н., Арабаджи М.И., Кузнецов Г.Д., Баринов Р.О. Метод обнаружения пластины номера автотранспортного средства	7
Грошев А.В. Субоптимальный робастный подход к фильтрации в условиях негауссовского распределения ошибок измерений комплексных инерциально-спутниковых систем	15
Кокоулина М.В., Елифанова А.С., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е., Куркин А.А. Анализ динамики распространения коронавируса с помощью обобщенной логистической модели	28
Назаров В.Е., Колпаков А.Б. Гистерезисные эффекты амплитудно-зависимого внутреннего трения в акустическом резонаторе из кварцита	42
Рувинская Е.А., Елифанова А.С., Кокоулина М.В. Первая версия информационной системы обработки и анализа данных натурных измерений внутренних волн в океане	53
Санников А.Н., Степаненко М.А., Голованов В.И., Балашова Т.И., Капранов С.Н. Оптимизация функционирования товаропроводящей сети при проведении планово-предупредительного ремонта ее объектов	64
Шмелева А.Г., Каленюк И.В., Обыденнова С.Ю., Сяиков Д.В., Пильщиков Г.Д., Шилков С.С. Программная модель оценки кредитоспособности клиентов с применением алгоритмов искусственного интеллекта	72
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	80
Кожевников С.В., Пименов С.А. О расчетно-экспериментальной отработке программно-технических средств автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций	80
Попов С.В., Бишлетов А.В. Особенности защиты сети при параллельной работе с автономным генератором	88
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	93
Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Карташов А.Б. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин	93
Манянин С.Е., Черевастов М.Г. К вопросу об управляемости транспортного средства, снабженного шинами сверхнизкого давления	103
Михайлов В.Г. Использование имитационного моделирования для отладки беспилотных автомобилей	112
Степанов Е.В., Молев Ю.И., Огороднов С.М., Вашурин А.С. Оценка плавности хода автомобиля с гидроэластомерной подвеской	120
Тумасов А.В., Береснев П.О., Филатов В.И., Тюгин Д.Ю., Улитин А.В. Разработка системы помощи водителю при парковке для коммерческих транспортных средств	132
Умирзоков А.М., Мамбеталин К.Т., Сайдуллозода С.С., Маллабоев У.М. К оценке эффективности управления большегрузными автомобилями-самосвалами в горных условиях	141
НАШИ АВТОРЫ	149

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
Gai V.E., Sharutin K.N., Arabadzhi M.I., Kuznecov G.D., Barinov R.O. A method of detecting the number plate of a motor vehicle	7
Groshev A.V. A sub-optimal robust approach to filtration under the non-gaussian distribution of measurement errors of complex inertial-satellite systems	15
Kokoulina M.V., Epifanova A.S., Pelinovsky E.N., Kurkina O.E., Kurkin A.A. Analysis of coronavirus dynamics using the generalized logistic	28
Nazarov V.E., Kolpakov A.B. Hysteretic phenomena of amplitude-dependent internal friction in a quartzite acoustic resonator	42
Rouvinskaya E.A., Epifanova A.S., Kokoulina M.V. The first version of the information system for processing and analysis of data of internal waves' measurements in the ocean	53
Sannikov A.N., Stepanenko M.A., Golovanov V.I., Balashova T.I., Kapranov S.N. Optimization of functioning good's distribution network during scheduled preventive repairs objects	64
Shmeleva A.G., Kalenyuk I.V., Obydenнова S.Yu., Syasikov D.V., Pilshchikov G.D., Shilkov S.S. A software model for assessing customer's creditworthiness using artificial intelligence algorithms	72
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	80
Kozhevnikov S.V., Pimenov S.A. Computational and experimental processing of software and hardware	80
Popov S.V., Bishletov A.V. Network security features when working in parallel with an autonomous generator	88
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	93
Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kartashov A.B. A brief analysis of trends in the development of forestry machines	93
Manyanin S.E., Cherevastov M.G. On the issue of control of a vehicle equipped with extra low pressure tires	103
Mikhailov V.G. Use of imitating modeling for debugging self-driving cars	112
Stepanov E.V., Molev Y.I., Ogorodnov S.M., Vashyrin A.S. Evaluation of car ride comfort with hydroelastomer suspension	120
Tumasov A.V., Beresnev P.O., Filatov V.I., Tyugin D.Yu., Ulitin A.V. Development of advanced driver parking assistance system for commercial vehicles	132
Umirzokov A.M., Mambetalin K.T., Saydulozoda S.S., Mallaboev U.M. To the assessment of management heavy-duty dump trucks efficiency in mountain conditions	141
AUTHORS	149

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 528.854.4

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_3_7

В.Е. Гай¹, К.Н. Шарутин¹, М.И. Арабаджи², Г.Д. Кузнецов¹, Р.О. Баринов¹

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАСТИНЫ НОМЕРА АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹
Акционерное общество «Инжиниринговая компания «АСЭ»²

Предложен новый подход к решению задачи обнаружения пластины номера транспортного средства, актуальный для разработки систем мониторинга и контроля дорожного трафика. На основе теории активного восприятия разработан новый метод локализации рамки номера автомобиля, включающий три этапа: предварительную обработку изображения, грубую и точную оценку положения пластины номера. Этап предварительной обработки позволяет определить область изображения, в которой находится транспортное средство. Использование грубой оценки позволяет выделить области интереса на изображении и за счет этого сократить время обнаружения пластин номера. На этапе точной оценки выполняется уточнение границ пластины номера. Тестирование метода выполнено на наборе данных, содержащем 2 000 изображений, включающих изображения как пустой дороги, так и различных транспортных средств. Проведен сравнительный анализ результатов применения предложенного метода по точности обнаружения с ранее известными подходами (методом Виолы-Джонса, методом на основе дифференцирования изображения, преобразованием Хафа).

Ключевые слова: обнаружение пластины номера, обнаружение объекта, теория активного восприятия, распознавание образов, формирование признаков описания.

Введение

Задача распознавания образов в настоящее время является одной из актуальных задач теоретической информатики. Ее частным случаем является задача обнаружения номерной пластины автомобиля. Основной сферой применения является здесь мониторинг дорожных ситуаций, упрощение системы оплаты штрафов, контроль проезда и учета транспорта на контрольно-пропускных пунктах, автомойках, парковках, закрытых жилых территориях. Этапы обнаружения пластины номера включают [1]:

- 1) предварительную обработку изображения для очистки изображения от шума;
- 2) обнаружение в кадре транспортного средства;
- 3) поиск номерной пластины, результатом выполнения которой являются координаты прямоугольника, содержащего в себе номерную рамку.

Известны различные алгоритмы обнаружения пластины номера: методы, выполняющие дифференцирование изображения, метод на основе преобразования Хафа, метод Виолы-Джонса.

Методы дифференцирования изображения можно разделить на две условных категории: основанные на поиске максимумов (т.е., на вычислении первой производной), и основанные на поиске нулей (т.е., на вычислении второй производной) [2]. Недостатком данных методов является сложность дифференцирования непрерывного контура (без разрывов).

Преобразование Хафа позволяет находить плоские кривые, заданные параметрически, на монохромном изображении и предполагает представление искомого объекта в виде параметрического уравнения [3]. Недостатком является низкая устойчивость шуму на изображе-

нии; также преобразование Хафа чувствительно к качеству бинаризации и обладает невысокой скоростью работы.

Метод Виолы-Джонса относится к методам, использующим статистический анализ и классификаторы [4]. К достоинствам данного метода можно отнести устойчивость к искажениям изображений номерных знаков.

1. Метод локализации номерной пластины автотранспортного средства

1.1. Предварительная обработка изображения.

Этап предварительной обработки заключается в определении области, в которой находится транспортное средство.

Пусть E – эталонное изображение, на котором транспортное средство отсутствует. Для определения на изображении C наличия транспортного средства необходимо выполнить следующие шаги.

1. Перевести изображения E и C в градации серого (1):

$$I_g = \frac{(R+G+B)}{3}, \quad (1)$$

где I_g – изображение в градации серого, R, G, B – значения цветовых каналов.

2. Выполнить нормализацию изображений E и C (2):

$$I_N = \frac{I - \min(I)}{\max(I)}, \quad (2)$$

где $\min(I)$ – минимальный элемент в матрице яркостей, $\max(I)$ – максимальный элемент в матрице яркостей, I_N – нормированное изображение.

Полученное таким образом нормированное изображение пригодно для дальнейших преобразований.

3. Представить изображения E и C в виде множества непересекающихся областей (3):

$$\mathbf{P} = \{P_i\}, i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где P_i – область изображения размером $n \times n$ пикселей; N – число областей.

4. Вычислить матрицы визуальных масс изображений E и C на основе Q -преобразования (4):

$$S_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n P_i[k, m], i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

5. Сравнить весовые матрицы изображений E и C для принятия решения о наличии в кадре транспортного средства и определения его положения:

$$D = S_c - S_E, \quad (5)$$

где S_E – матрица визуальных масс эталонного изображения, D – результат сравнения, S_c – матрица визуальных масс изображения с предполагаемым объектом.

В случае, когда разность значений элемента по модулю превышает значение средней разности, можно говорить о том, что в кадре находится новый объект (6).

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{ij} > T, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, L}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

где T – значение средней разности.



Рис. 1. Изображение-эталон: пустая дорога

Рис. 2. Исследуемое изображение

Результатом работы данного алгоритма является область, в которой находится транспортное средство (рис. 3).



Рис. 3. Часть исследуемого изображения, содержащая транспортное средство

Алгоритм обнаружения пластины номера включает два этапа: грубую и точную оценку положения номерной пластины.

1.2. Грубая оценка положения номерной пластины.

Алгоритм грубой оценки состоит из следующих шагов.

1. Разделить изображение на 256 подобластей. Визуальные массы пикселей для каждой подобласти суммируем и получаем матрицу визуальных масс подобласти (7):

$$I = \{d_{ij}\}, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, \quad (7)$$

где I – изображение, i, j – число подобластей.

2. Выполнить поэлементное умножение матрицы визуальных масс на фильтр F_2 (8):

$$P_{ij} = Q[d_{ij}] \times F_2, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}. \quad (8)$$

Для поиска прямоугольной области необязательно использовать все шестнадцать фильтров, поэтому с помощью вычислительного эксперимента было определено, что фильтр F_2 и его значение спектрального коэффициента содержат наиболее полезную информацию.

3. Определить, для какой из подобластей изображения значение спектрального коэффициента по данному фильтру будет максимальным (9):

$$(i_{\max}, j_{\max}) = \arg \max_{i=\overline{1,16}, j=\overline{1,16}} (P_{ij}). \quad (9)$$

Результаты вычисления спектральных коэффициентов по фильтру F_2 представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Спектральные коэффициенты исследуемого изображения по фильтру F_2

54,48387	49,49194	807,9355	177,8105
-37,99597	92,875	-1047,907	-182,4516
-254,5685	123,4919	1255,746	792,621
225,0323	-40,38306	-520,9113	-283,379

По наибольшему значению отклика по фильтру F_2 можно определить подобласть анализируемого изображения, которая содержит номерную пластину (рис. 4).



Рис. 4. Примерная область расположения номерной рамки

1.3. Точная оценка положения номерной пластины.

Алгоритм поиска точного местоположения пластины номера автотранспортного средства состоит из следующих шагов.

1. Выполнить проверку размеров изображения на возможное деление на неперекрывающиеся области размером 16×16 . В случае необходимости к изображению нужно добавить пиксели (рис. 5), например, повторив те, которые находятся на границе изображения.



Рис. 5. Скорректированный участок изображения, содержащий номерную рамку

2. Разбить изображение на неперекрывающиеся области размером 16×16 , для каждого участка вычислить отклик по шестнадцати фильтрам (рис. 6).



Рис. 6. Разбивка участка, содержащего номерной знак, на подобласти

3. Сформировать на основе признаков описаний для каждой области среднее отклонение без учета отклика по фильтру F_0 по следующей формуле (10):

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (d_i - d_{cp})^2}, i = \overline{1,16}, j = \overline{1,16}, \quad (10)$$

где S_{ij} – среднее отклонение спектральных коэффициентов, $n = 15$ – количество учитываемых спектральных коэффициентов, d_i – i -й спектральный коэффициент, d_{cp} – среднее арифметическое для спектральных коэффициентов подобласти.

В табл. 2 представлены значения средних отклонений, рассчитанные для каждой подобласти исследуемого изображения.

Таблица 2.

Средние отклонения спектральных коэффициентов, рассчитанные для участка изображения, содержащего номерной знак

12,113	10,683	12,034	5,2491	0,889	1,3138	1,4227	6,3531
3,2312	3,8494	5,0964	7,3662	4,0894	5,8663	5,7029	10,38
4,1662	5,3511	8,1975	7,6788	8,5634	9,0629	9,7544	4,6465
7,5104	5,2413	3,9111	3,3227	4,4436	3,3613	3,4298	3,6652
3,8617	3,8551	3,9215	3,9819	4,0459	4,0536	3,9939	4,2138

4. Произвести поиск такой области изображения, которая удовлетворяла бы двум критериям: критерию предполагаемой размерности номерной рамки (2×5 подобластей) и критерию максимальной яркости на исследуемом участке изображения (сумма значений средних отклонений для подобластей, расположенных справа и снизу от текущей подобласти, должна быть максимальной).

5. Произвести окончательную локализацию номерной рамки автотранспортного средства путем соединения точек, лежащих в центрах, выбранных на прошлом этапе подобластей.

В результате выполнения алгоритма поиска области изображения, сумма средних отклонений которой будет максимальна, а размерность – соответствующей ожидаемой размерности номерной рамки, можно получить список подобластей, соединив центры которых, очертим искомую область нахождения рамки номерного знака автотранспортного средства (рис. 7).



Рис. 7. Область нахождения рамки номерного знака

2. Вычислительный эксперимент

2.1. Описание эксперимента.

Исходными данными для проведения вычислительного эксперимента послужила база, содержащая 2 000 изображений, полученных с дорожной камеры, и включающая в себя изображения как пустой дороги, так и различных транспортных средств. Их количество на изображении меняется в диапазоне от 1 до 5, также различается освещенность. Большая часть изображений базы снята дорожной камерой, расположенной под углом 40° к дорожному полотну. Рассматриваемый метод локализации номерной рамки в качестве выходных данных выдает изображение, предположительно содержащее транспортное средство, а также прямоугольную область предполагаемого местонахождения номерной рамки, границы которой выделены белым цветом.

Результатом сравнения координат выделенной области с координатами реального местоположения номерной рамы будет вывод о степени точности локализации рамки.

2.2. Анализ результатов эксперимента.

Результаты тестирования разработанного алгоритма в нормальных условиях приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Результаты тестирования алгоритма в нормальных условиях

Размер окна	Фильтр	Количество подобластей	Точность локализации, %	Ошибка 1 рода, %	Ошибка 2 рода, %
2 × 5	F_2	16	80	13	6,7
		64	93,5	4,4	2,1
		256	95,5	3	1,5
	F_5	16	70,2	21,8	9
		64	75,5	16,3	8,2
		256	82,5	11,7	5,8
	F_{10}	16	65,3	23,1	11,6
		64	68,1	21,2	10,7
		256	70,5	19,7	9,8
3 × 6	F_2	16	78,6	14,2	7,2
		64	81,2	12,5	6,3

Окончание табл. 3

	F_2	256	88,9	7,4	3,7
	F_5	16	68,7	20,8	10,5
		64	70	11	19
		256	74,3	17,1	8,6
	F_{10}	16	59,1	13,7	27,2
		64	60,2	26,5	13,3
		256	64,4	23,7	11,9

Из данной таблицы видно, что наилучшая точность локализации номерной рамки на изображении была достигнута при следующей конфигурации:

1) количество квадратных областей, на которые разбивается изображение на этапе поиска местоположения транспортного средства: 256;

2) фильтр, на основе которого проводится расчет спектральных коэффициентов, используемых для вынесения решения о предварительном местоположении номерной рамки: F_2 ;

3) размерность окна, используемого для поиска местоположения номерной рамки: 2×5 ;

Точность, достигнутая при этой конфигурации, составила 95,5 %.

В табл. 4 проводятся сравнение наилучшего полученного результата с результатами работы известных алгоритмов, рассмотренных ранее.

Таблица 4.

Сравнение точности работы известных методов локализации номерных рамок

Название метода	Точность локализации, %
Выделение границ (операторы Кэнни, Собеля, Робертса)	85-90
Преобразование Хафа	95
Гистограммный анализ регионов	88
Метод Виолы-Джонса	98
Предлагаемый метод	96

Таким образом, реализация предложенного метода локализации номерной рамки транспортного средства по точности обнаружения и производительности не уступает реализации известных методов.

Заключение

Методы обнаружения объектов на изображении имеют широкий круг применения и играют большую роль в решении задачи локализации рамки номера автотранспортного средства. В данной работе предложен новый метод локализации рамки номера автомобиля, разработанный с позиции теории активного восприятия. В ходе вычислительного эксперимента было проведено тестирование алгоритма на различных наборах входных данных. Полученные результаты свидетельствуют о корректной работе предложенного метода. Значение точности локализации рамки номера на изображении оказалось сопоставимо с точностью ранее известных методов, а в ряде случаев даже превысило их результативность. Таким образом, предложенный метод является конкурентоспособным и пригодным к внедрению.

Библиографический список

1. **Утробин, В.А.** Элементы теории активного восприятия изображений // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010. – Т. 81, № 2. – С. 61-69.
2. **Кuo-Ming, H.** A Real-Time Mobile Vehicle License Plate Detection and Recognition / H. Kuo-Ming, H. Ching-Tang // Tamkang Journal of Science and Engineering, 2010. – V. 13. – №. 4. – P. 433-442.
3. **Fernandes, L.A.F.** Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme / L.A.F. Fernandes, M.M. Oliveira // Pattern Recognition, 2008. – V. 41. – N. 1. – P. 299-314.
4. **Viola, P.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // CVPR (1), 2001. – V. 1. – P. 511-518.
5. **Fukunaga, K.** The Estimation of the Gradient of a Density Function, with Applications in Pattern Recognition / K. Fukunaga, L. Hostetler // IEEE Transactions on Information Theory, 1975. – V. 21. – N. 1. – P. 32-40.
6. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез / В.А. Утробин. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2003. – 228 с.
7. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Информационные модели этапа понимания / В.А. Утробин. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2006. – 247 с.
8. **Утробин, В.А.** Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук, 2004. – Т. 174. – № 10. – С. 1089-1104.

*Дата поступления
в редакцию: 25.01.2020*

V.E. Gai¹, K.N. Sharutin¹, M.I. Arabadzhi², G.D. Kuznecov¹, R.O. Barinov¹

A METHOD OF DETECTING THE NUMBER PLATE OF A MOTOR VEHICLE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
Joint-stock company «Engineering company «ASE»²

Purpose: The paper proposes a solution to one of the urgent problems of pattern recognition — detecting the plate of a vehicle's number. The created method of solving this problem can be used in the development of monitoring and control systems for road traffic.

Design / methodology / approach: The proposed method is based on the theory of active perception and includes three stages of processing the original image: preprocessing, a rough and accurate estimate of the plate number position.

Findings: The test results of the method showed its effectiveness in the problem solving. The method performs detection without taking into account the nationality of the plate number.

Research limitations/implications: The proposed method, as well as the obtained results, are the starting point in the new method development of character recognition on the plate number.

Originality/value: The value of the proposed method is in the new approach of calculating the feature description of a plate number, due to which, in comparison with the known approaches, the computational complexity of solving the problem is reduced.

Key words: license plate detection, object detection, theory of active perception, object recognition, feature description forming.

А.В. Грошев

СУБОПТИМАЛЬНЫЙ РОБАСТНЫЙ ПОДХОД К ФИЛЬТРАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕГАУССОВСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

ПАО АНПП «Темп-Авиа»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен подход к логике функционирования бортового дискретного фильтра Калмана с использованием субоптимальных и адаптивно-робастных методов обработки информации для беспилотных летательных аппаратов с измерителями средней и низкой точности при недетерминированности измерений потребителя спутниковой навигационной системы и негауссовском распределении ошибок измерений в условиях радиоэлектронного противодействия. Рассмотрен метод идентификации ложной информации измерителя с использованием нормированных ошибок априорных оценок выхода фильтра Калмана на интервале времени. Приводятся результаты реализации и испытаний разработанных алгоритмов для бортовых вычислителей ряда систем на комплексе цифрового математического моделирования, а также результаты натурных испытаний.

Ключевые слова: инерциально-спутниковые системы, негауссовское распределение ошибок, дискретная субоптимальная фильтрация.

Введение

Основным требованием к разработке бортовых систем навигации и автоматического управления (СНАУ) высокодинамичными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) является обеспечение системы управления точной достоверной навигационной информацией о местоположении и параметрах движения объекта. Повышение информационной надежности СНАУ, наряду с повышением точности местоопределения, в настоящее время является важнейшей задачей для разработчиков специальных типов перспективных БПЛА. Информационная надежность тесно связана с целостностью навигационных определений, отражающей способность навигационного комплекса непрерывно поддерживать требуемые тактико-технические характеристики в изменяющихся условиях эксплуатации. Для широкого круга СНАУ данная задача может быть решена только за счет использования комплексной информации с нескольких измерителей различной физической природы.

Базовой системой навигационного контура в высокоточных БПЛА являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Они могут обеспечить бортовых потребителей всей совокупностью данных о параметрах движения летательного аппарата. Блок инерциальных чувствительных элементов (БЧЭ), в состав которого входят датчики угловых скоростей (ДУС) и датчики линейных ускорений – акселерометры, позволяет решать задачи навигации объектов, движущихся по поверхности Земли и в околоземном пространстве в широких диапазонах линейных и угловых скоростей. Такие достоинства БИНС, как высокая информативность и универсальность, определяющая всю совокупность пилотажно-навигационных параметров, полная автономность, высокая помехозащищенность, высокая скорость выдачи информации и отсутствие ограничений по углам эволюции аппарата, позволяют существенно повысить технические характеристики навигационных систем БПЛА [1].

В связи с неограниченным во времени ростом погрешностей определения навигационной информации, обусловленным инструментальными погрешностями БЧЭ, для достижения высокой точности измерений требуется комплексирование с измерителями неинерци-

альной природы. Всепогодность, высокая точность и широкий спектр определяемых параметров способствуют внедрению аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (АП СНС) во все перспективные высокоточные изделия. Измерения АП СНС, как правило, не обладают ни высокой частотой, ни информацией о параметрах ориентации; вместе с тем, их ошибки не имеют тенденции к росту и в общем случае представляют собой белый шум с математическим ожиданием, близким к нулевому. Поэтому их удобно использовать для оценки ошибок БИНС в процессе движения. При потере сигнала от СНС полученные оценки ошибок БИНС экстраполируются во времени, и с их помощью удается компенсировать погрешности автономно рассчитанных навигационных определений с достаточно высокой точностью.

Основным недостатком данных систем при их функционировании в сложных условиях является подверженность помехам. Радиоэлектронное противодействие приводит к полному изменению диаграммы направленности антенны АП СНС, снижению отношений сигнал/шум (вплоть до полного подавления АП СНС, в зависимости от уровня помех), либо замене достоверных навигационных определений теми, которые отправил атакующий излучатель. Стохастичность ошибок измерений АП СНС, в свою очередь, приводит к ошибкам оценок погрешностей БИНС, а также, возможно, к расходимости фильтра Калмана (ФК).

Радиоэлектронное противодействие и его влияние на оценки ошибок БИНС в составе комплексных навигационных систем

Выделяют два вида преднамеренных помех, которые могут воздействовать на АП СНС [2].

«Энергетические» помехи (*jamming*) – радиопомехи, предназначенные для нарушения работы АП СНС путем подавления полезного информационного сигнала. Этот тип включает в себя любые действия, направленные на нарушение функционирования самой СНС, атаку на спутники и наземную инфраструктуру управления [3, 4]. Такие помехи не позволяют измерить с необходимой точностью параметры сигналов, несущих информацию о пространственном положении, параметрах движения и т.д. Для создания широкополосных помех достаточно лишь приблизительно знать диапазоны рабочих частот подавляемых систем, поэтому разведывательная аппаратура, управляющая передатчиками помех, будет относительно простой [5]. Поскольку при одной и той же спектральной плотности мощности помеховых сигналов при создании прицельных узкополосных помех можно получить значительно меньшие массогабаритные характеристики аппаратуры по сравнению с реализацией заградительных помех, «jamming» чаще всего используются для индивидуальной защиты летательных аппаратов.

«Имитационные» помехи (*spoofing*) – радиопомехи, предназначенные для передачи ложной информации на АП СНС путем генерации специальными источниками сигналов, аутентичных сигналам СНС [6]. На практике энергетические помехи реализуются проще и надежнее, однако любое такое воздействие на радиооборудование легко распознается и, следовательно, может быть учтено. Spoofing-помехи, формируемые «генераторным» или «ретрансляционным» методом, являются более опасными, чем энергетические, поскольку их воздействие приводит к формированию ложной навигационной информации.

Основные проблемы в комплексной измерительной системе возникают при приближении к пределу помехозащищенности приемника. В этот временной интервал у АП СНС с высокой вероятностью наблюдаются нестационарные измерения различного характера, которые, прежде чем привести к подавлению приемника, искажают оценки ошибок автономной БИНС в фильтре Калмана; их экстраполяция во времени приводит к недопустимой потере точности навигационной системы.

Результаты анализа функционирования различных приемников при их натуральных испытаниях позволяют выделить наиболее характерную для АП СНС сбойную информацию:

1) простого характера:

- единичные выбросы;
- залипания;
- линейные и нелинейные уводы;
- шумы измерений АП СНС с повышенным среднеквадратичным отклонением (СКО);

2) сложного характера:

- переходные процессы с возможным перерегулированием в каналах вектора скорости в момент выхода АП СНС на режим навигации;
- гармонические низкочастотные колебания в координатных или скоростных каналах различной амплитуды;
- негауссовское распределение ошибок измерений различного уровня и интенсивности в разных каналах;
- отключения АП СНС на разворотах или в моменты выдачи АП СНС сбойной информации, приводящие к недоверенным оценкам ошибок в векторе состояния;
- вероятная выдача полностью недоверенных навигационных определений (spoofing).

Целью исследований является разработка алгоритма для обеспечения безызбыточной инерциально-спутниковой системой низко-средней точности заданной траектории полета и точности приведения в заданную точку, а также заданных свойств надежности в условиях сбоев и ошибок АП СНС.

Модернизация оптимального дискретного фильтра Калмана в субоптимальный робастный алгоритм в условиях негауссовского распределения ошибок измерений

В качестве средства для комплексной обработки информации БИНС и АП СНС используем дискретные линейные уравнения оптимальной калмановской фильтрации, поскольку они устойчивы и весьма удобны с вычислительной точки зрения для реализации в составе реальной бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС). В условиях статистической и параметрической неопределенности реализация интеграционных свойств на базе такого аппарата связана с рядом трудностей, обусловленных возможной потерей точности и целостности системы обработки информации. Рассмотрим систему (1):

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= F_{k+1,k}x_k + w_{k+1}; \\z_{k+1} &= H_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1},\end{aligned}\tag{1}$$

где x_{k+1} – вектор состояния размерности n ; w_{k+1} – вектор возмущения размерности n ; z_{k+1} – вектор измерений размерности m ; v_{k+1} – вектор случайных ошибок измерения размерности m ; $F_{k+1,k}$ – матрица состояния системы размера $n \times n$; H_{k+1} – матрица измерений размера $m \times n$.

Процесс w_{k+1} будет представлять собой гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $M[w_j w_k^T] = Q_k$, где Q_k – неотрицательно определенная диагональная матрица $n \times n$.

Процесс v_{k+1} предполагается в виде гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $M[v_j v_k^T] = R_k$, где R_k – неотрицательно определенная диагональная матрица $m \times m$. Если составляющие векторов w_{k+1} и v_{k+1} некоррелированы между собой, то матрицы Q и R диагональные и их элементы представляют собой дисперсии составляющих. Отметим, что в реальности при применении в составе СНАУ в сложной помеховой обстановке элементы вектора v_{k+1} на разных интервалах времени не

будут подчиняться гауссовскому закону распределения. Дисперсия и СКО у ошибок измерений в различные моменты времени могут находиться в очень разных пределах и не могут быть однозначно определены. Таким образом, априорно задаваемые элементы матрицы R не будут соответствовать реальности, а чрезмерное увеличение коэффициентов приведет к очень большому времени сходимости, так как при расчете коэффициентов усиления используется матрица обратная к R .

На основе известной оценки \hat{x}_k в текущий момент времени k дадим прогноз оценки для будущего момента $k+1$ (априорная оценка $\hat{x}_{k+1/k}$), который в дальнейшем скорректируем с учетом текущих измерений z_{k+1} .

В начале такта вычисления $k+1$ спрогнозируем оценки на этот такт по уравнению (2):

$$\hat{x}_{k+1/k} = F_{k+1,k} \hat{x}_k. \quad (2)$$

Далее вычислим оптимальную матрицу усиления K_{k+1} , т.е. матрицу, при которой среднее значение суммы квадратов ошибок оценивания принимает наименьшее значение. Сначала определим значение априорной матрицы ошибок оценивания $P_{k+1/k}$ (3):

$$P_{k+1/k} = F_{k+1,k} P_k F_{k+1,k}^T + Q_k, \quad (3)$$

где Q_k – ковариационная матрица, действующего на объект возмущения, размера $n \times n$. Матрицу Q_k зададим исходя из свойств определенной системы, считая, что составляющие вектора w некоррелированы между собой.

Оптимальную матрицу усиления вычислим согласно уравнению (4):

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} H_{k+1}^T \left[H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T + R_{k+1} \right]^{-1} \quad (4)$$

где R_{k+1} – неотрицательно определенная матрица шумов измерений размером $m \times m$. Матрицу R_{k+1} зададим, исходя из предположения нормальности распределения ошибок измерений системы, как $R_{k+1} = [v_j v_k^T]$, считая, что составляющие вектора v некоррелированы между собой. Зная, что в реальности шумы измерений АП СНС не будут распределены по гауссовскому закону, при синтезе алгоритма защиты от сбоя учтем этот факт.

На следующем такте вычислений будет необходимо значение апостериорной матрицы ошибок оценивания P_{k+1} . Поэтому после вычисления матрицы K_{k+1} определим (5):

$$P_{k+1} = [I - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k+1/k}. \quad (5)$$

В конце такта $k+1$ осуществляется корректирование априорной оценки с учетом текущих измерений (6):

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1/k}). \quad (6)$$

В следующем такте (такт $k+2$) процедура вычислений повторяется вновь на основе найденных для такта $k+1$ значений $\hat{x}_{k+1/k}$, P_{k+1} .

Начальное состояние x_0 принимаем в виде гауссовского случайного n -вектора с нулевым математическим ожиданием и неотрицательно определенной корреляционной матрицей $M(x_0 x_0^T) = P_0$.

Более подробно эти уравнения оптимальной фильтрации рассматриваются в [7].

В настоящее время существуют различные варианты численно более устойчивых в БЦВС модификаций стандартных алгоритмов [8], например, разложение Холесского [9-12] ковариационных матриц P ошибки оценки вектора состояния, факторизация ковариационной матрицы R шума измерений (декорреляция ошибок измерений), вычисление симметрических матричных квадратных корней от элементарных матриц [12,13], триангуляризация (QR разложение), ортогонализация Грамма-Шмидта [9-11], J-ортогональные преобразования [13] и т.д.

Привлекательность и эффективность таких алгоритмов проявляется в устойчивости (робастности) по отношению к погрешностям округления в БЦВС, снижении вычислительной загрузки БЦВС и приспособленности ряда реализаций, использующих ортогональные преобразования матриц, к программированию этих методов в параллельных или векторных вычислительных системах. Банк фильтров Калмана также идеально приспособлен для распараллеливания вычислений. По существу, использование таких методов обработки справедливо относить к области эффективных математических информационных технологий в инженерии данных. Однако при решении текущей задачи эти модификации не являются востребованными. Испытания в составе бортовых систем показали устойчивость алгоритма к погрешностям округления и потере матрицей ковариации своей положительной определенности и симметричности, а параллельность вычислений при реализации в данных системах не приводит к увеличению точности или значительному выигрышу в вычислительных ресурсах. Линейный фильтр для линейной модели и так обладает достаточно высокой численной устойчивостью из-за линейности моделей ошибок, лежащих в его основе, а снижение вычислительной загрузки может быть достигнуто за счет оптимизации количества операций при перемножении матриц с нулевыми элементами из уравнений оптимальной фильтрации.

В качестве параметров вектора состояния системы используем ошибки по координатам в проекциях на инерциальную систему координат, ошибки по проекциям вектора скорости в инерциальной системе, ошибки угловой ориентации БПЛА, нулевые сигналы акселерометров, дрейф нулевого сигнала датчиков угловой скорости. Матрицу состояния $F_{k+1,k}$ (динамическую модель системы) опишем при помощи уравнений ошибок ИНС в инерциальной системе координат (ИСК), при условии редуцированности системы и ограниченных вычислительных возможностях БЦВС, как (7):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\vec{R}}_u &= \Delta \vec{V}_u, \\ \Delta \dot{\vec{V}}_u &= -\langle \vec{\psi} \rangle \vec{a}_u + A_{u1} \Delta \vec{a}_1, \\ \dot{\vec{\psi}} &= -A_{u1} \Delta \vec{\omega}_1, \\ \Delta \dot{\vec{a}}_1 &= 0, \\ \Delta \dot{\vec{\omega}}_1 &= 0,\end{aligned}\quad (7)$$

где $\Delta \dot{\vec{R}}_u$ – ошибка местоположения; $\Delta \dot{\vec{V}}_u$ – ошибка по проекциям вектора скорости; $\dot{\vec{\psi}}$ – ошибка ориентации; \vec{a}_1 – ускорение в связанной системе координат (ССК), \vec{a}_u – ускорение в ИСК; A_{u1} – матрица ориентации ИСК относительно ССК; $\langle \vec{\psi} \rangle$ – вектор ошибок по углам ориентации; $\Delta \dot{\vec{a}}_1$ – изменение нулевых сигналов акселерометров; $\Delta \dot{\vec{\omega}}_1$ – дрейф нулевого сигнала ДУС. Таким образом, вектор состояния будет выглядеть как (8):

$$x = [\Delta R_{x_u} \Delta R_{y_u} \Delta R_{z_u} \Delta V_{x_u} \Delta V_{y_u} \Delta V_{z_u} \Delta \psi \Delta \theta \Delta \gamma \Delta \vec{a}_{1x} \Delta \vec{a}_{1y} \Delta \vec{a}_{1z} \Delta \vec{\omega}_{1x} \Delta \vec{\omega}_{1y} \Delta \vec{\omega}_{1z}], \quad (8)$$

где $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, $\Delta \gamma$ – рассогласования связанных осей по углам курса, тангажа и крена.

В данной модели все неучтенные компоненты вектора состояния входят в уравнение системы в качестве возмущений. Фильтр производит оценивание эквивалентных обобщенных ошибок с учетом неучтенных компонент вектора состояния: в оценку ухода ДУС входит погрешность масштабного коэффициента и т.д., а в оценку ухода акселерометров другие инструментальные погрешности акселерометров и методические погрешности определения вектора силы тяжести.

В системе предполагается малое изменение нулевых сигналов акселерометров и дрейфа нулевого сигнала ДУС в запуске, и незначительности неортогональностей осей и масштабных коэффициентов (предполагается, что они были скомпенсированы в процессе калибровки БИНС).

Вектор измерений будет состоять из ошибок по координатам и ошибок по проекциям вектора скорости в инерциальной системе координат (9):

$$Z = [\Delta R x_u \Delta R y_u \Delta R z_u \Delta V x_u \Delta V y_u \Delta V z_u]. \quad (9)$$

В зависимости от настроек фильтра Калмана (коэффициентов матриц P, Q и R), алгоритм комплексирования обеспечивает различную скорость сходимости и скорость накопления ошибок в процессе пролонгации. Для достижения наилучшего уровня точности системы настройка должна производиться с учетом особенностей динамики изделия и уровня погрешностей, характерных для данной системы. Оценка скорости накопления погрешностей после некоторого времени комплексирования с АП СНС производится путем снятия достоверности АП СНС и сравнения навигационных определений эталонной модели с навигационными определениями алгоритма комплексирования. Чем меньше уровень ошибок местоопределения и проекций вектора скорости, накопленных в процессе пролонгации, тем более точное решение обеспечивает алгоритм комплексирования.

Для корректной работы фильтра необходимы точная априорная информация о шумах состояния и измерения, и условие некоррелированности шумов, что в условиях радиоэлектронного противодействия невозможно. При невыполнении указанных условий может возникнуть проблема расходимости фильтра. К концу переходного процесса и на длительных временах непрерывного функционирования матрицы ковариации ошибок P и коэффициентов усиления K устанавливаются, становятся инертными к различным флуктуациям, изменениям режимов, изменениям состояния и др., т.е., слабо изменяются при наличии внешних воздействий. Диагональные элементы матрицы P в таких условиях уже не будут отражать действительные дисперсии ошибок ковариации.

Использование уравнений оптимальной фильтрации, где при отсутствии или недостоверности измерений АП СНС происходит интегрирование уравнений ИНС с учетом оценок ошибок системы, полученных по результатам работы ФК в совместном режиме, при работе в составе реальной системы имеет следующие недостатки:

- из-за невысокой вычислительной мощности БЦВС не все параметры, характеризующие функционирование системы, включаются в вектор состояния;
- нарушение адекватности математических моделей ошибок и реальных измерительных процессов, а также наличие аномальных наблюдений приводят к расходимости и потере целостности ФК;
- при негауссовом распределении недостоверных измерений АП СНС и их несвоевременной идентификации измерения принимаются в обработку ФК, перестают соответствовать реальности оценки ошибок из вектора состояния, что при потере сигнала от АП СНС приводит к повышенным ошибкам комплексной системы;
- несоответствие априорных коэффициентов матриц ковариации, возмущающих воздействий и шумов измерений реальным может привести к расходимости ФК.

Используем комплексный адаптивно-робастный подход, чтобы синтезировать алгоритм, в котором постараемся скомпенсировать эти недостатки до уровня выполнения технических требований к изделию. Поскольку фильтру Калмана требуется априорная информация о математической модели объекта и статистике входных и измерительных шумов, которую нельзя получить априорно, возникает необходимость ограничивать вектор измерений и само множество входных и измерительных шумов. Неточность информации об априорных данных может стать причиной недостоверных оценок вектора состояния или расходимости фильтра. Адаптивная оценка оптимальных матриц Q и R в процессе полета в условиях недостоверных измерений АП СНС не может быть выполнена, так как шумы измерений являются негауссовыми. Зная некоторые особенности функционирования измерительной системы, определим множество аномальных измерений, которые не будем принимать в обработку фильтром, чтобы не допустить его расходимости.

1. При отсутствии признака навигации или 3-D решения и наличии измерений АП СНС не будем брать измерения в обработку совместным фильтром.

2. Из-за расположения антенны приемника АП СНС на верхней поверхности БПЛА при крене или тангаже больше определенных значений (например, 90 °) корпус изделия

начинает закрывать обзор антенне, сектор видимого неба начинает сокращаться, теряется сигнал с доступных космических аппаратов. В совокупности с большими угловыми скоростями изделия это может привести к выдаче АП СНС недостоверной информации.

3. Слишком большие ошибки в векторе измерений, на которые матрицы ковариации явно не рассчитаны, и которые не могут быть характерны определенной системе, приводят к расходимости ФК, поэтому введем ограничение на вектор измерений, состоящий из ошибок по координатам и проекциям вектора скорости в ИСК. Здесь следует учитывать, что при увеличении времени автономной работы ошибки БИНС средней точности могут достигать больших значений естественным образом, особенно, на неоткалиброванных системах, поэтому ограничения на вектор состояния должны однозначно их перекрывать.

Фильтр будет функционировать в трех режимах:

- в момент прихода измерений АП СНС, на первом шаге работы ФК, происходит пересчет матриц ковариации, коэффициентов усиления, т.е., сам процесс фильтрации;
- на следующем такте до коррекции вектора состояния запускается алгоритм защиты от сбоев, который по поведению нормированной невязки оценивает достоверность измерений и независимо от их достоверности берет данные в обработку;
- до прихода следующих измерений происходит экстраполяция оценок во времени.

Алгоритм комплексирования для такого случая представлен на рис. 1. На первом шаге работы ФК происходит расчет априорной матрицы P , оптимальной матрицы усиления K , априорного вектора состояния, вектора измерений и невязок измерений. В резервной ветке происходит экстраполяция последнего достоверного вектора состояния и формирование резервного решения на основе этого вектора состояния. Достоверность измерений определяется на основе анализа поведения ошибок оценивания и их принадлежности к области нормальных значений не на протяжении всего полета, а на коротком временном интервале. Для контроля i -го измерительного канала в таких условиях предлагается использовать модуль невязки ФК, нормированной при помощи трех среднеквадратичных отклонений ее скользящего невзвешенного среднего, рассчитанного на интервале времени, при помощи скользящего окна [14]. Скользящее среднее было выбрано для нормирования, так как оно само по себе является фильтром низких частот, т.е., пропускает низкочастотную активность (долгосрочные циклы), отсекая высокочастотные – случайные колебания [15].

На первоначальном этапе накопим значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (СКО) ряда невязок до заполнения скользящего окна, используемого для анализа измерений системы. Для обеспечения адаптивности было выбрано окно в 20 измерений ($D_{win} = 20$), на интервале времени 2 с (при частоте обновления данных АП СНС в 10 Гц). При большей длине окна снижается скорость сходимости значений нормированных невязок к нормальному уровню после обнаружения сбойной информации, кроме того, увеличивается время запуска алгоритма.

В штатном режиме функционирования алгоритма для каждого измерительного канала рассчитаем нормированную невязку $\|v_{i,takt}\| = |v_{i,takt}| / 3\sigma_i$. В качестве нормы на этом этапе используем СКО ряда невязок из последних $D_{win} = 20$ элементов. На каждом такте измерений будем производить коррекцию математического ожидания и СКО ряда невязок скользящим

окном при условии их достоверности, как $M_i = (\sum_{j=takt-20}^{takt} v_{i,j}) / D_{win}$

и $\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=takt-20}^{takt} (M_i - v_{i,j})^2 / D_{win}}$. При расчете сумм во всех формулах полный пересчет

не производится, т.е., на каждом такте работы происходит лишь прибавление нового значения, вычитание последнего в очереди и сдвиг скользящего окна.

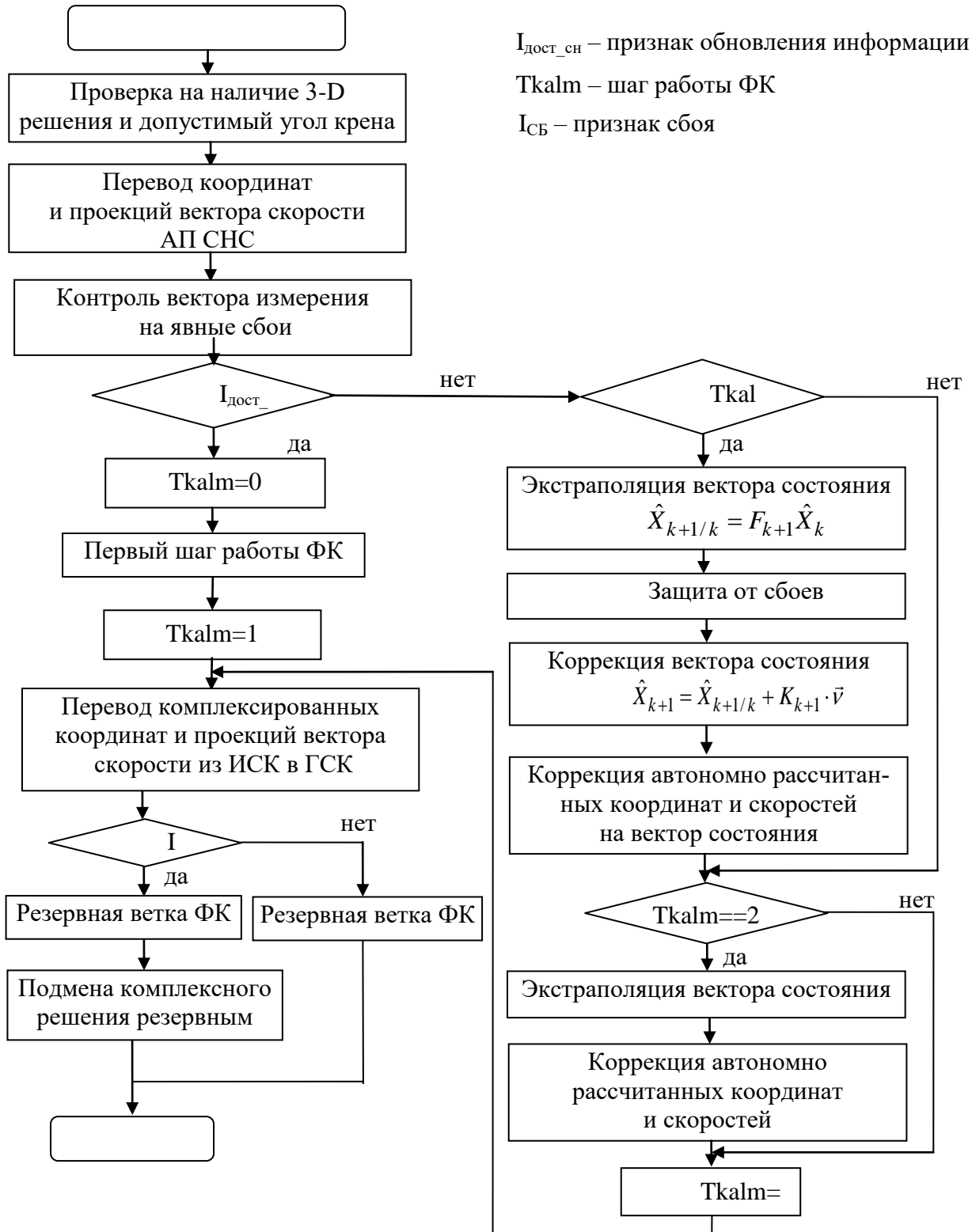


Рис. 1. Блок-схема алгоритма комплексирования

Допусковый интервал для нормированной невязки выбирается исходя из ее статистических свойств, а также требований к точности коррекции на маршевом и конечном участке автономного полета: при малом рассогласовании между реальными z_k и прогнозируемыми $H_k \cdot F_{k,k-1} \cdot \hat{x}_{k-1}$ наблюдениями нормированные невязки должны принадлежать интервалу $[0; 1]$. В качестве допускового интервала можно выбирать табличное значение критерия χ^2

для D_{win} степеней свободы с некоторой вероятностью $\varphi: \alpha = \chi_{3\sigma}^2(\varphi, D_{win}) / D_{win}$, однако в стационарном виде при условии гауссовских возмущающих воздействий и шумов измерений невязка по уровню не должна превышать 3 своих среднеквадратичных отклонения, при условии достоверности информации измерителей, таким образом, подтверждается гипотеза о нормальности распределения ошибок.

Нормированная невязка формируется по текущей невязке и отражает текущее состояние i -го канала вектора наблюдений. Ее отклонение от допуска ($\|v_{i,takt}\| > \alpha$) может быть связано как с кратковременными сбоями, так и с долгосрочными уводами либо отказами.

При помощи критерия на основе нормированной невязки можно синтезировать двухуровневую проверку измерений.

1. Невязка на коротком временном интервале нормируется при помощи СКО, рассчитанного только по достоверным измерениям. Измерения, достоверность которых определена по критерию нормированной невязки на интервале в 2 с, используются для формирования комплексного решения для системы управления.

2. Фильтр работает всегда, за исключением явных нарушений в векторе измерений.

3. Множество явных нарушений ограничивается с целью не допустить расходимости фильтра.

4. При постоянной работе фильтра и функционировании защиты от сбоев происходит расчет параметров комплексного наблюдателя на основе все той же нормированной невязки, на интервале в 10 с. Если нормированная невязка комплексного наблюдателя подчиняется гауссовскому закону, т.е., по модулю меньше 3 своих СКО на некотором интервале времени, то начинает работать более тонкий контроль. Статистический критерий достоверности остается таким же, т.е., нормированная невязка должна подчиняться гауссовскому закону распределения, однако, теперь СКО для текущих ошибок оценок ФК пересчитывается только в случае принадлежности нормированной невязки к множеству гауссовских случайных величин.

Суть метода заключается в следующем.

1. Множество возможных векторов измерений Z (рассогласования навигационных определений АП СНС и БИНС) разделяется на множество измерений, приводящих к расходимости фильтра, и множество не приводящих к расходимости, но по которому невозможно получить оптимальную оценку вектора состояния.

2. Измерения, не приводящие к расходимости фильтра, принимаются в совместную обработку. По невязке, нормированной ее СКО на интервале 2 с, полученной при совместной обработке таких измерений, определяется ее принадлежность к множеству нормальных измерений. Если измерения принадлежат множеству нормальных, то производится коррекция вектора состояния и расчет комплексного решения на основе этого вектора состояния.

3. Если нормированная невязка превышает 3 своих СКО, то включается резервная ветка, где достоверно оцененный вектор состояния экстраполируется, и комплексное решение в систему управления формируется на его основе. Фильтр осуществляет совместную обработку недостоверных измерений, при этом проверка принадлежности невязок к множеству нормальных измерений производится на интервале 10 с нормированием при помощи СКО текущих измерений вне зависимости от их достоверности.

4. На длительном интервале сбойных данных происходит сброс первых 6 элементов вектора состояния.

5. Заданные априорно элементы главных диагоналей в матрицах P , Q и R демонстрируют желаемый, а не реальный уровень ошибок измерений, возмущающих воздействий и ковариации ошибок оценок.

6. При обработке совместным фильтром недостоверных измерений расчет информации для системы управления формируется в резервной ветке по последнему достоверно оцененному вектору состояния.

Результаты испытаний алгоритма комплексирования на цифровом математическом комплексе и в натуральных испытаниях

Модель АП СНС в цифровом математическом комплексе (ЦМК) для слабосвязанной схемы комплексирования представлена в виде модуля эталонных измерений, формирующего координаты и проекции вектора скорости АП СНС на оси ГСК с возможностью сдвигать время выдачи навигационных определений и накладывать шумы измерений, а также любые виды сбоев в выдаче информации АП СНС. В целях проверки работоспособности алгоритмов защиты от сбоев исследуется реакция комплексной системы в замкнутом контуре на наиболее характерные типы сбойных измерений АП СНС.

На различных этапах разработки и отработки новых изделий с новой АП СНС часто наблюдаемым явлением становится сбойная информация АП СНС различного характера. В связи с этим требуется определить уровень устойчивости и робастности алгоритмов комплексирования. Под робастностью и устойчивостью алгоритмов комплексирования будем понимать сохранение свойств системы при воздействии ошибок и нестационарных измерений со стороны АП СНС, независимость влияния на результат различного рода недетерминированных выбросов и помех со стороны АП СНС.

Приведем, в качестве примера, результаты математического моделирования негауссовских ошибок измерений АП СНС на ЦМК.

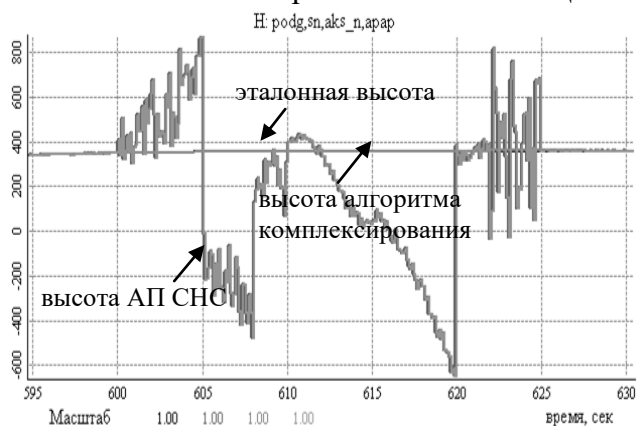


Рис. 2. Высоты, [м]

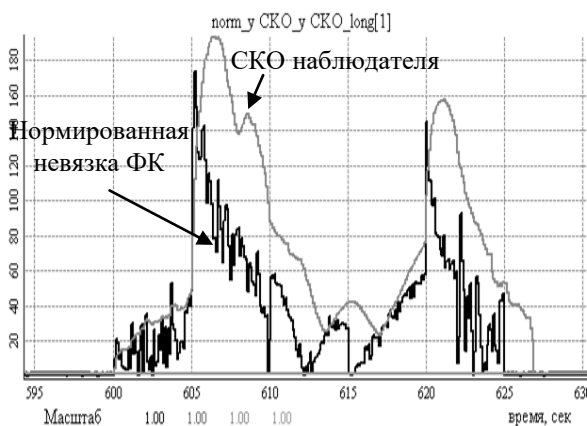


Рис. 3. Критерии, [м]

На рис. 2 представлена вероятная сбойная ситуация, когда из-за нарушений в расчете псевдодальностей АП СНС начинает выдавать недостоверные измерения. На рис. 3 видно соответствующее поведение нормированной невязки. Ее СКО, рассчитанное на интервале времени в 10 с, соответствует СКО ошибок измерений, при этом сбойная информация обрабатывалась в совместном фильтре, а комплексное решение формировалось по экстраполированному последнему достоверному вектору состояния. По характеру его изменения было принято решение о недостоверности измерений. СКО на коротком интервале по достоверным измерениям не рассчитывалось, так как сработал более грубый контроль. На рис. 2 высота алгоритма комплексирования совпадает с высотой эталонной модели с достаточно высокой точностью.

Когда измерительные данные содержат ошибки произвольной величины, их изменения характеризуются произвольными градиентами, а достоверность каждого навигационного решения, вырабатываемого оперативно в течение полета, должна быть гарантирована, найти приемлемый вид множества ошибок не представляется возможным. Указанные обстоятель-

ства не позволяют использовать гарантирующий подход при создании автоматических автономных систем обработки данных рассматриваемого применения.

Приемлемый вид множества вероятных ошибок определяется по результатам анализа объема натурных и полунатурных испытаний и проверки устойчивости системы к воздействию недостоверной информации. Подход к защите от сбоев системы в таких условиях сводится к использованию в ФК измерений, чьи статистические характеристики в большей мере соответствуют теории оптимального оценивания.

Характер применения некоторых типов, разрабатываемых БПЛА, позволяет фиксировать телеметрическую информацию при функционировании изделия в автономном полете по радиоканалу. На рис. 4-5 в качестве примера представлены результаты испытаний реальной системы при ее автономном функционировании.

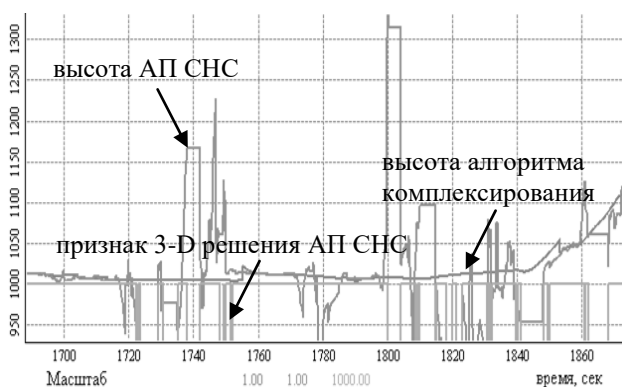


Рис. 4. Высоты, [м]

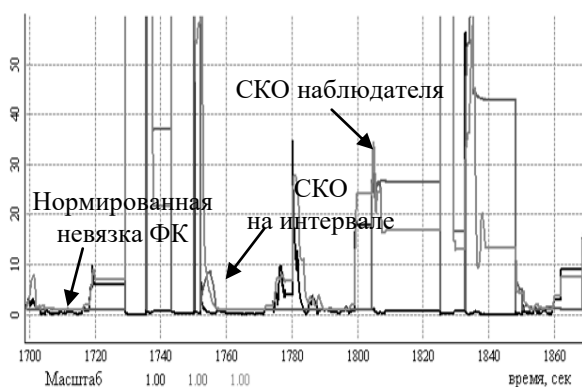


Рис. 5. Критерии, [м]

В показаниях АП СНС наблюдаются выбросы и зависания. Сам по себе характер измерений является стохастическим. Из рис. 4 очевидно, что высота АК не содержит выбросов и ее качество является вполне удовлетворительным. Благодаря усовершенствованной структуре фильтра, недетерминированные измерения, в общем, не приводят ни к расходимости фильтра, ни к ухудшению точности системы в целом. Недостоверные измерения отражаются на поведении невязки, так как берутся в обработку фильтром, однако, при этом комплексное решение ИСНС выдается в систему управления по последнему достоверно оцененному вектору состояния в режиме экстраполяции оценок ошибок.

Заключение

Алгоритм фильтрации с разработанным блоком защиты от сбоев по результатам натурных испытаний продемонстрировал заявленные свойства надежности и позволил навигационной системе БПЛА функционировать с достаточной точностью на протяжении всего времени автономного полета. Калмановская фильтрация не очень хорошо показывает себя в условиях стохастичности измерений и негауссовского распределения ошибок измерений. Довольно сложной задачей оказывается получение приемлемых оценок ошибок БИНС, когда измерительные данные содержат ошибки произвольной величины, их изменения характеризуются произвольными градиентами, а достоверность каждого навигационного решения, вырабатываемого оперативно в течение полета, должна быть гарантирована. Приведены результаты реакции алгоритма комплексирования инерциально-спутниковой безызбыточной системы низко-средней точности на негауссовские ошибки измерений. Приемлемый вид множества вероятных ошибок определен по результатам анализа объема натурных и полунатурных испытаний и проверки устойчивости системы к воздействию недостоверной информации. Подход к защите от сбоев системы в таких условиях сводится к использованию в

фильтре Калмана измерений, чьи статистические характеристики в большей мере соответствуют теории оптимального оценивания. В указанных условиях разработанный подход с высокой вероятностью позволяет сохранить точность системы на безызбыточных инерциально-спутниковых системах низко-средней точности в сложных условиях функционирования.

Библиографический список

1. **Веремеенко, К.К.** Анализ состояния разработок, интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем / К.К. Веремеенко, Б.В. Кошелев, Ю.А. Соловьев // *Новости навигации*. – 2010. – № 4. – С. 32-41.
2. **Дао, Х.К.** Принципы обнаружения преднамеренных помех, воздействующих на аппаратуру потребителей спутниковых радионавигационных систем / Х.К. Дао, Д.Д. Ступин, Р.А. Шевченко // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. – 2019. – № 5.
3. **Дятлов, А.П.** Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами / А.П. Дятлов, П.А. Дятлов, Б.Х. Кульбикаян. – М.: Радио и связь, 2004. – 226 с.
4. **Magiera, J.** Detection and Mitigation of GPS Spoofing Based on Antenna Array Processing. *Journal of Applied Research and Technology* / J. Magiera, R. Katulski, 13(1), 45-57. Elsevier Ltd. Retrieved April 15, 2019. Available at <https://www.learntechlib.org/p/198163/>.
5. **Никольский, Б.А.** Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов. Часть 1: учеб. пособие. / Б.А. Никольский. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2004. – 110 с.
6. **Романов, А.С.** Исследование влияния имитирующих помех на аппаратуру потребителей навигационной информации / А.С. Романов, П.Ю. Турлыков // *Труды МАИ*. Выпуск № 86, 2016 г. – С. 1-8.
7. **Кузовков, Н.Т.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н.Т. Кузовков, О.С. Салычев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
8. **Семушин, И.В.** Захаров Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения / И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2013. № 4. – С. 90-112.
9. **Семушин, И.В.** Вычислительные методы алгебры и оценивания: учебное пособие для вузов / И.В. Семушин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 366 с.
10. **Lawson, C.L.** Solving Least Squares Problems / C.L. Lawson, R.J. Hanson. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
11. **Каминский, П.Г.** Обзор современных методов дискретной фильтрации, использующих квадратные корни матриц / П.Г. Каминский, А.Е. Брайсон, С.Ф. Шмидт // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1973. – №6. – С. 37-53.
12. **Bierman, G.J.** Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation / G.J. Bierman – Academic Press, New York, 1977.
13. **Potter, J.E.** Statistical Filtering of Space Navigation Measurements / J.E. Potter, R.G. Stern // *Proceedings of 1963 AIAA Guidance and Control Conference*, AIAA, New York, 1963.
14. **Грошев, А.В.** Помехоустойчивый адаптивно-робастный алгоритм контроля данных в комплексной инерциально-спутниковой навигационной системе / А.В. Грошев, О.А. Фролова // *Управление большими системами*. Выпуск 74. – М.: ИПУ РАН, 2018. – С.63-80.
15. **Лонер, Р.Л.** Устойчивые статистические методы оценки данных / Р.Л. Лонер, Г.Н. Уилкинсон. – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.

*Дата поступления
в редакцию: 12.07.2020*

A.V. Groshev

**A SUB-OPTIMAL ROBUST APPROACH TO FILTRATION UNDER
THE NON-GAUSSIAN DISTRIBUTION OF MEASUREMENT ERRORS
OF COMPLEX INERTIAL-SATELLITE SYSTEMS**

ARPE Temp-Avia (Arzamas)

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The task of joint processing and estimation of measurement errors in inertial-satellite systems does not present problems in the presence of accurate a priori information about disturbance noise, measurements and the Gaussian distribution of their errors. The discrete linear equations of optimal Kalman filtering, which are very convenient from a computational point of view for implementation as part of on-board digital computers, make it possible to estimate and compensate for errors in navigation definitions with high accuracy. Under the conditions of statistical and parametric uncertainty, the implementation of integration properties on the basis of such an apparatus is associated with a number of difficulties caused by a possible loss of accuracy and integrity of the information processing system. The article proposes an approach to the logic of functioning of the on-board discrete Kalman filter using suboptimal and adaptive robust information processing methods for unmanned aerial vehicles with medium and low accuracy sensors under conditions of non-determinism of consumer measurements of satellite navigation system and non-Gaussian distribution of measurement errors during electronic countermeasures. A method is proposed for identifying false information of a meter using normalized errors of a priori estimates of the Kalman filter output over a time interval. The results of the implementation and testing of the developed algorithms for on-board computers of a number of systems using a complex of digital mathematical modeling, as well as the results of field tests are offered.

Key words: inertial-satellite systems, non-Gaussian error distribution, discrete suboptimal filtering.

М.В. Кокоулина¹, А.С. Епифанова¹, Е.Н. Пелиновский¹⁻³
О.Е. Куркина¹, А.А. Куркин¹

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАВИРУСА С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЕННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»²
Институт прикладной физики РАН³

В условиях спада заболеваемости коронавирусом во многих странах накопленные данные позволяют представить анализ в широком диапазоне значений от начала эпидемии до ее конца. Целью настоящей работы является анализ динамики развития COVID-19 с помощью обобщенного стохастического логистического уравнения для оценки числа вероятных пиков заболеваемости коронавирусом, а также оценка характера разброса коэффициентов обобщенной логистической модели в целом. Использована логистическая модель, основанная на обобщенном логистическом уравнении первого порядка. Данные о заболеваемости коронавирусом в разных странах взяты с сайта Всемирной организации здравоохранения. Показано, что для всех рассматриваемых стран обобщенное логистическое уравнение является неплохой регрессионной моделью. В то же время для описания суточного хода заболеваемости необходимо учитывать случайные факторы, что позволяет считать коэффициенты логистической модели случайными или вводить внешние силы, делая логистическое уравнение стохастическим. Определены спектральные и вероятностные свойства случайных вариаций логистического уравнения. При всей простоте обобщенной логистической модели ею хорошо описывается зависимость роста числа заболевших от времени.

Ключевые слова: обобщенная логистическая модель, математическое моделирование, COVID-19.

Введение

Последняя эпидемия коронавируса (COVID-19) затронула буквально все страны, вынужденные принять чрезвычайные меры для нераспространения заражения (закрытие государственных границ, карантин, самоизоляция, прекращение работы многих предприятий и учреждений, переход на дистанционную работу и обучение). Число заразившихся в мире уже превысило 9 млн чел. (данные конца июня 2020 г.). К счастью, во многих странах эпидемию удастся обуздать, и она идет на спад. Общая информация о распространении вирусной инфекции широко представлена в интернете; динамика распространения заболевания отражена на сайте <http://91-divoc.com/pages/covid-visualization/> в виде интерактивных графиков.

Распространение эпидемии в любой стране имеет почти один и тот же сценарий: сначала происходит быстрый рост заболевших (близкий к экспоненциальному или степенному), который затем замедляется (численные значения констант, описывающие эти зависимости, естественно, различны для разных стран). В целом данные кривые достаточно гладкие, хотя на части из них заметны изломы, связанные с действием мер карантинного характера. Также на сайте приведены графики суточной динамики заболевших. Данные кривые не являются гладкими: на них заметны спорадические вспышки числа заболевших, обусловленные многими причинами. Это означает, что динамика распространения эпидемии характеризуется разными масштабами: от нескольких месяцев (общая продолжительность эпидемии) до нескольких недель (инкубационный период) и даже до нескольких дней (инфекционный интервал и локальные причины). Одна часть масштабов связана с определенными свойствами данного вируса, другая – с действием государственных и местных органов управления, вводивших карантинные меры; есть и непредсказуемые причины, обусловленные социальным поведением (несоблюдение карантина). Отмеченные особенности динамики распространения

коронавируса SARS-CoV-2 должны отражаться в математических моделях и описываться уравнениями с переменными или даже случайными коэффициентами.

Для объяснения скорости распространения эпидемий и прогнозирования их последствий используется ряд математических моделей различной сложности. Исторически первой моделью было логистическое уравнение Ферхюльста [1], представляющее собой нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) первого порядка с постоянными коэффициентами. Оно применяется также как простейшая модель для описания роста народонаселения и эффективности рекламы. Качественно она объясняет рост числа заболевших от времени: почти экспоненциальный рост числа больных на начальном этапе развития эпидемии и выход на константу к ее завершению. Применительно к COVID-19 эта модель используется, например, в [2, 3]. Анализ данных COVID-19, сделанный в [4], показал, что экспоненциальный рост числа заболевших на начальном этапе встречается, главным образом, в Америке и Австралии, в то время как во многих европейских странах он является степенным. В этом случае можно использовать обобщенное логистическое уравнение [5-8], которое также применяется для интерпретации числа заболевших коронавирусом в [3, 9-11]. С математической точки зрения, динамика в рамках логистического уравнения является тривиальной и полностью детерминистской. Более сложная динамика, в том числе, хаотическая, возникает в разностном логистическом уравнении или с учетом запаздывания на инкубационный период [12-16], эти модели также привлекаются для интерпретации и прогноза динамики COVID-19 [17-19]. В еще более сложных моделях людей разбивают на различные группы, т.н. SIR-модели, включающие в себя систему ОДУ высокого порядка. Динамика таких систем менее изучена математически, и в ней возможны стохастические колебания [20-26]. Однако модели этого уровня просты в реализации, показали свою эффективность и активно используются для моделирования и прогноза распространения COVID-19 [27-35].

Основная трудность в применении математических моделей для прогноза эпидемии связана с неопределенностью выбора коэффициентов в уравнениях. С повышением сложности модели число коэффициентов сильно возрастает. Опыт применения моделей для интерпретации прежних эпидемий не всегда может быть использован, поскольку меняется интенсивность воздействия вирусов на живые организмы. Ранее многие эпидемии имели локальный характер, и, соответственно, меры предотвращения их распространения были иными. Характер кривых числа заболевших от времени и суточного прироста показывает их сильное различие для разных стран, что связано с различной плотностью населения, обычаями и административными превентивными мерами. В силу этого на начальной стадии развития эпидемии любые прогнозы ее конечной стадии весьма грубы и ненадежны. По мере развития эпидемии все больше констант в уравнениях может быть определено из наблюдений, вместе с тем, «старые» константы, определенные на ранних стадиях, также надо исправлять. Поэтому, в сущности, в прогностических целях решаются уравнения с переменными коэффициентами, математические свойства которых (существование, сходимости и устойчивость) не всегда определены. Таким образом, разные модели с постоянно «подправляемыми» коэффициентами могут приводить к близким результатам прогноза на короткое время. В то же время для долгосрочных прогнозов необходимо понимать возможную временную изменчивость коэффициентов модели и их влияние на характер получаемых решений.

В настоящей работе на основе имеющихся данных по первой волне COVID-19 мы попытаемся оценить характер разброса коэффициентов обобщенной логистической модели в целом, не связываясь с проблемой прогноза, когда анализируются данные короткого ряда. Идея этого исследования описана в нашей статье [8], где на примере только четырех стран обсуждается применимость простой и обобщенной логистической моделей. Из такого небольшого числа стран трудно делать какие-то общие выводы. В дайной статье использованы данные развития эпидемии в двенадцати странах: Испания, Бельгия, Германия, Чехия, Австралия, Норвегия, Австрия, Швейцария, Нидерланды, Испания, Турция, Южная Корея. В результате удастся получить значимые статистические выводы.

Обобщенная логистическая модель

Рассмотрим обобщенную модель логистического уравнения, содержащего четыре константы [5, 6] (1):

$$\frac{dN}{dt} = rN^\alpha \left(1 - \frac{N}{N_\infty}\right)^\beta, \quad (1)$$

где $N(t)$ – число заболевших людей, N_∞ – максимально возможное число заболевших людей и r – скорость роста эпидемии. При $\alpha = \beta = 1$ уравнение (1) совпадает с простым логистическим уравнением [1], решение которого находится тривиально. Обобщенное логистическое уравнение в общем случае точно не решается, однако характер решения остается неизменным – число заболевших монотонно приближается к N_∞ . На самом деле данные задаются с дискретностью в одни сутки, так что необходимо решать разностное уравнение (2):

$$N_{n+1} - N_n = r(\Delta t) N_n^\alpha \left(1 - \frac{N_n}{N_\infty}\right)^\beta, \quad (2)$$

где $\Delta t = 1$ день (естественный масштаб в медицинской статистике, и его величина всюду ниже опущена). Свойства уравнения (2) в принципе, отличаются от уравнения (1). В частности, возможны стохастические режимы, если скорость роста (r) велика. В случае классического логистического уравнения $\alpha = \beta = 1$ при $r < 2$ решение уравнения (2) описывается монотонной функцией, как и уравнения (1) [36]. Как мы увидим далее, значения скорости роста на порядок меньше, чем критическое значение, так что эта разница невелика, она показана на рис. 1 для данных из Испании, обсуждаемых ниже.

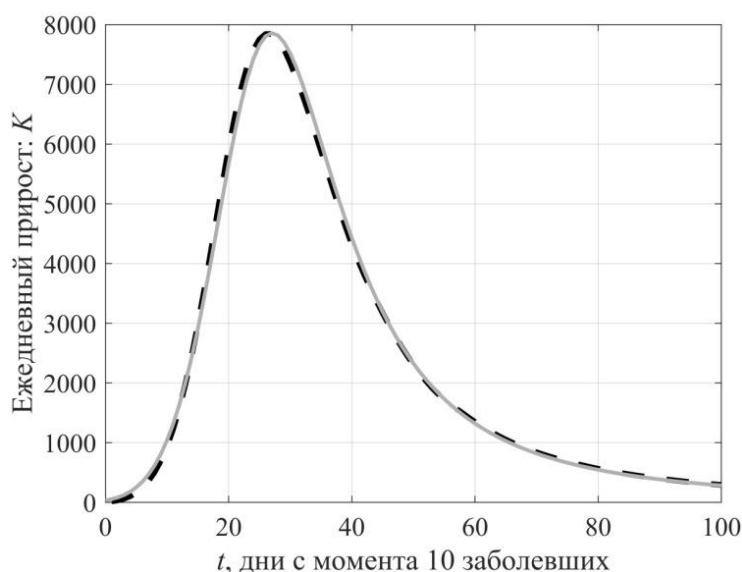


Рис. 1. Зависимость числа заболевших в день от времени:
 черная штриховая линия - численное решение обобщенного логистического уравнения (1),
 серая линия – решения разностного уравнения (2) для Испании

Обратим внимание, что величина $K_n = N_{n+1} - N_n$ есть число заболевших в сутки, оно также приводится в сводках ВОЗ. Но тогда, если справедливо обобщенное логистическое уравнение, мы получаем из (2) алгебраическую связь между количеством заболевших в сутки (K) и общим количеством зараженных (N) (3):

$$K = rN^\alpha \left(1 - \frac{N}{N_\infty}\right)^\beta. \quad (3)$$

Имеющийся массив данных ВОЗ может быть использован для регрессионных оценок четырех констант в алгебраическом уравнении (3). Здесь мы возьмем данные о заболеваемости коронавирусом в двенадцати странах, где уже закончилась первая волна эпидемии. Это Испания, Бельгия, Германия, Чехия, Австралия, Норвегия, Австрия, Швейцария, Нидерланды, Турция, Южная Корея. Число данных для каждой страны превышает шестьдесят записей (два месяца), что позволяет рассчитывать на репрезентативность получаемых оценок. Количество стран также достаточно велико (12), чтобы уверенно судить о применимости обобщенной логистической модели. Мы будем оперировать данными на 25.06.2020; взятыми из (<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>).

На рис. 2 представлены данные официальной статистики заболеваемости и аппроксимации (3). Здесь темно-серая сплошная линия описывает регрессионную кривую, а штриховые линии – границы 95 % доверительного интервала. Для вычисления доверительного интервала использовали встроенную функцию «predint» пакета Matlab. В частности, двусторонний доверительный интервал имеет вид [37] (4):

$$y_{n+l}^n \leq y_{n+l} \leq y_{n+l}^g = f(x_{n+l}) + t_{\frac{1+\alpha}{2}} \frac{s\lambda(n,l)}{2} \quad (4)$$

где $f(x_{n+l}) = y_{n+l}$ – значение y , вычисленное по регрессии при $x = x_{n+l}$; t_α – α -квантиль распределения Стьюдента при $f = n - k - 1$ степенях свободы, где k – порядок регрессии;

$s^2 = \frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2$ – дисперсия регрессии; λ – коэффициент регрессии, зависящий от

n и l . Светло-серая линия соответствует классическому логистическому уравнению $\alpha = \beta = 1$. В табл. 1 приведены значения коэффициента детерминации R^2 , который всюду превышает 0,8, свидетельствуя в пользу хорошей аппроксимации логистической кривой (3). В то же время, для простой логистической кривой $\alpha = \beta = 1$ такое согласие было бы значительно хуже, и коэффициент R^2 в ряде случаев опускался бы до 0,5. Таким образом, для всех рассмотренных стран обобщенная логистическая кривая является адекватной аппроксимацией натуральных данных, и эта модель хорошо описывает течение эпидемии.

Таблица 1.

**Коэффициенты обобщенной логистической модели (1)
и коэффициент детерминации**

Страна	N_∞	r	A	β	R^2
Италия	499300	0,994	0,8	5,1	0,96
Турция	146500	3,573	0,7	1,07	0,975
Нидерланды	41950	3,573	0,7	0,7	0,94
Южная Корея	16200	0,143	1,2	5,4	0,91
Австрия	18500	0,151	1,1	2,56	0,88
Швейцария	32100	1,093	0,8	1,5	0,86
Испания	256000	1,2	0,8	1,9	0,9
Бельгия	62000	2,2	0,7	1,3	0,9
Германия	211000	1,8	0,8	2,1	0,8
Чехия	14000	0,3	0,9	4,1	0,8
Австралия	8500	0,03	1,4	3,5	0,8
Норвегия	8900	0,6	0,9	1,6	0,8

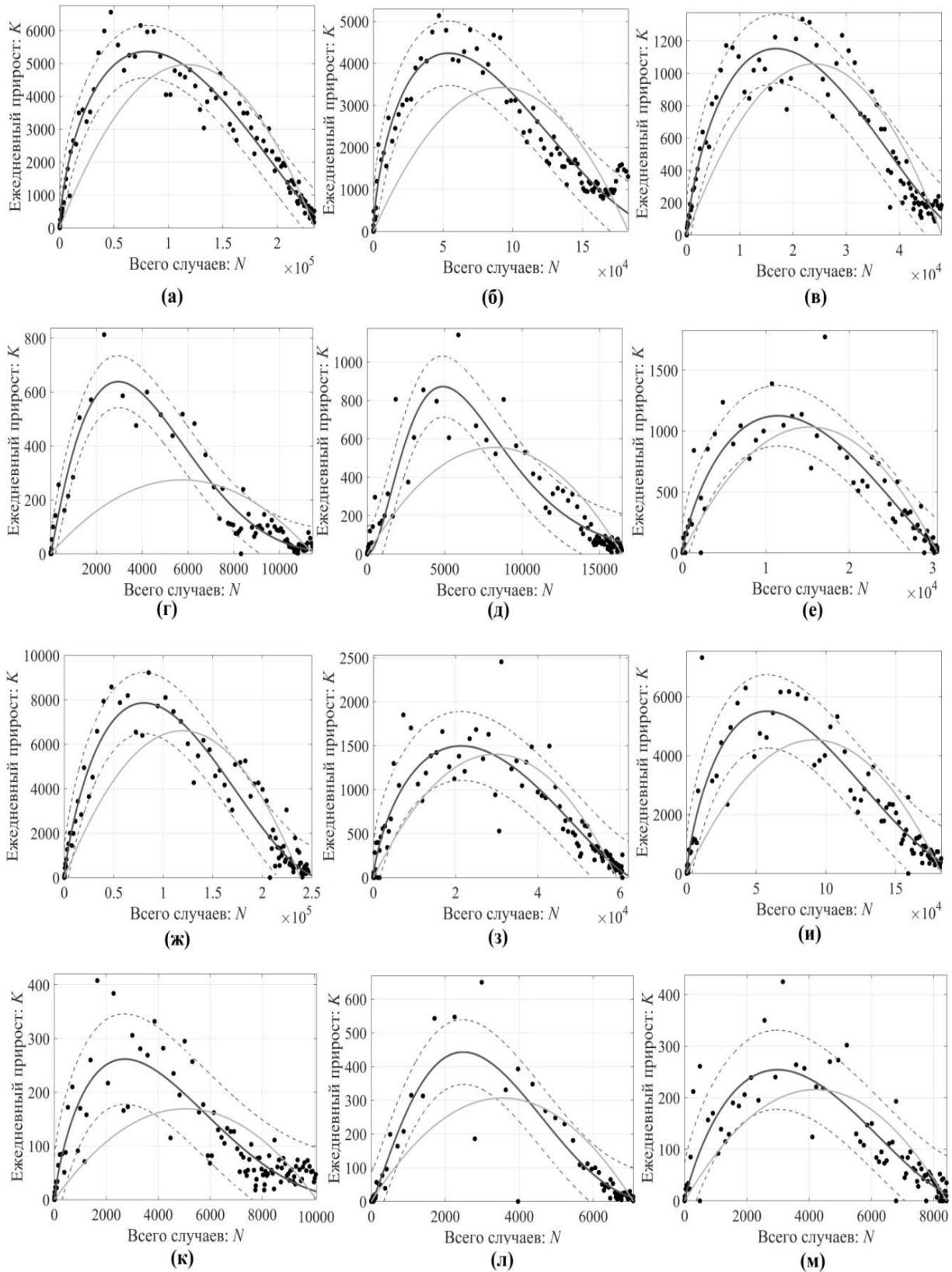


Рис. 2. Связь количества заболевших в сутки (K)

и общего числа заболевших (N) в рамках обобщенной модели:

- (1) – темно-серая линия, пунктиром даны границы 95 % доверительного интервала;
 светло-серой линией показана аналогичная кривая в рамках простой логистической модели:
 (а) Италия, (б) Турция, (в) Нидерланды, (г) Южная Корея, (д) Австрия, (е) Швейцария,
 (ж) Испания, (з) Бельгия, (и) Германия, (к) Чехия, (л) Австралия, (м) Норвегия

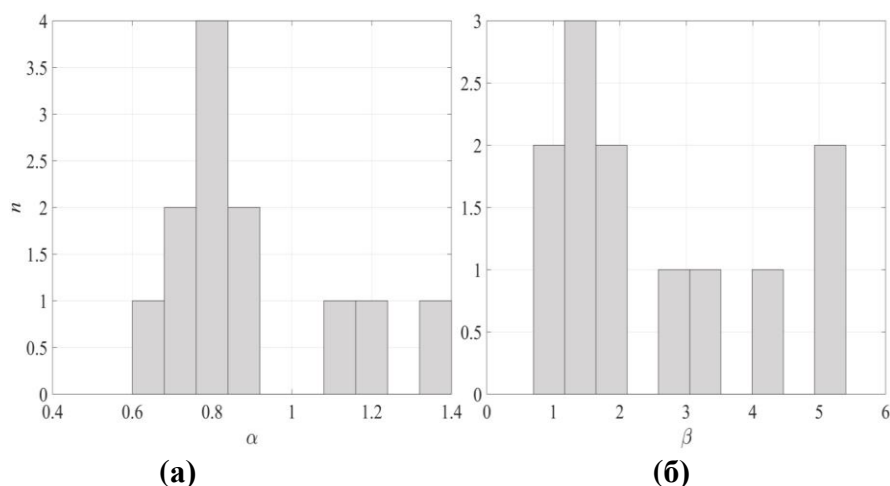


Рис. 3. Гистограмма величин показателей степени в уравнениях (1)-(2): (а) – степень α ; (б) – степень β

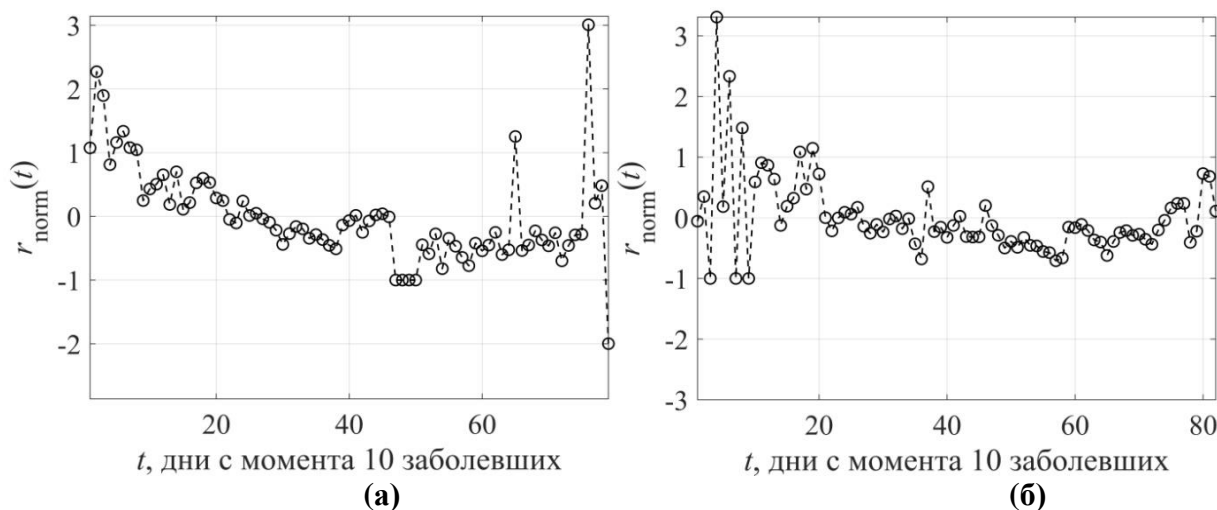


Рис. 4. Зависимость $r_{norm} = (r - \langle r \rangle) / \langle r \rangle$ от времени справа в рамках обобщенной логистической модели: (а) – для Бельгии; (б) – для Италии

Отличия обобщенной логистической кривой от классической можно характеризовать гистограммами показателей степени (рис. 3). Как видим, коэффициент α может быть как меньше, так и больше единицы (среднее значение составляет 0,89), в то время как коэффициент β почти всегда превышает единицу (среднее значение 2,57). Там, где $\beta > 1$, кривая $K(N)$ перекошена в сторону малых значений, что означает, что пик эпидемии проходит относительно быстро, в то время как окончание эпидемии затягивается. Отличия показателей степени от $\alpha = \beta = 1$ приводят к тому, что состояния равновесия уравнения (1) не являются грубыми, и решение в окрестности состояния равновесия не является экспоненциальным. Оно становится степенным и легко находится из решения уравнения (1) в окрестности состояния равновесия. Как отмечалось во Введении, степенной рост числа заболевших во время эпидемии COVID-19 характерен для многих стран [4], и обобщенная логистическая кривая неплохо соответствует данным медицинской статистики.

Хотя в среднем обобщенная логистическая кривая в достаточной мере соответствует данным наблюдений, все же ясно, что суточное количество заболевших испытывает случайные вариации, которые могут быть связаны как с асоциальным поведением (нарушением карантина), так и с количеством тестов. Эти вариации хорошо видны на рис. 2. Для простоты свяжем все вариации с изменением только одного параметра – скорости роста эпидемии, которую легко найти по формуле (5):

$$r = \frac{K}{N^\alpha \left(1 - \frac{N}{N_\infty}\right)^\beta}, \quad (5)$$

подставляя сюда известные данные ВОЗ. Эта идея, высказанная в нашей работе [7], была отражена также в одновременно появившейся публикации [38], где была применена к итальянским данным. На рис. 4 представлена зависимость $r_{norm} = (r - \langle r \rangle) / \langle r \rangle$ от времени (t) в рамках обобщенной логистической модели для Испании и Бельгии. На рис. 5 показан спектр вариаций и гистограмма распределения коэффициента роста для этих же стран. Анализ зависимостей для всех 12 государств показывает, что в целом характеристики изменчивости близки для разных стран, в том смысле, что спектры имеют пики на близких частотах (удобнее, однако, приводить периоды вместо частоты, что сделано на рис. 5) и гистограммы примерно одинаковы. Аппроксимация гистограмм гауссовым распределением носит, конечно, условный характер, однако полезна, поскольку стохастические уравнения часто решаются в классе нормальных случайных процессов. Аналогичный разброс можно изучить и по другому параметру N_∞ , на чем мы здесь останавливаться не будем.

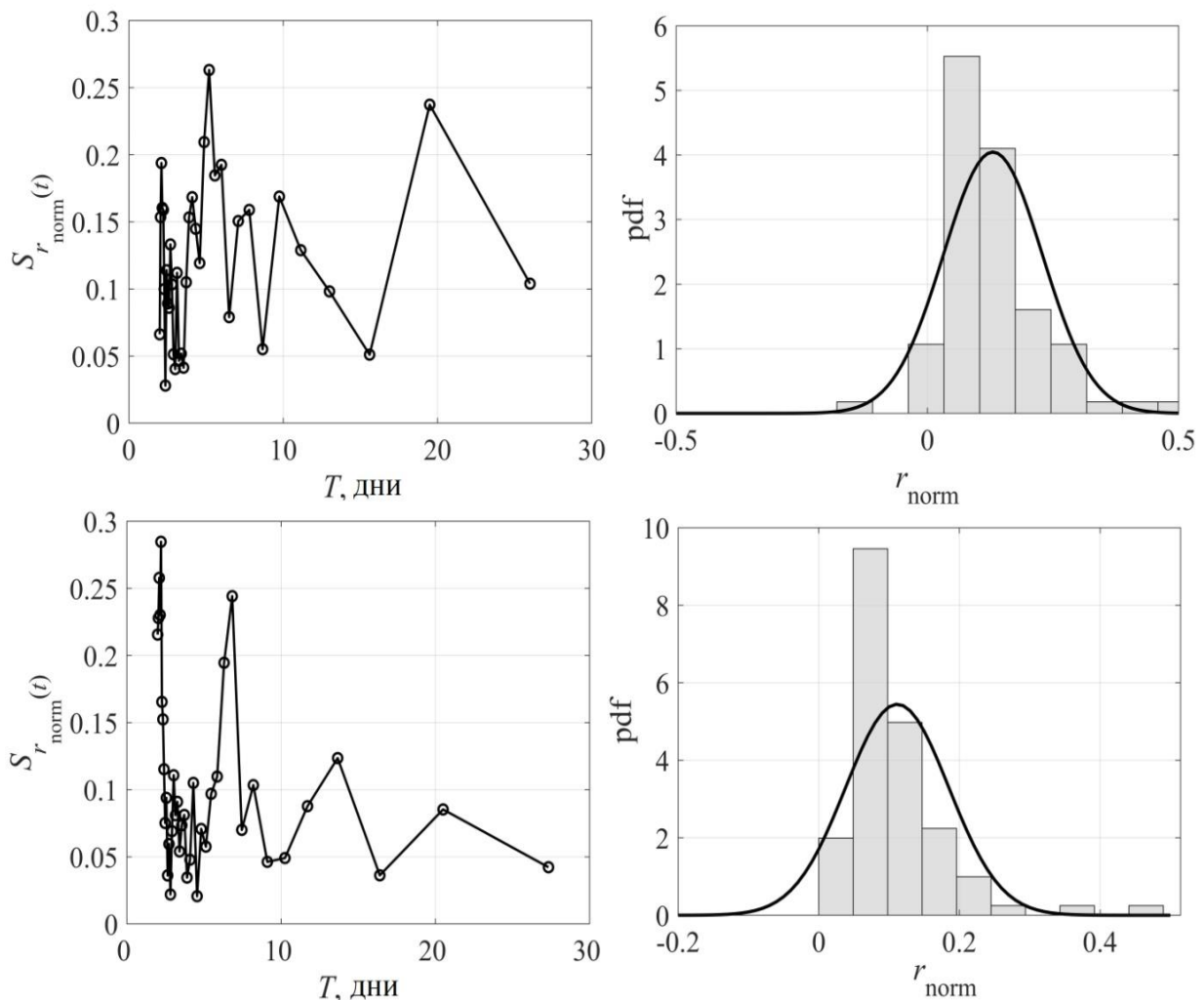


Рис. 5. Спектр и гистограмма распределения зависимости $r(t)$ в рамках обобщенной логистической модели для Испании (сверху) и Бельгии (снизу)

Аналогично можно сопоставить невязку данных с логистической кривой с помощью «внешней силы», которая может описывать как неконтролируемую миграцию инфицированных в данном регионе, так и увеличение числа тестов на коронавирус (6):

$$f = K - rN^\alpha \left(1 - \frac{N}{N_\infty}\right)^\beta. \quad (6)$$

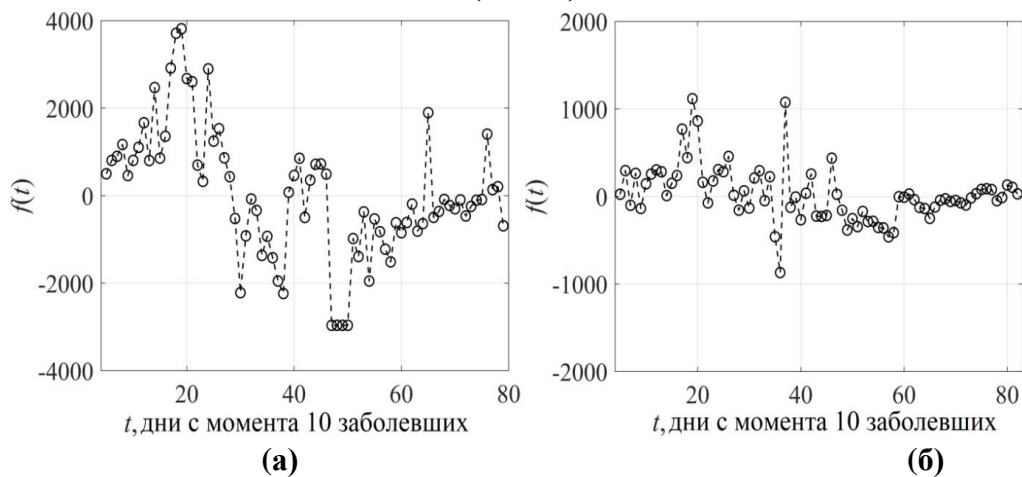


Рис. 6. «Внешняя сила» $f(t)$ в рамках обобщенной логистической модели: (а) – для Бельгии; (б) – для Италии

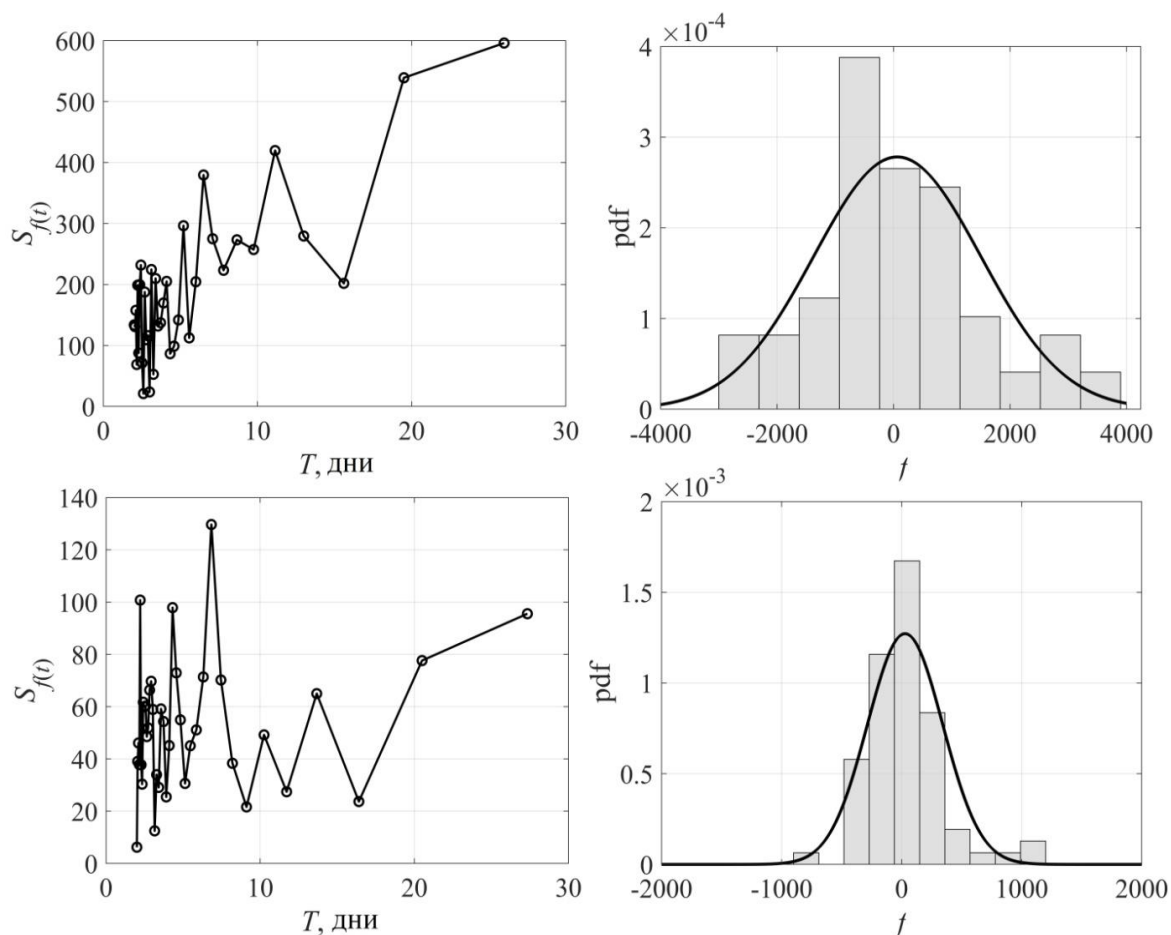


Рис. 7. Справа спектр распределения зависимости $f(t)$, слева гистограмма и ее гауссова аппроксимация (черная линия) для Испании (сверху) и Бельгии (снизу)

На рис. 6 представлены рассчитанные зависимости внешней силы от времени, а их спектральные и вероятностные характеристики – на рис. 7, опять же для двух стран: Бельгии и Испании (для остальных рисунки схожи). И здесь проявляются те же масштабы, что и при изменчивости коэффициентов уравнения.

Таким образом, натурные данные свидетельствуют о возможности использования обобщенного логистического уравнения с переменными коэффициентами и внешней силой (7):

$$\frac{dN}{dt} = r(t)N^\alpha [1 - p(t)N]^\beta + f(t), \quad (7)$$

которое может быть стохастическим. Такая модель еще нуждается в специальном математическом исследовании.

Заключение

Подведем итоги. При всей простоте обобщенной логистической модели она неплохо описывает рост числа заболевших от времени, что иллюстрируется рис. 8, на котором представлены фактические данные и численные решения уравнения (1) для 6 стран (аналогичные кривые построены для всех 12 стран). Здесь же мы привели известную логистическую кривую для случая $\alpha = \beta = 1$, демонстрирующую, что обобщенное логистическое уравнение является более адекватной моделью. Обратим внимание, что прогностическое число общего количества заболевших в обобщенной логистической модели несколько выше, чем в простой логистической модели, и выход на константу затягивается во времени.

Рис. 9 иллюстрирует возможности логистической модели для описания количества заболевших людей в сутки. В среднем теоретическая модель хорошо описывает известные данные, однако разброс точек все же значителен: иногда отклонения могут достигать 50 % и выше. Эти различия особенно заметны на пике заболеваемости, когда медицинским учреждениям необходимо иметь наиболее точный прогноз по динамике развития эпидемии. Насколько точно этот разброс описывается другими моделями (например, SIR), мы узнаем в ближайшем будущем, когда появятся результаты соответствующих исследований. С точки зрения математики, полученная разница в использовании логистической модели для описания двух характеристик – общего числа заболевших (N) и числа заболевших в сутки (K) очевидна: кривая $N(t)$ является интегральной по отношению $K(t)$, поэтому она более гладкая и «детерминированная». Для описания же зависимости $K(t)$, по крайней мере, на качественном уровне лучше использовать стохастические уравнения логистической модели типа (7), в которых введены внешние случайные силы или случайные коэффициенты. Они позволят понять степень разброса данных и, главное, число возможных больших выбросов во время эпидемии. Эти исследования еще предстоит провести.

Авторы понимают, что для реального прогноза развития эпидемии необходимо иметь многофакторные модели, включающие в себя деление населения на различные группы по возрасту, условиям жизни, плотности населения и т.д. Такие модели должны включать в себя обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных высокого порядка, учитывать запаздывающие аргументы и интегральные члены; в настоящее время они разрабатываются. Тем не менее, анализ в рамках простых малопараметрических моделей важен, поскольку позволяет качественно описать процесс, обозначив роль тех или иных факторов. В этом смысле полученные выше результаты демонстрируют возможности хорошо развитой логистической модели для описания эпидемии такого масштаба, как COVID-19.

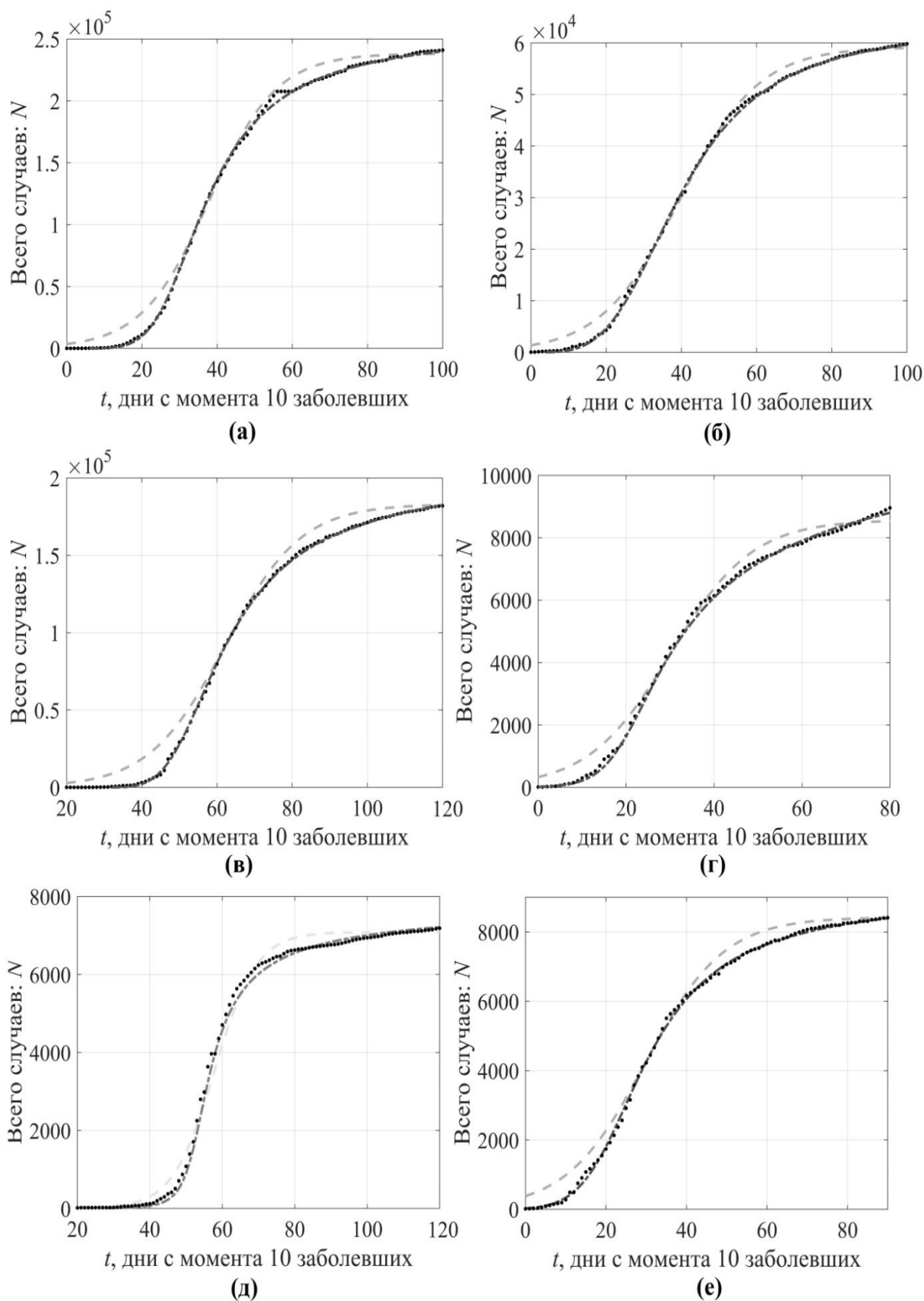


Рис. 8. Зависимость числа заболевших от времени:

черные точки – исходные данные, серая пунктирная линия – решение обыкновенной логистической модели, темно-серая штрих-пунктирная линия – численное решение уравнения (1) обобщенной логистической модели для Испании (а), Бельгии (б), Германии (в), Чехии (г), Австралии (д), Норвегии (е)

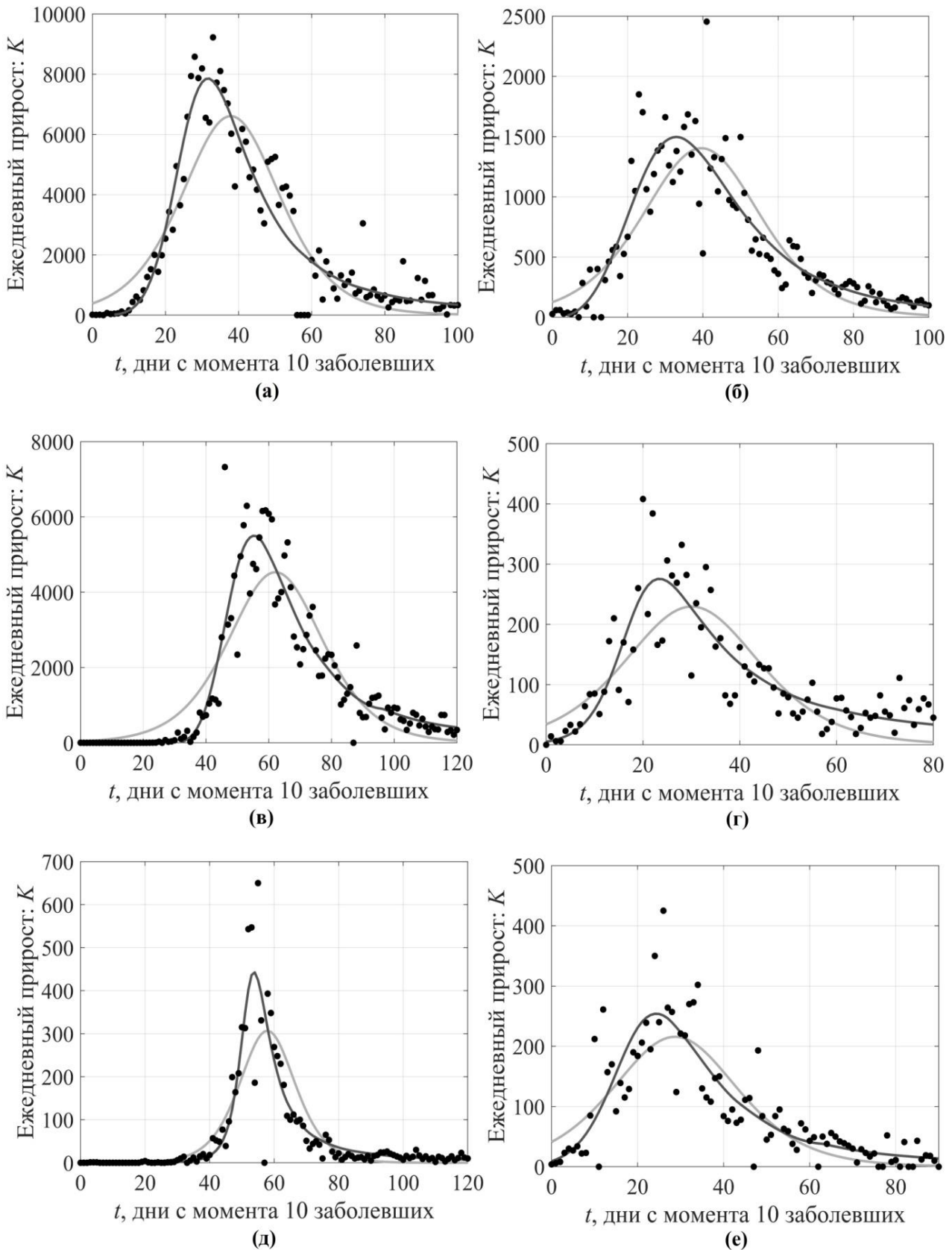


Рис. 9. Зависимость числа заболевших в день от времени:
 черные точки – исходные данные, светло-серая линия – в рамках простого логистического уравнения, темно-серая линия – численное решение обобщенного логистического уравнения (1) для Испании (а), Бельгии (б), Германии (в), Чехии (г), Австралии (д), Норвегии (е)

В заключение хотелось бы отметить, что к схожим выводам пришли авторы только что опубликованной работы [39], где анализировалась применимость SIR модели для описания числа умерших от COVID-19; их анализ основан на данных по 16 странам. Основное уравнение для аппроксимации в этой работе отличается от нашего уравнения (3).

Представленные результаты получены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2485.2020.5 и для ПЕН при поддержке Лаборатории динамических систем и приложений НИУ ВШЭ, грант Министерства науки и высшего образования РФ соглашение № 075-15-2019-1931.

Библиографический список

1. **Verhulst, P.F.** Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // *Corresp. Math. Phys.* – 1838. – V. 10. – P. 113-126.
2. **Liang, K.** Mathematical model of infection kinetics and its analysis for COVID-19, SARS and MERS // *Infection, Genetics and Evolution.* – 2020. – V. 82. – P. 104306.
3. **Sonnino, G.** Dynamics of the COVID-19 – Comparison between the Theoretical Predictions and Real Data / G. Sonnino // *arXiv preprint arXiv: 2003.13540.* 2020.
4. **Wodarz, D.** Patterns of the COVID19 epidemic spread around the world: exponential vs power laws / D. Wodarz, N.L. Komarova // *medRxiv.* 2020. DOI: 10.1101/2020.03.30.20047274.
5. **Blumberg, A.A.** Logistic growth rate functions / A.A. Blumberg // *Journal of Theoretical Biology.* – 1968. – V. 21. – № 1. – P. 42-44.
6. **Brilhante, M.F.** Modeling risk of extreme events in generalized Verhulst models / M.F. Brilhante, M.I. Gomes, D. Pestana // *REVSTAT–Statistical Journal.* – 2019. – V. 17. – № 2. – P. 145-162.
7. **Куркин, А.А.** Логистические модели распространения эпидемий / А.А. Куркин, О.Е. Куркина, Е.Н. Пелиновский // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева.* – 2020. – Т. 2(129). – С. 9-18.
8. **Pelinovsky, E.** Logistic equation and COVID-19 / E. Pelinovsky, A. Kurkin, O. Kurkina, M. Kokoulina, A. Epifanova // *Chaos, Solitons and Fractals.* – 2020. – V. 140. – P. 110241.
9. **Cássaro, F.A.M.** Can we predict the occurrence of COVID-19 cases? Considerations using a simple model of growth / F.A.M. Cássaro, L.F. Pires // *Science of the Total Environment.* – 2020. – V.728. – P. 138834. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138834.
10. **Wu, K.** Generalized logistic growth modeling of the COVID-19 outbreak in 29 provinces in China and in the rest of the world / K. Wu, D. Darcet, Q. Wang, D. Sornette // *arXiv preprint arXiv:2003.05681.* 2020.
11. **Tappe, S.** A simple mathematical model for the evolution of the corona virus / S. Tappe // *arXiv preprint arXiv:2003.09477.* 2020.
12. **Wright, E.M.** A non-linear difference-differential equation / E. M. Wright // *Journal für die reine und angewandte Mathematik.* – 1955. – V. 1955. – № 194. – P. 66-87.
13. **Бочаров, Г.А.** Прикладные проблемы математического моделирования в иммунологии / Г.А. Бочаров, Г.И. Марчук // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2000. – Т. 40. – № 12. – С. 1905-1920.
14. **Bocharov, G.** Modelling of Experimental Infections / G. Bocharov, V. Volpert, B. Ludewig, A. Meyers // *Mathematical Immunology of Virus Infections.* – Springer, Cham, 2018. – P. 97-152. DOI: 10.1007/978-3-319-72317-4_4.
15. **Bánhelyi, B.** Global attractivity of the zero solution for Wright's equation / B. Bánhelyi, T. Csendes, T. Krisztin, A. Neumaier // *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems.* – 2014. – V. 13. – № 1. – P. 537-563. DOI: 10.1137/120904226.
16. **Andrianov, I.** The Verhulst-Like Equations: Integrable ODE and ODE with Chaotic Behavior / I. Andrianov, G. Starushenko, S. Kvitka, L. Khajiyeva // *Symmetry.* – 2019. – V. 11. – № 12. –P. 1446. DOI: 10.3390/sym11121446.
17. **Perc, M.** Forecasting Covid-19 / M. Perc, Miksić N. Gorišek, M. Slavinec, A. Stožer // *Frontiers in Physics.* – 2020. – V. 8. – P. 127. DOI: 10.3389/fphy.2020.00127.
18. **Koltsova, E.M.** Mathematical Modeling of the Spread of COVID-19 in Moscow and Russian Regions / E.M. Koltsova, E.S. Kurkina, A.M. Vasetsky // *arXiv preprint arXiv:2004.10118.* 2020.

19. **Dell'Anna, L.** Solvable delay model for epidemic spreading: the case of Covid-19 in Italy / L. Dell'Anna // arXiv preprint arXiv:2003.13571. 2020.
20. **Gray, A.** A stochastic differential equation SIS epidemic model / A. Gray, D. Greenhalgh, L. Hu, X. Mao, J. Pan // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2011. – V. 71. – № 3. – P. 876-902. DOI: 10.1137/10081856X.
21. **Dieu, N.T.** Classification of asymptotic behavior in a stochastic SIR model / N. T. Dieu, D. H. Nguyen, N. H. Du, G. Yin // SIAM Journal on Applied Dynamical Systems. – 2016. – V. 15. № 2. – P. 1062-1084. DOI: 10.1137/15M1043315.
22. **Choi, S.H.** A multi-stage SIR model for rumor spreading / S. H. Choi, H. Seo, M. Yoo // Discrete & Continuous Dynamical Systems-B. – 2020. – V. 25. – № 6. – P. 2351-2372.
23. **Nguyen, D.H.** Long-Term Analysis of a Stochastic SIRS Model with General Incidence Rates / D.H. Nguyen, G. Yin, C. Zhu // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2020. – V. 80. – № 2. – P. 814-838. DOI: 10.1137/19M1246973.
24. **Yang, Y.** Dynamical analysis of a diffusive SIRS model with general incidence rate / Y. Yang, L. Zou, T. Zhang, Y. Xu // Discrete & Continuous Dynamical Systems-Series B. – 2020. – V. 25. – № 7. – P. 2433-2451. DOI: 10.3934/dcdsb.2020017.
25. **Otunuga, O.M.** Qualitative analysis of a stochastic SEITR epidemic model with multiple stages of infection and treatment / O.M. Otunuga, M.O. Ogunsolu // Infectious Disease Modelling. – 2020. – V. 5. – P. 61-90. DOI: 10.1016/j.idm.2019.12.003.
26. **Cui, J.A.** Global dynamics of an epidemiological model with acute and chronic HCV infections / J.A. Cui, S. Zhao, S. Guo, Y. Bai, X. Wang, T. Chen // Applied Mathematics Letters. – 2020. – V. 103. – P. 106203. DOI: 10.1016/j.aml.2019.106203.
27. **Bjørnstad, O.N.** Modeling infectious epidemics / O.N. Bjørnstad, K. Shea, M. Krzywinski, N. Altman // Nature methods. – 2020. – V. 17. – P. 455-456. DOI: 10.1038/s41592-020-0822-z.
28. **Giordano, G.** Modelling the COVID-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy / G. Giordano, F. Blanchini, R. Bruno, P. Colaneri, A. Di Filippo, A. Di Matteo, M. Colaneri // Nature Medicine. – 2020. – V. 26. – P. 855-860. DOI: 10.1038/s41591-020-0883-7.
29. **Nakamura, G.** Confinement strategies in a simple SIR model / G. Nakamura, B. Grammaticos, M. Badoual // arXiv preprint arXiv:2004.09314. 2020.
30. **Maier, B.F.** Effective containment explains subexponential growth in recent confirmed COVID-19 cases in China / B.F. Maier, D. Brockmann // Science. – 2020. – V. 368. – № 6492. – P. 742-746. DOI: 10.1126/science.abb4557.
31. **Barlow, N.S.** Accurate closed-form solution of the SIR epidemic model / N.S. Barlow, S.J. Weinstein // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2020. – V. 408. – P. 132540. DOI: 10.1016/j.physd.2020.132540.
32. **Lopez, V.** The comparison of trends in Spain and the Nederland: a Dynamical compartment model of the transmission of Coronavirus / V. Lopez, M. Čukić // arXiv preprint arXiv:2004.09874. 2020.
33. **Fanelli, D.** Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China, Italy and France / D. Fanelli, F. Piazza // Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. – V. 134. – P. 109761. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.109761.
34. **Fredj, H.B.** Novel Corona virus Disease infection in Tunisia: Mathematical model and the impact of the quarantine strategy / H.B. Fredj, F. Chrif // Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. – V. 138. – P. 109969. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.109969.
35. **Криворотько, О.И.** Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области. / О.И. Криворотько, С.И. Кабанихин, Н.Ю. Зятков, А.Ю. Приходько, Н.М. Прохошин, М.А. Шишленин // arXiv:2006.12619v1 [q-bio.PE]. 2020.
36. **Tsoularis, A.** Analysis of logistic growth models / A. Tsoularis, J. Wallace // Mathematical Biosciences. – 2002. – V. 179. – № 1. – P. 21-55. DOI: 10.1016/S0025-5564(02)00096-2.
37. **Кобзарь, А.И.** Прикладная математическая статистика. / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
38. **Consolini, C.** A stretched logistic equation for pandemic spreading / C. Consolini, M. Materassi // Chaos, Solitons and Fractals. – 2020. – V. 140. – P. 110113. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110113.
39. **Carletti, T.** COVID-19: The unreasonable effectiveness of simple models / T. Carletti, D. Fanelli, F. Piazza // Chaos, Solitons and Fractals. – 2020. – V. 140. – P. 100034.

*Дата поступления
в редакцию: 15.07.2020*

M.V. Kokoulina¹, A.S. Epifanova¹, E.N. Pelinovsky¹⁻³, O.E. Kurkina¹, A.A. Kurkin¹

**ANALYSIS OF CORONAVIRUS DYNAMICS
USING THE GENERALIZED LOGISTIC MODEL**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
National Research University – Higher School of Economics²
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences³

Purpose: to analyze the dynamics of COVID-19 development using a generalized stochastic logistic equation to estimate the number of probable peaks in coronavirus incidence and to evaluate the nature of the scatter of the generalized logistic model coefficients.

Design/methodology/approach: we use a logistic model based on a generalized first-order logistic equation. The data on the incidence of coronavirus in different countries are taken from the website of the World Health Organization.

Findings: It is shown that the generalized logistic equation is a good regression model for all considered countries. At the same time, to describe the daily course of the incidence, it is necessary to take into account random factors, which allows us to consider the coefficients of the logistics model as random, or to introduce external forces, making the logistics equation stochastic. Spectral and probabilistic properties of random variations of the logistic equation are determined.

Originality/value: The obtained results may be used for the forecasting of the epidemic characteristics, including COVID-19.

Key words: generalized logistic model, mathematical modeling, COVID-19.

УДК 517.91, 534.222

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_42

В.Е. Назаров¹, А.Б. Колпаков²

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ИЗ КВАРЦИТА

Институт прикладной физики РАН¹
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²

Представлены результаты экспериментального исследования и аналитического описания нелинейных акустических эффектов (амплитудно-зависимых потерь и сдвига резонансных частот, а также генерации высших гармоник) в резонаторе из природного минерала – кварцита. В качестве резонатора использовался тонкий стержень с жесткой и мягкой границами. Для адекватного описания результатов проводимых измерений применялись феноменологические гистерезисные уравнения состояния. На основе анализа и сравнения установленных экспериментальных и теоретических амплитудно-частотных зависимостей наблюдаемых эффектов в резонаторе определены параметры гистерезисной нелинейности образца исследуемого материала.

Ключевые слова: нелинейные акустические эффекты, резонатор, уравнение состояния, кварцит, упругий и неупругий гистерезис.

Введение

К актуальным вопросам современной нелинейной акустики относится комплекс задач, связанных с:

- 1) экспериментальным изучением нелинейных акустических эффектов в микронеоднородных [1] (или в мезоскопических [2]) твердых телах, обладающих сильной и, как правило, неаналитической нелинейностью;
- 2) определением амплитудных и частотных зависимостей наблюдаемых волновых процессов;
- 3) выявлением механизмов акустической нелинейности и нелинейных уравнений состояния исследуемых сред;
- 4) получением решений нелинейных волновых уравнений и описанием нелинейных волновых процессов в исследованных материалах в режиме бегущих и стоячих волн;
- 5) определением параметров нелинейности таких сред.

Интерес к этим задачам связан с тем, что «классическая» пятиконстантная теория упругости [3], призванная для описания деформирования однородных упругих твердых тел, обладающих слабой квадратичной (аналитической) нелинейностью, не описывает нелинейные волновые процессы в микронеоднородных средах, а микроскопической теории, которая могла бы адекватно описывать нелинейные волновые процессы в таких средах, не существует. К микронеоднородным сильно-нелинейным средам относятся многие поликристаллические металлы и горные породы (медь, цинк, свинец, гранит, известняк, мрамор, песчаник, магнезит и т. д.), зернистые среды (речной песок) и некоторые конструкционные материалы (бетон, цементный камень). Их высокая нелинейность обусловлена их различными микродефектами: трещинами, зернами, дислокациями, полостями и т.д.) При этом в низкочастотном диапазоне эти среды, как правило, проявляют гистерезисную нелинейность. Наиболее заметное проявление нелинейных свойств имеет место при относительно высоких амплитудах волн, что легко реализуется в высокодобротных резонаторах вблизи их резонансных частот [1, 2, 4, 5]. При гармоническом возбуждении резонаторов в них наблюдаются различные не-

линейные акустические эффекты (амплитудно-зависимые потери и сдвиг резонансных частот, а также генерация высших гармоник).

В разных микронеоднородных средах одни и те же нелинейные эффекты часто проявляются по-разному. Поэтому при проведении исследований нелинейных волновых процессов в таких средах одной из основных задач является установление амплитудных и частотных зависимостей нелинейных эффектов. Фундаментальная цель этих исследований связывается с выявлением механизмов акустической нелинейности и определением параметров нелинейности различных сред. Прикладной же направленностью подобных работ является создание нелинейных акустических методов диагностики микронеоднородных сред и материалов.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования и теоретического описания нелинейных волновых процессов, протекающие при гармоническом возбуждении продольных упругих волн в стержневом резонаторе из природного минерала – поликристаллического серого кварцита. При аналитическом описании наблюдаемых эффектов будем использовать феноменологические уравнения состояния содержащие гистерезисную нелинейность.

Гистерезисные уравнения состояния и амплитудно-зависимое внутреннее трение поликристаллов

При теоретическом описании нелинейных акустических волн в микронеоднородных твердых телах применяются гистерезисные уравнения состояния, т.е. зависимости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ гистерезисного типа (σ и ε – напряжение и деформация) [2, 4, 6-14]. В связи с этим в последнее время интенсивно развивается направление, в котором гистерезисные свойства твердых тел связываются с гипотетическими гистерезисными элементами среды – гистеронами [15, 16]. Природа гистеронов не связывается с какими-либо дефектами среды. В соответствующих работах предполагается, что среда состоит только из гистеронов, имеющих некоторое распределение по их параметрам, и на этой основе выводится ее микроскопическое уравнение состояния. Вполне естественно, что оно получается гистерезисным. Ранее магнитные гистероны были предложены для объяснения магнитных гистерезисов магнитных материалов [17, 18]. Однако физика магнитных и механических гистерезисов (для магнитных и упругих материалов) различна. Соответственно, аналогия, связанная с перенесением гистерезисных магнитных свойств магнитных материалов на гистерезисные механические (акустические) свойства упругих (немагнитных) материалов путем привлечения гипотетических механических гистеронов, представляется в своей основе, по меньшей мере, сомнительной. Поведение механического гистерона также представляется проблематичным: при сколь угодно малом превышении упругого напряжения некоторой конечной величины деформация гистерона стремится к бесконечности. Таким образом, полученное (на основе несуществующих механических гистеронов) гистерезисное уравнение состояния оказывается непригодным для адекватного описания деформирования реальных гистерезисных сред.

Для аналитического описания результатов экспериментальных исследований нелинейных волновых процессов в конкретном материале необходимо знание его феноменологического уравнения состояния, которое можно получить на основе анализа закономерностей этих процессов. Зная феноменологическое уравнение состояния конкретного материала, можно строить и его реологическую модель, и его микроскопическое уравнение, совпадающее по форме с феноменологическим.

Уравнение состояния нелинейной среды (с учетом ее линейной диссипации [4]) может быть представлено в виде (1):

$$\sigma(\varepsilon) = E[\varepsilon - f(\varepsilon)] + \alpha \rho \dot{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $f(\varepsilon)$ – нелинейная функция, $|f'_\varepsilon(\varepsilon)| \ll 1$, α – коэффициент линейной диссипации, ρ – плотность. Слагаемое $\alpha \rho \dot{\varepsilon}$ учитывает линейную диссипацию, характерную для одно-

родных сред [3] и оно определяет квадратичную зависимость линейного коэффициента поглощения волны (или линейную зависимость логарифмического декремента затухания $d = \pi/Q = \pi\alpha\Omega/C_0^2$ волны) от ее частоты Ω , где Q – добротность среды [19]. Для микронеоднородных сред, линейное диссипативное слагаемое может быть другим и, соответственно, эти зависимости также могут быть другими (часто, например, $d \sim Q^{-1} \approx \text{const}$ [19]) Однако, на результаты проведенных ниже аналитических расчетов нелинейных эффектов это обстоятельство не влияет, поскольку входящие в выражения для нелинейных эффектов значения коэффициентов α_p , для каждой резонансной частоты Ω_p резонатора, определяются экспериментально, по измерениям его добротности Q_p : $\alpha_p(\Omega_p) = C_0^2/\Omega_p Q_p$. Отметим также, что все параметры уравнения состояния (3) для конкретного материала определяются экспериментально: линейные параметры (модуль упругости E и коэффициент диссипации α) – по скорости распространения слабой волны и ее затуханию, а вид нелинейной функции $f(\varepsilon)$ и ее параметры – по нелинейным акустическим эффектам, возникающим при возбуждении интенсивной гармонической волны.

В нелинейной акустике имеют место два основных вида гистерезиса: неупругий и упругий [2, 4, 20]. Оба гистерезиса одинаково адекватно описывают амплитудно-зависимые потери и дефект модуля упругости. Тем не менее, они существенно отличаются друг от друга.

Для неупругого квадратичного гистерезиса (вообще говоря, несимметричного) функция $f(\varepsilon)$ в уравнении (1) имеет вид [20] (2):

$$f(\varepsilon) = \beta \varepsilon_m \varepsilon + \frac{1}{2} \begin{cases} \beta_1 \varepsilon^2 - \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} > 0; \\ -\beta_2 \varepsilon^2 + \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где ε_m – амплитуда деформации, $|\beta| \varepsilon_m \ll 1$, $|\beta_{1,2}| \varepsilon_m \ll 1$, $\beta_1 + \beta_2 \geq 0$, $|\beta_{1,2}| \gg 1$.

Здесь, первое слагаемое, отвечает за амплитудно-зависимый дефект модуля упругости, а второе – за амплитудно-зависимые потери и генерацию высших гармоник.

Для упругого гистерезиса функция $f(\varepsilon)$ имеет вид [9] (3):

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{n} \begin{cases} \gamma_1 \varepsilon^n, & \varepsilon \geq 0, \dot{\varepsilon} > 0; \\ (\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_m^{n-1} \varepsilon - \gamma_2 \varepsilon^n, & \varepsilon \geq 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ -\gamma_3 \varepsilon^n, & \varepsilon \leq 0, \dot{\varepsilon} < 0; \\ (-1)^n (\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_m^{n-1} \varepsilon + \gamma_4 \varepsilon^n, & \varepsilon \leq 0, \dot{\varepsilon} > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где n – целое число, $n > 1$, γ_{1-4} – параметры нелинейности, $\gamma_{1,3} + \gamma_{2,4} \geq 0$.

Отметим, что уравнения (1)-(3) адекватно описывают деформирование гистерезисных сред в области достаточно низких частот. С ростом частоты деформирования, гистерезисная нелинейность микронеоднородных сред уменьшаются из-за релаксации их дефектов [4, 21]. Причины проявления гистерезисных нелинейностей связываются с движением дислокаций и микропластичностью поликристаллов. При этом, механизмы упругого и неупругого гистерезисов, по-видимому, различны. Из-за их отличий, амплитудно-частотные зависимости нелинейных эффектов в средах с упругим и неупругим гистерезисами также различаются [20, 22]. Эти отличия можно выявить при экспериментальном исследовании эффектов амплитудно-зависимого внутреннего трения и генерации высших гармоник в акустическом резонаторе из гистерезисного материала [20, 22].

Схема экспериментальной установки

Исследование амплитудно-частотных зависимостей нелинейных эффектов проводилось в акустическом стержневом резонаторе из природной горной породы – серого поликристаллического кварцита. Длина стержня $L = 39.4 \times 10^{-2}$ м, его поперечное сечение представляло собой квадрат со стороной 1.4×10^{-2} м.

Серый кварцит – это природный минерал светло-серого цвета с характерным серебристым блеском. Он на 70-80 % состоит из кварца (SiO_2) и содержит примеси силикатов и алюмосиликатов, в виде полевого шпата, слюды и талька. Плотность кварцита – 2.68×10^3 кг/м³, его прочность на сжатие – 100-450 МПа. На рис.1 приведена фотография микроструктуры исследуемого образца. Видно, что материал обладает зернистой структурой, что свидетельствует о наличии в нем дефектов, в частности, дислокаций [23].

Схема экспериментальной установки показана на рис.2. К нижнему торцу стержня 1 приклеивался пьезокерамический излучатель накачки 2 – для возбуждения продольной низкочастотной стоячей гармонической волны. Другая сторона излучателя 2 приклеивалась к массивной металлической нагрузке 3. Для приема колебаний, к свободному (верхнему) торцу экспериментального образца приклеивался акселерометр 4. Таким образом, стержень 1 (вместе с излучателем 2 и нагрузкой 3) представлял собой акустический резонатор с почти жесткой (нижней) и мягкой (верхней) границами. Для первых продольных мод такого резонатора, его собственные частоты $F_p = \Omega_p / 2\pi$ определялись простым выражением $F_p \cong (2p - 1)C_0 / 4L$ (p – номер моды, $p = 1, 2, \dots$; C_0 – фазовая скорость продольной низкочастотной волны, которая, для первой моды составляла $C_0 \cong 4.8 \times 10^3$ м/с). Для такого резонатора, локальная амплитуда $\epsilon_m = \epsilon_m(x)$ деформации стоячей низкочастотной волны зависит от координаты x и определялась выражением: $\epsilon_m(x) \cong \epsilon_m |\cos K_p x|$, где $\epsilon_m = K_p U_1$ – амплитуда деформации в резонаторе; U_1 – амплитуда смещения волны на частоте накачки F_p , $K_p L = (2p - 1)\pi / 2$.

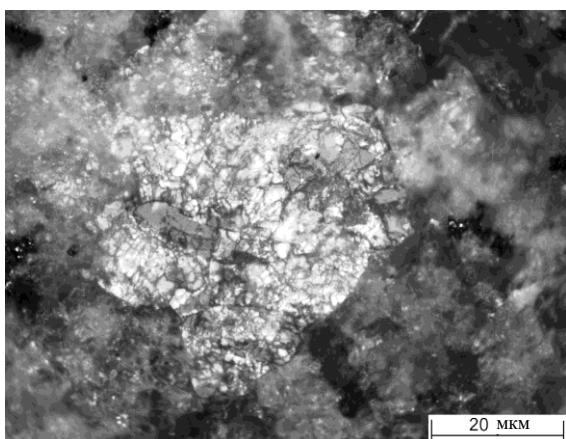


Рис. 1. Фотография микроструктуры кварцита

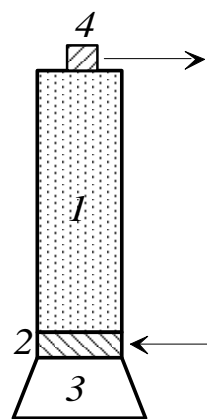


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – стержневой резонатор,
2 – излучатель накачки,
3 – массивная металлическая нагрузка,
4 – пьезокерамический акселерометр

Значения резонансных частот F_p и добротностей Q_p для рассматриваемых продольных мод экспериментального образца составляли, соответственно: $F_1 \cong 3060$ Гц, $F_2 \cong 8964$

Гц и $Q_1 \cong 236$, $Q_2 \cong 256$. Они определялись по максимуму амплитуды линейных колебаний резонатора и ширине $\Delta F_{0.71}$ его резонансной кривой на уровне $1/\sqrt{2} \cong 0.71$: $Q_p \cong F_p / \Delta F_{0.71}$. По резонансной частоте $F_1 \cong 3060$ для первой моды было определено, что $C_0 \cong 4.8 \times 10^3$ м/с.

Измерения проводились при комнатной температуре на прямом ходе, т.е., при увеличении амплитуды возбуждения рассматриваемой колебательной системы. Погрешности измерения амплитуд и частот колебаний и составляли, соответственно ± 0.05 дБ и ± 0.5 Гц.

Результаты измерений

В стержне 1, при помощи излучателя накачки 2 (рис. 2), возбуждались низкочастотные акустические колебания на частоте F , близкой к частоте F_p одной из первых двух его продольных мод ($p = 1; 2$). Определялись амплитудные зависимости нелинейных сдвигов резонансных частот $\Delta F_{nl} = F - F_p < 0$ и коэффициентов затухания μ_{nl} . Полученные зависимости представлены на рис. 3.

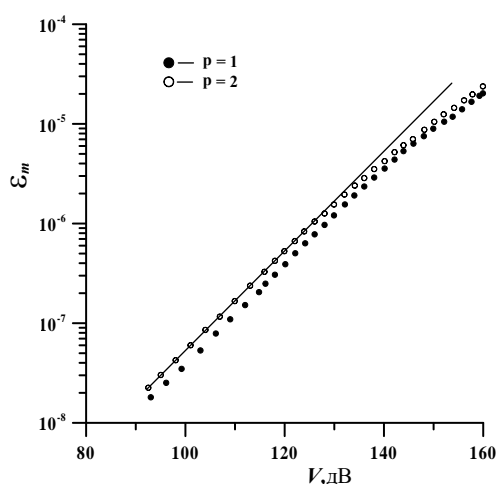


Рис. 3. Зависимости амплитуды ε_m (при резонансном возбуждении резонатора) от амплитуды электрического напряжения V на излучателе накачки (в дБ относительно 1 мкВ)
(прямая линия соответствует линейной зависимости ε_m от V)

Из рис. 3 видно, что при малых амплитудах V возбуждения ($\varepsilon_m < 10^{-6}$), зависимости $\varepsilon_m = \varepsilon_m(V)$ линейны, т.е. $\varepsilon_m \propto V$. Далее, при $\varepsilon_m > 10^{-6}$ они становятся нелинейными, что свидетельствует о проявлении амплитудно-зависимых потерь.

Графики для относительных амплитудно-зависимых сдвигов резонансных частот $|\Delta F_{nl} / F_p|$ и коэффициентов затухания μ_{nl} / μ_p (где $\mu_p = (\Omega_p Q_p)^{-1}$) представлены на рис. 4. Значения μ_{nl} / μ_p определялись по отклонению функции $\varepsilon_m = \varepsilon_m(V)$ от линейной зависимости $\varepsilon_m \propto V$ (рис. 3), проведенной через точки (V_1, ε_{m1}) , соответствующие малым амплитудам возбуждения экспериментального образца [4, 9] (4):

$$\frac{\mu_{nl}}{\mu_p} = \frac{\varepsilon_{m1}}{\varepsilon_m} \cdot \frac{V}{V_1} - 1. \quad (4)$$

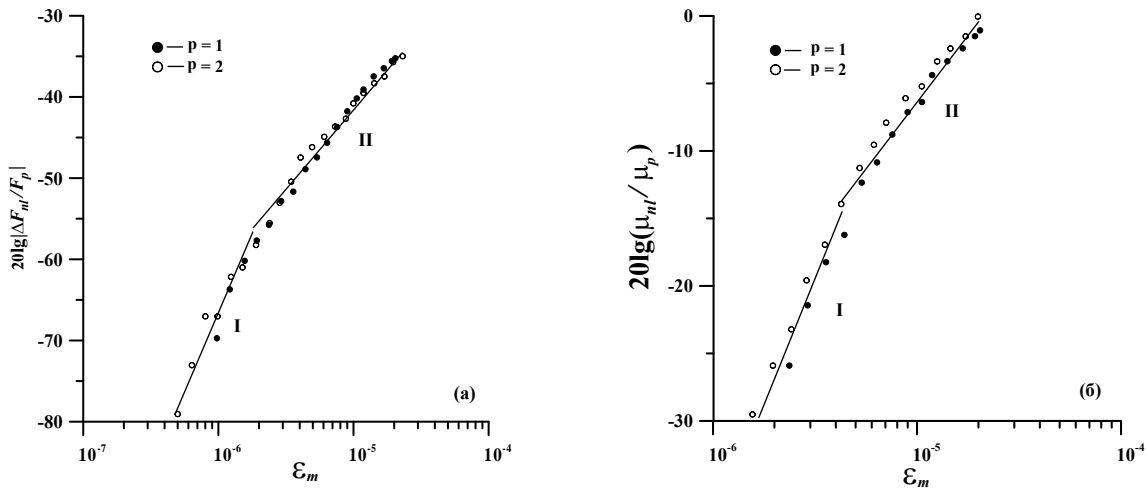


Рис. 4. Зависимости $|\Delta F_{nl}/F_p|$ (а) и μ_{nl}/μ_p (б) от амплитуды ε_m (в резонансе)

(прямые линии соответствуют зависимостям:

$$I - \Delta F_{nl}/F_p \propto \varepsilon_m^2, \mu_{nl}/\mu_p \propto \varepsilon_m^2; II - \Delta F_{nl}/F_p \propto \varepsilon_m, \mu_{nl}/\mu_p \propto \varepsilon_m)$$

Из рис. 4 видно, что в амплитудных зависимостях $|\Delta F_{nl}/F_p|$ и μ_{nl}/μ_p от ε_m отчетливо выделяются два характерных диапазона: первый (I) диапазон – $\varepsilon_m < \varepsilon^* \cong (2 \div 4) \cdot 10^{-6}$, в котором $\Delta F_{nl}/F_p \propto \varepsilon_m^2$, $\mu_{nl}/\mu_p \propto \varepsilon_m^2$, и второй (II) – $\varepsilon_m > \varepsilon^*$, где $\Delta F_{nl}/F_p \propto \varepsilon_m$, $\mu_{nl}/\mu_p \propto \varepsilon_m$. Тот факт, что в каждом диапазоне имеют место одинаковые амплитудные зависимости $|\Delta F_{nl}/F_p|$ и μ_{nl}/μ_p , свидетельствует о проявлении в материале гистерезисной степенной нелинейности с показателем степени n (при этом для первого $n = 3$, а для второго – $n = 2$). Из рис. 4 также видно, что амплитудные зависимости $|\Delta F_{nl}/F_p|$ и μ_{nl}/μ_p от ε_m для $p = 1; 2$ близки и не зависят от номера моды p , т.е., от частоты F_p возбуждения резонатора. Отметим, что независимые от частоты F_p зависимости $|\Delta F_{nl}/F_p|$ от ε_m наблюдались также для первых семи продольных мод в резонаторе из Berea sandstone [24]. В общем же случае, т.е., для более высоких мод резонатора (или частот) нелинейность микронеоднородных сред, в том числе, горных пород, зависит от частоты деформирования: с ростом частоты нелинейность микронеоднородных сред уменьшается из-за релаксации дефектов [4].

При $\varepsilon_m > 2 \cdot 10^{-6}$, т.е., при более сильном возбуждении резонатора, наблюдалась также генерация высших гармоник волны накачки, в частности, второй и третьей. Зависимости амплитуды смещения $U_2(L)$ свободного торца резонатора на частоте $2F$ и амплитуды деформации ε_3 резонатора на частоте $3F$ от ε_m на первой и второй модах приведены на рис. 5. Видно, что $U_2(L), \varepsilon_3 \propto \varepsilon_m^2$. Также видно, что здесь показатель степени $n = 2$ на единицу больше показателя в зависимостях $|\Delta F_{nl}/F_p|$ и μ_{nl}/μ_p от ε_m (рис. 4) в том же (втором) диапазоне. Отметим, что для амплитудно-зависимых потерь, дефекта модуля упругости, а также амплитуд $U_2(L)$ и ε_3 , именно такие зависимости и должны наблюдаться для нелинейных эффектов в средах с гистерезисной квадратичной нелинейностью [4, 7-9].

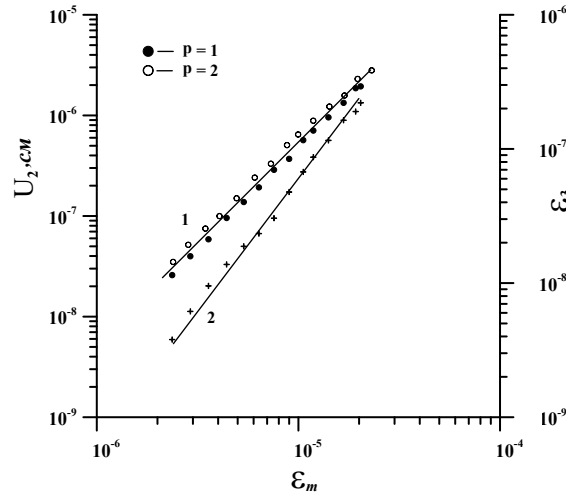


Рис. 5. Зависимости $U_2(L)$ на частоте $2F$ второй и ε_3 на частоте $3F$ от ε_m (в резонансе) (прямые линии (1) и (2) соответствуют зависимостям: $U_2(L), \varepsilon_3 \propto \varepsilon_m^2$)

Здесь различие показателей степеней в зависимостях μ_{nl}/μ_p и $|\Delta F_{nl}/F_p|$ от ε_m , в первом и во втором диапазонах, не связаны с проявлением нестационарности эффектов гистерезисного внутреннего трения [24] (или их «медленной динамики» [25]). Временная зависимость внутреннего трения поликристаллов обусловлена диффузионным движением примесных атомов вдоль дислокаций под действием упругой волны [23]. В экспериментах с кварцитом временная зависимость эффектов внутреннего трения была достаточно малой. При этом, реакция в характере изменения $|\Delta F_{nl}/F_p|$ от ε_m была безынерционной: изменение ε_m мгновенно приводило к изменению $|\Delta F_{nl}/F_p|$. В случае максимального возбуждения резонатора ($\varepsilon_m \cong 2 \cdot 10^{-5}$), изменение $|\Delta F_{nl}/F_p|$ в течение 45 мин не превышало $7 \cdot 10^{-4}$, при этом, во время проведения одного эксперимента около 20 мин – $\Delta F_{nl}/F_{1,2} \cong 1.8 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, максимальная относительная погрешность измерения $\Delta F_{nl}/F_p$, обусловленная нестационарностью (или временной зависимостью) амплитудно-зависимого внутреннего трения, не превышала 4%. Отсюда следует, что нестационарные эффекты «медленной динамики» внутреннего трения были значительно слабее эффектов безынерционной нелинейной динамики. Далее методом возмущений проводилось поэтапное теоретическое описание и анализ нелинейных эффектов и их амплитудных зависимостей в рамках гистерезисного уравнения состояния (3).

Уравнение продольных колебаний стержневого резонатора с гистерезисной нелинейностью

С целью проведения аналитического описания нелинейных эффектов в резонаторе, получим волновое уравнение для его продольных смещений $U(x, t)$ в результате подставки уравнения состояния (1) в уравнение движения $\rho U_{tt} = \sigma_x(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ [3] (с учетом геометрической дисперсии фазовой скорости) (5):

$$U_{tt} - C_0^2 U_{xx} = -C_0^2 [f(\varepsilon)]_x + \alpha U_{xxt} + \nu^2 r_0^2 [U_{tt} - C_t^2 U_{xx}]_{xx}. \quad (5)$$

Здесь использованы обозначения: $\varepsilon(x, t) = \partial U(x, t) / \partial x$, $r_0 = R_0 / \sqrt{2}$, ν – коэффициент Пуассона, C_t – скорость сдвиговой волны в безграничной среде, $\alpha = C_0^2 / \Omega_p Q_p$.

Согласно условиям эксперимента, стержень рассматривался как резонатор с граничными условиями в виде акустически жесткой ($x=0$) и акустически мягкой ($x=L$) границы, которые имеют вид (6):

$$U(x=0,t) = A_0 \sin \Omega t, \quad U_x(x=L,t) = 0, \quad (6)$$

где L – длина стержня, A_0 и Ω – амплитуда и частота возбуждения стержня.

Дисперсия акустических волн, так же, как и затухание, ограничивает интенсивность колебаний нелинейного резонатора на частотах высших гармоник, которые возникают в процессе гармонического возбуждения. Полагая в линеаризованном уравнении (5) $U(x,t) \propto \exp\{i[\Omega t - K(\Omega)x]\}$, определим дисперсионное соотношение. Далее, из граничных условий (6), определим собственные волновые числа K_p и резонансные частоты Ω_p резонатора в низкочастотном приближении (при условии что $\Omega/W \ll 1$) (7):

$$K(\Omega) = \frac{\Omega}{C_0} \left[1 + \left(\frac{\Omega}{W} \right)^2 \right], \quad K_p = \frac{(2p-1)\pi}{2L} = (2p-1)K_1, \quad \Omega_p = \frac{\pi C_0 (2p-1)}{2L} (1 - m_p), \quad (7)$$

где $W = \frac{2C_0}{v r_0} \sqrt{\frac{1+\nu}{1+2\nu}}$, $m_p = \left(\frac{\pi v r_0 (2p-1)}{4L} \right)^2 \frac{1+2\nu}{1+\nu} \ll 1$, p – номер моды, $p = 1, 2, 3, \dots$

Согласно проведенного анализа выражений (7): $2\Omega_p \neq \Omega_{2p}$, а $3\Omega_p \cong \Omega_{3p-1}$. Таким образом, в процессе возбуждения резонатора с жесткой и мягкой границами на частоте $\Omega \cong \Omega_p$, колебания на частоте $2\Omega \cong 2\Omega_p$ будут нерезонансными. При этом колебания на частоте $3\Omega \cong 3\Omega_p$, из-за слабой геометрической дисперсии, будут близкими к резонансным.

Анализ эффектов амплитудно-зависимого внутреннего трения

Выражение для резонансной кривой исследуемого образца имеет вид [4] (8):

$$\varepsilon_m = \frac{A_0 (\Omega_p / L)}{[(\delta - \delta_{nl})^2 + (\mu_p + \mu_{nl})^2 \Omega_p^4 / 4]^{1/2}}, \quad (8)$$

где $\delta_{nl} = 2\pi \Delta F_{nl}$ – нелинейный сдвиг резонансной частоты, μ_{nl} – нелинейные потери. Отметим, что как δ_{nl} , так и μ_{nl} зависят от параметров γ_i (3), которые в различных диапазонах деформации имеют разные значения: $n=3$ – при $\varepsilon_m < \varepsilon^*$, и $n=2$ – при $\varepsilon_m > \varepsilon^*$; $|\delta| \ll \Omega_p / p$; $\delta = \Omega - \Omega_p$.

Из выражения (8) получаем формулу для резонансной амплитуды ε_m (при $\delta - \delta_{nl} = 0$) (9):

$$\varepsilon_m = \frac{2A_0}{L} \frac{Q_p}{1 + \mu_{nl} / \mu_p}, \quad (9)$$

позволяющую вычислить относительный коэффициент нелинейного затухания μ_{nl} / μ_p .

При малых деформациях ($\varepsilon_m < \varepsilon^*$) нелинейный сдвиг резонансной частоты $\Delta F_{nl} / F_p$ и нелинейные потери μ_{nl} / μ_p определяются выражениями (10):

$$\Delta F_{nl} / F_p = -a_1 \varepsilon_m^2, \quad \mu_{nl} / \mu_p = b_1 Q_p \varepsilon_m^2, \quad (10)$$

здесь $a_1 = \frac{1}{32} \left[(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 + \gamma_4) + \frac{3}{4} (\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 + \gamma_4) \right]$, $b_1 = \frac{1}{16\pi} (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) > 0$.

Далее, сравнивая результаты измерений, представленные на рис. 4 с выражениями (10), определяем коэффициенты a_1 , b_1 и параметры $\gamma_1 - \gamma_3$, $\gamma_2 - \gamma_4$: $a_1 \cong 4.5 \cdot 10^8$, $b_1 \cong 4 \cdot 10^7$, $\gamma_1 - \gamma_3 \cong 9.3 \cdot 10^9$, $\gamma_2 - \gamma_4 \cong -7.3 \cdot 10^9$.

При более высоких значениях деформаций ($\varepsilon_m > \varepsilon^*$), выражения для $\Delta F_{nl}/F_p$ и μ_{nl}/μ_p , а также для амплитуд $U_2(L)$ и ε_3 колебаний на частотах второй и третьей гармоник имеют вид (11-13):

$$\Delta F_{nl}/F_p = -a_1 \varepsilon_m, \quad \mu_{nl}/\mu_p = b_1 Q_p \varepsilon_m, \quad (11)$$

$$U_2(x) = \frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{\pi(2p-1)} \varepsilon_m^2 L [\sin 2K_p x - 2K_p x \cos 2K_p x], \quad U_2(L) = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \varepsilon_m^2 L, \quad (12)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4\sqrt{a_3^2 + b_3^2} \Omega_p \varepsilon_m^2}{15\pi \{(\Omega_p/Q_{3p-1})^2 + 4[(1-q)\delta_{nl}(\varepsilon_m) + \Delta\Omega_{3p}/3]^2\}^{1/2}}, \quad (13)$$

здесь $q = \frac{36}{35\pi} \frac{a_0}{a_1}$, $a_0 = \frac{1}{2\pi} (\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_4) + \frac{1}{8} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4)$,

$$a_1 = \frac{4}{9\pi^2} (\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_4) + \frac{1}{6\pi} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4), \quad b_1 = \frac{2}{9\pi^2} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4) > 0,$$

$$a_2 = \frac{1}{64} (\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 + \gamma_4) + \frac{1}{24\pi} (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4), \quad b_2 = \frac{1}{48\pi} (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4),$$

$$a_3 = \frac{2}{15\pi} (\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_4), \quad b_3 = \frac{1}{30\pi} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4),$$

$$\Delta\Omega_{3p} = 3\Omega_p - \Omega_{3p-1}.$$

Сопоставляя полученные экспериментальные результаты (см. рис. 4) и выражения (11)–(13) определяем коэффициенты a_1 , b_1 , $\sqrt{a_2^2 + b_2^2}$, соответствующие им параметры $\gamma_1 + \gamma_3$, $\gamma_2 + \gamma_4$ и значения a_0 , q , $\sqrt{a_3^2 + b_3^2}$: $a_1 \cong 8.4 \cdot 10^2$, $b_1 \cong 2 \cdot 10^2$, $\gamma_1 + \gamma_3 \cong 8.6 \cdot 10^3$, $\gamma_2 + \gamma_4 \cong 3.5 \cdot 10^2$, $\sqrt{a_2^2 + b_2^2} \cong 1.1 \cdot 10^2$, $a_0 = 2.4 \cdot 10^3$, $q = 0.94$, $\sqrt{a_3^2 + b_3^2} \cong 3.6 \cdot 10^2$.

Из выражения (12) можно также определить эффективный параметр Γ_2 квадратичной упругой нелинейности кварцита (для диапазона деформаций $\varepsilon_m > \varepsilon^*$).

Принимая в уравнении (3): $n = 2$, $\gamma_1 + \gamma_2 = 0$, $\gamma_3 + \gamma_4 = 0$ и $\gamma_1 = -\gamma_3 = \Gamma_2$, получим выражение для гистерезисной функции, содержащей упругую квадратичную нелинейность: $f(\varepsilon) = \Gamma_2 \varepsilon^2 / 2$. Входящий в это выражение параметр Γ_2 имеет значение $\Gamma_2 = 16\sqrt{a_2^2 + b_2^2} \cong 1.7 \cdot 10^3$, что почти в 2 раза больше, чем для гранита [9]. При этом, параметр Γ_2 почти в 500 раз превышает значения аналогичного параметра определенного для однородных твердых тел [26].

Значение коэффициента $\sqrt{a_3^2 + b_3^2}$ можно определить и другим способом, используя амплитуду третьей гармоники (13): $\sqrt{a_3^2 + b_3^2} \cong 3.55 \cdot 10^2$. Близость значений коэффициента $\sqrt{a_3^2 + b_3^2}$, определенного с использованием различных подходов, свидетельствует о том, что уравнение состояния исследованного образца кварцита соответствует упругому гистерезису (3). Отметим, что при проведении аналогичного анализа в рамках неупругого гистерезиса (2), между этими коэффициентами, определенными разными способами, наблюдалось количественное несоответствие. Величина коэффициента $\sqrt{a_3^2 + b_3^2}$ определенная с использованием

амплитуды ε_3 составляла: $\sqrt{c_3^2 + d_3^2} \cong 3.3 \cdot 10^2$. Она заметно превышала величину $\sqrt{c_3^2 + d_3^2} \cong 1.9 \cdot 10^2$, определенную с помощью нелинейных потерь и сдвига резонансной частоты. Следовательно, для описания нелинейных акустических эффектов в кварците в рамках использованного подхода, неупругий гистерезис (2) оказывается непригодным. Если же при проведении аналогичного исследования использовать только вторую гармонику, то в кварците, как и во многих других твердых физических телах с поликристаллической структурой, для изучения нелинейных акустических эффектов вполне могут быть использованы оба гистерезиса.

Заключение

В результате проведенного анализа экспериментально установленных амплитудных и частотных зависимостей наблюдаемых нелинейных акустических эффектов было установлено, что для кварцита характерна акустическая нелинейность гистерезисного типа. Последняя определяется неаналитической степенной функцией деформации:

- показатель степени $n = 3$ при малых амплитудах деформации ($\varepsilon_m < \varepsilon^* \cong 3 \cdot 10^{-6}$);
- показатель степени $n = 2$ при амплитудах ($3 \cdot 10^{-6} < \varepsilon_m < 2 \cdot 10^{-5}$).

Таким образом, акустическая нелинейность кварцита оказалась гистерезисной, т.е. «неклассической», неаналитической и аномально высокой. Отметим, что аналогичными исключительно высокими нелинейными свойствами (качественно подобными, но с другими параметрами нелинейности) обладают многие твердые тела. Последнее обстоятельство создает возможность использования гистерезисных эффектов с целью осуществления для этих тел нелинейной акустической диагностики.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН по теме №0035-2019-0009 и поддержана РФФИ (грант N20-02-00215А).

Библиографический список

1. **Исакович, М.А.** Общая акустика / М.А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
2. **Guyet, R.A.** Nonlinear Mesoscopic Elasticity / R.A. Guyet, P.A. Johnson, Wiley-VCH, New York, 2009.
3. **Ландау, Л.Д.** Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 204 с.
4. **Назаров, В.Е.** Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах / В.Е. Назаров, А.В. Радостин. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. – 255 с.
5. **Riviere, J.** Pump and probe waves in dynamic acousto-elasticity: Comprehensive description and comparison with nonlinear elastic theory / J. Riviere, G. Renaud, R.A. Guyet, P.A. Johnson // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 114, – P. 054905-1-054905-5.
6. **Granato A., Lucke K.** Theory of mechanical damping due to dislocations / A. Granato, K. Lucke // Journal of Applied Physics. – 1956. – V. 27. – P. 583-593.
7. **Warren P. Mason** Application to quantum and solid state physics, in Physical Acoustics and Methods / P. Mason Warren, Academ. Press, New York, London, 1966.
8. **Назаров, В.Е.** Генерация гармоник при распространении упругих волн в твердых нелинейных средах / В.Е. Назаров, А.М. Сутин // Акустический журнал. – 1989. – Т. 35. – № 4. – С. 711-716.
9. **Зименков, С.В.** Нелинейные акустические эффекты в образцах горных пород / С.В. Зименков, В.Е. Назаров // Физика Земли. – 1993. – № 1. – С. 13-18.
10. **Назаров, В.Е.** Амплитудно-зависимое внутреннее трение свинца / В.Е. Назаров // ФММ. – 1999. – Т. 88. – № 4. – С. 82-90.
11. **Назаров, В.Е.** Об амплитудной зависимости внутреннего трения цинка / В.Е. Назаров // Акустический журнал. – 2000. – Т.46. – № 2. – С. 542-546.
12. **McCall, K.R.** Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials / K.R. McCall, R.A. Guyet // Journal of Geophysical Research. – 1994. – V. 99. – P. 23887-23897.

13. **Van Den, Abeele K.** Resonant bar simulations in media with localized damage / Abeele K Van Den., F. Schubert, V. Aleshin, F. Windels, J. Carmeliet // *Ultrasonics*. – 2004. – V. 42. – P. 1017-1024.
14. **Gusev, V.** Nonlinear bulk and surface shear acoustic waves in materials with hysteretic and endpoint memory / V. Gusev, C. Glorieux, W. Lauriks, J. Thoen // *Physical Letters A*. – 1997. – V. 232. – P. 77-86.
15. **McCall, K.R.** Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials / K.R. McCall, R.A. Guyer // *J.Geophys.Res.* – 1994. – V. 99. – P.23887-23897.
16. **McCall, K.R.** A new theoretical paradigm to describe hysteretic, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock / K.R. McCall, R.A. Guyer // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 1996. – V.3. – P.89-101.
17. **Preisach, F.** Uber die magnetische Nachwirkung / **F. Preisach** // *Z. Phys.* – 1935. – V.94. – P.277-302.
18. **Krasnoselskii, M.A.** Systems with hysteresis / M.A. Krasnoselskii, A.V. Pokrovskii, Springer, Berlin, 1989.
19. **Назаров В.Е., Радостин А.В.** Экспериментальное исследование эффектов амплитудно-зависимого внутреннего трения в резонаторе из песчаника / В.Е. Назаров, А.В. Радостин // *Акустический журнал*. – 2004. – Т. 50. – С. 524-532.
20. **Назаров, В.Е.** Упругие волны в средах с гистерезисной нелинейностью. Ч. 1 / В.Е. Назаров, А.В. Радостин, Л.А. Островский, И.А. Соустова // *Акустический журнал*. – 2003. – Т. 49. – С. 405-415.
21. **Назаров, В.Е.** Волновые процессы в микронеоднородных упругих средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией / В.Е. Назаров, А.В. Радостин // *Акустический журнал*. – 2005. – Т. 51. – С. 280–285.
22. **Назаров, В.Е.** Упругие волны в средах с гистерезисной нелинейностью. Ч. 2 / В.Е. Назаров, А.В. Радостин, Л.А. Островский, И.А. Соустова // *Акустический журнал*. – 2003. – Т. 49. – С. 529-534.
23. **Read, T.A.** The internal friction on single metal crystals / T.A. Read // *Physical Review*, 1940, V. 58.
24. **Takahashi, S.** Internal friction and critical stress of copper alloys / S. Takahashi // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 1956. – V. 11. – P. 1253-1261.
25. **Johnson, P.** Slow dynamic and anomalous nonlinear fast dynamic in diverse solids / P. Johnson, A. Sutin // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2005. – V. 117. – P. 124-130.
26. **Zarembo, L.K.** Nonlinear phenomena in the elastic wave propagation in solids / L.K. Zarembo, V.A. Krasilnikov // *Sov. Phys. Usp.* – 1970. – V.13. – P.778-797.

*Дата поступления
в редакцию: 06.07.2020*

V.E. Nazarov¹, A.B. Kolpakov²

HYSTERETIC PHENOMENA OF AMPLITUDE-DEPENDENT INTERNAL FRICTION IN A QARTZITE ACOUSTIC RESONATOR

Institute of applied physics of the Russian academy of sciences¹
Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod²

Purpose: Establishing a relationship between the macroscopic characteristics of solid-state materials and their's microstructures.

Design/methodology/approach: Experimental and theoretical studies of nonlinear acoustic effects (such as low-frequency amplitude-dependent losses, resonant frequency shifts, and generation of second and third harmonics) in a rod resonator made of a crystalline rock – quartzite.

Results: An analytical description of the observed phenomena has performed within the frameworks of the phenomenological equations of state that contain hysteretic nonlinearity. Comparison of experimental and analytical amplitude dependencies of the nonlinear phenomena allowed us to determine values of quartzite acoustic nonlinearities parameter.

Area of applicability: The obtained results may be useful for development of diagnostic methods.

Key words: amplitude-dependent internal friction, resonator, equation of state, quartzite, elastic and inelastic hysteresis.

УДК 004.415

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_53

Е.А. Рувинская, А.С. Епифанова, М.В. Кокоулина

ПЕРВАЯ ВЕРСИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ОКЕАНЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Создана система обработки натуральных измерений внутренних волн, позволяющая проводить экспресс-анализ исходной записи посредством статистической обработки (вычисление моментов и построение гистограмм для ординат смещения изотермы/изопикны, высот, крутизны, периода и амплитуды угла волнового склона выделенных волн с возможностью выравнивания известными теоретическими законами распределения (нормальное, логнормальное, Вейбулла, Рэлея); для проверки качества аппроксимации используется критерий хи-квадрат) и построения спектра записи с возможностью его сравнения с моделью Гаррета-Манка (для удобства можно также выборочно отметить на графике частоты основных приливных гармоник (полусуточных (M_2 , S_2 , N_2 , K_2) и суточных (P_1 , K_1 , O_1 , Q_1)). Пользователю доступны опции отображения спектров в линейном, логарифмическом и полулогарифмическом масштабе осей. Разработанный программный комплекс имеет графический интерфейс, созданный средствами GUI Matlab, и является прототипом информационной онлайн-системы, которую планируется создать для анализа временных рядов изотермы/изопикны в контексте исследования динамики внутренних волн в океане. Тестирование функционала программного комплекса проведено на данных измерений температуры, полученных в шельфовой зоне Японского моря и предоставленных сотрудниками ТОИ ДВО РАН.

Ключевые слова: система обработки данных, внутренние волны, натурные измерения, спектр Гаррета-Манка, приливные гармоники, инерционная частота, гистограмма, выравнивание, логнормальное распределение, распределение Вейбулла, распределение Рэлея.

Введение

Исследование внутренних волн в океане – одна из наиболее популярных и актуальных задач современной геофизики, попытки решения которой предпринимаются в рамках различных моделей и концепций [1-7]. Интерес к изучению этого явления как важнейшего механизма переноса энергии в океане обусловлен, в первую очередь, практическими задачами. В последние десятилетия появилось множество новых исследований, подтверждающих тот факт, что внутренние волны не в меньшей (а часто – в большей) степени, чем поверхностные, могут влиять как на морскую инфраструктуру (воздействовать на подводные части морских гидротехнических сооружений, в том числе, посредством усиления сосредоточенных нагрузок, изгибающих и крутящих моментов и натяжения заякоривающих узлов, а также изменения рельефа дна), так и на функционирование морских экосистем (влиять на биопродуктивность за счет перемешивания водных масс и перераспределения питательных веществ, индуцировать перенос примесей и загрязнений [8]. Одним из наиболее важных прикладных аспектов в этом направлении является оценка воздействия интенсивных внутренних волн на нефтедобывающие платформы различных типов [9-16]. Поскольку внутренние волны представляют серьезную опасность для подобных объектов (известны случаи смещения нефтяных платформ на 200 м в горизонтальном и 10 м в вертикальном направлении, а также двукратного увеличения натяжения якорных цепей спар-платформ [17]), все больше работ по этой тематике встречается и в специализированных журналах, посвященных проблемам морской инженерии, а также в трудах специализированных конференций: например, [18] – о влиянии внутренних волн на буровые установки, [19, 20] – моделирование воздействия внутренних волн на спар-платформы, [21] – на шельфовые терминалы по производству сжиженного газа (СПГ) и процессы выгрузки, [22] – на полупогружные плавучие буровые установки

(ППБУ) и др.) Таким образом, прикладные аспекты изучения динамики внутренних волн востребованы современной инженерной наукой.

В связи с прогрессом приборостроения, прикладной математики и методов дистанционного зондирования океана, с 1960-70-х гг. начинает появляться все больше и больше наблюдений интенсивных внутренних волн, В лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева создан электронный атлас для работы с базой данных наблюдений внутренних волн, в которой систематизирована информация из более чем 2 800 литературных источников, описывающих их зарегистрированные проявления (<https://lfnad.nntu.ru/igwatlas/>) [23, 24]. Параллельно с накоплением океанологических данных о динамике внутренних волн встает вопрос также и о возможности экспресс-анализа записей натуральных наблюдений (еще один проект, реализованный в нашей лаборатории, который может использоваться для численного моделирования динамики и экспресс-анализа параметров внутренних волн по данным океанологических атласов, описан в статьях [25, 26]). Информационно-аналитические системы, которые способны не только накапливать данные, но и предоставлять возможности для анализа этих данных, наиболее востребованы, и их появление является закономерным этапом на пути развития технологий в той или иной области знаний. Стоит отметить, что подобные системы активно разрабатываются, в том числе, в России, например, циклы работ ИВТ СО РАН и ИКИ РАН [27, 28] по обработке спутниковых изображений для решения задач мониторинга окружающей среды; работы ТОИ ДВО РАН (ресурсы <http://oias.poi.dvo.ru/> и <http://pacificinfo.ru> [29, 30] – океанографические ИАС для Дальневосточного региона) и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН – ЕСИМО).

В настоящей статье обсуждается создание прототипа системы обработки и анализа натуральных измерений внутренних волн, которая, в свою очередь станет первым этапом на пути создания информационной онлайн системы обработки и анализа натуральных измерений внутренних волн и индуцируемых ими явлений на основе облачных вычислений с открытым доступом. Такая аналитическая система содержит программные средства для обработки данных – спектрального и статистического анализа записей натуральных наблюдений внутренних волн (смещений заданного уровня плотности, либо скорости) с возможностью расширения функционала для анализа временных рядов в контексте исследования записей внутренних волн, полученных в ходе натуральных наблюдений в океане.

Аналитическая система обработки натуральных измерений внутренних волн

Интерфейс системы обработки и анализа натуральных измерений внутренних волн разработан с помощью GUI Matlab и предоставляет пользователю возможности для статистического и спектрального анализа данных и графического отображения результатов.

Главное окно комплекса представлено на рис. 1. Оно содержит четыре кнопки и поле для отображения исходной записи. Кнопка «Загрузить данные» отвечает за выбор файла с входными данными, которые представляют собой временной ряд (колебания изопикны (линии одинаковой плотности), либо изотермы (линии одинаковой температуры) во времени).

После загрузки входных данных, при нажатии кнопки «Построить», в графическом окне отображается исходная запись и появляется возможность выбора способа ее дальнейшей обработки.

Исходная запись сглаживается путем спектральной фильтрации шумов с периодом менее 1 мин. В дальнейшем планируется расширить блок фильтрации и добавить возможность выбора фильтра, либо отказа от предобработки данных.

Для тестирования программного комплекса использовалась запись, предоставленная сотрудниками лаборатории статистической гидроакустики ТОИ ДВО РАН, полученная в ходе экспедиции 2011 г. в осенний период (с 11 октября 2011 (18:30) по 20 октября (10:45) (частота дискретизации данных – 1 с)) в шельфовой зоне Японского моря с термогирлянд [31-

34]. Из вертикального распределения температуры во времени в точке установки датчиков была выделена одна изотерма, соответствующая 4 °С, для которой проводилась апробация алгоритмов разработанной аналитической системы. На рис. 1 в графическом окне представлен временной ряд смещения колебания изотермы.

При нажатии кнопки «Спектральный анализ» вызывается новое окно, содержащее функционал для спектрального анализа (рис. 2). В графическом поле отображается спектр исходного сигнала $S(f)$ (по умолчанию в линейном масштабе), полученный с помощью быстрого преобразования Фурье (дискретные спектральные амплитуды для дискретных значений временного ряда s_j определяются формулой (1):

$$S_k = S(f_k) = \frac{|\hat{S}_k|}{N}, \quad \hat{S}_k = \sum_{j=1}^N s_j \exp\left(-\frac{2\pi i}{N}(j-1)(k-1)\right), \quad (1)$$

где N – количество отсчетов s_j , $f_k = kF_s/N$ – значения частот (положительных), $F_s = 1/T_s$ – частота дискретизации и T_s – временной шаг между измерениями).

Программный комплекс позволяет изменять такие параметры, как масштаб осей (линейный, полулогарифмический и логарифмический), источник (тип) измерений (для аппроксимации спектром Гаррета-Манка) и приливные компоненты (для соотношения пиков спектра с частотами суточных и полусуточных приливов).



Рис. 1. Главное окно

Еще в 1970-х гг. Гаррет и Манк, проанализировав результаты натуральных наблюдений внутренних волн, сформулировали климатический спектр для «усредненных» океанских условий (модель GM) [35]. Он не зависит от волнообразующих факторов, показывая общие тенденции (не работает в районах акваторий с сильными течениями и топографическими особенностями). В экспериментальных работах при спектральном анализе волнового поля часто используется сравнение с полученным Гарретом и Манком законом, который претерпел различные модификации. Руководствуясь работой [36] (модель GM-76), мы используем уточненные спектральные модели вертикальных смещений для различных типов анализиру-

емых записей внутренних волн [37]: полученных с заякоренного бую («якорный» спектр) (2), либо с буксируемого судна («буксируемый» спектр) (3):

$$MS_{\zeta}(f, z) = \frac{2}{\pi} r \frac{f_{in}}{N(z)} \frac{(f^2 - f_{in}^2)^{1/2}}{f^3}, \quad (2)$$

$$TS_{\zeta}(k, z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 rt \frac{f_{in}}{N(z)} \left(\ln \frac{N(z)}{f_{in}} - \frac{N^2(z) - f_{in}^2}{2N^2(z)} \right) k^{-2}, \quad (3)$$

где все частоты (f , f_{in} и N) имеют размерность цикл/час, $f_{in} = 2 \Omega_E \sin \varphi$ – инерционная частота (Ω_E – частота вращения Земли, соответствующая периоду 24 ч, φ – географическая широта

точки наблюдений), $N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz}}$ – частота Вайсяля-Брента на горизонте z , g –

ускорение свободного падения, $\rho_0(z)$ – вертикальный профиль плотности морской воды, координата z направлена вниз, $z = 0$ соответствует поверхности моря. Плотность $\rho_0(z)$ была рассчитана по профилям температуры и солёности на основании международного уравнения состояния морской воды TEOS-10 (<http://www.teos-10.org/>). Параметры $r = E\hat{b}^2\hat{N}$ [$\text{м}^2\text{цикл/ч}$]

и $t = \frac{j}{2\hat{b}\hat{N}}$ [ч/цикл/м] могут варьироваться в зависимости от океанских условий. Величины E ,

\hat{N} , \hat{b} – безразмерный параметр, характеризующий энергию внутренних волн в «элементарном» столбе жидкости, масштаб частоты плавучести и вертикальный масштаб волновых движений (глубина стратифицированной жидкости) соответственно. Во многих задачах используются канонические значения этих параметров: $E = 2\pi 10^{-5}$; $\hat{b} = 1300$ [м]; $\hat{N} = 3$ [цикл/ч]. Однако, существуют процедуры для определения этих величин непосредственно из экспериментальных данных [38]. Параметр j – количество бароклинных мод (в этой модели обычно берется $j = 6$). Для выполнения аппроксимации в программном комплексе необходимо задать значение частоты Вайсяля-Брента. Можно также изменить параметры «по умолчанию»: \hat{b} , j , \hat{N} , E . Для спектра колебаний изотермы, полученного при измерениях с заякоренного бую, известно, что за исключением инерционной и приливных частот, он будет иметь непрерывный характер во всём диапазоне частот; спектральная плотность спадает по степенному закону с показателем степени от -1 до -4, а чаще от -2 до -3.

Одной из функций аналитической системы также является выбор приливных компонент: с помощью чекбоксов пользователь имеет возможность выбрать суточные и полусуточные приливные гармоники, которые отобразятся на графике полученного спектра, позволяя проверить наличие пиков на этих частотах (доступны $M2$ (лунный полусуточный, главная волна), $S2$ (солнечный полусуточный, главная волна), $N2$ (лунный полусуточный, большая эллиптическая волна), $K2$ (лунно-солнечный полусуточный, деклинационная волна); $P1$ (солнечный суточный, главная волна), $K1$ (лунно-солнечный суточный, деклинационная волна), $O1$ (лунный суточный, главная волна), $Q1$ (лунный суточный, эллиптическая волна)). На рис. 2 приведен спектр температурных колебаний и отмечены две приливные компоненты $M2$ и $K1$.

В главном окне (рис. 1) пользователь может выбрать также опцию «Статистический анализ», после чего будет вызвано новое окно (рис. 3), в графическом поле которого представлена гистограмма распределения ординат (по умолчанию). Гистограмма повторяемости ординат смещения изотермы позволяет получить общую картину диапазона изменчивости значений этой величины.

В разработанной системе обработки данных натуральных наблюдений внутренних волн кроме ординат исходного временного ряда можно также проанализировать такие параметры, как высоты волн, период, крутизна, амплитуда волнового склона. По выбранной характеристике будет построена гистограмма распределения. В классическом смысле крутизна волны

– это отношение высоты волны к её длине, а амплитуда угла волнового склона (локальная крутизна) есть максимальное значение угла в точках профиля волны. Однако, поскольку мы анализируем запись по времени (знаем период волны, а не длину), то для определения этих характеристик необходимо ввести безразмерные переменные, определяющие оси абсцисс и ординат: $t^* = t/T^*$, $z^* = z/H^*$, где t и z – значения времени записи и ординат изотермы соответственно, а T^* и H^* – модальные значения для логнормальных кривых, выравнивающих гистограммы высот и периодов волн. Высота волны оценивается как средняя величина между вершиной и подошвой волны, период каждой волны определяется как временной интервал между соседними минимумами залегания изолинии. Всего из сглаженной записи (сглаживание проводилось путем спектральной фильтрации шумов с периодом менее 1 мин) смещений изотермы 4 °С, рассматриваемой как запись нерегулярного волнения, было выделено 1046 волн, волны менее 0,5 м не учитывались. Для примера на рис. 3 приведена гистограмма повторяемости высот волн в записи смещения изотермы 4°С. Отметим, что высоты всех рассматриваемых волн лежат в диапазоне 0,5 – 10 м. Средняя высота волны составляет 1.6 м, среднеквадратическое отклонение высоты 1,12 м (под графиком выводится среднее значение и среднеквадратическое отклонение группированного статистического ряда).

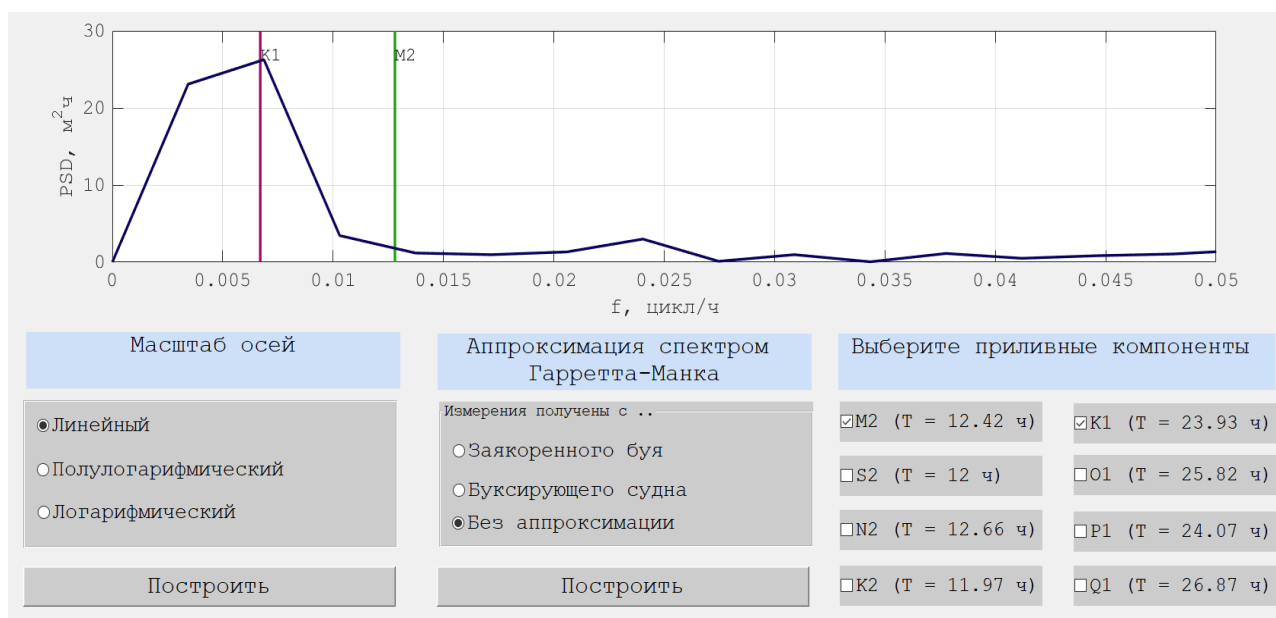


Рис. 2. Окно спектрального анализа

Кроме этого, имеется возможность аппроксимации экспериментальных данных известными теоретическими распределениями плотности вероятности. В нашем программном комплексе для выравнивания гистограммы можно выбрать нормальное распределение, логнормальное распределение, распределения Вейбулла и Рэлея [39]. Роль нормального распределения в теории вероятностей и математической статистике сложно переоценить: оно занимает уникальное положение в практических расчетах, при этом риск серьезных ошибок при его использовании невелик даже если натурные данные лучше описываются другими видами распределений. Это справедливо и при исследовании волновых процессов. Так, например, волновые ординаты (в том числе в контексте внутренних волн) часто неплохо описываются нормальным законом распределения [40]. Мы используем следующую форму нормального закона (4):

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где в качестве оценки μ выступает среднее выборочное, а в качестве оценки σ - квадратный корень из выборочной дисперсии (более подробно об истории применения нормального закона и об оценивании его параметров можно прочитать, например, в [39]).

Еще одним часто используемым непрерывным и асимметричным «колоколообразным» законом распределения является логнормальный закон (5):

$$f_2(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x/\zeta)^2}{2\delta^2}}, \quad (5)$$

где параметры ζ и δ (безразмерный) оцениваются из исходных статистических данных (см. более подробно [39]). Это одно из наиболее часто применяемых распределений (наравне с распределением Вейбулла и Рэля) при обработке волновых записей и анализе распределений таких параметров, как высоты волн [41-43]. Так, в качестве примера использования логнормального закона при анализе параметров внутренних волн можно привести следующие результаты: в нашей статье [44] было показано, что высоты и периоды внутренних волн по данным из Японского моря удовлетворяют логнормальному закону; в статье [45], где анализировались записи из Белого и Баренцева морей, также для аппроксимации гистограммы высот волн используется логнормальная кривая.

Двухпараметрическое семейство кривых Вейбулла (которое по своей сути является степенным преобразованием экспоненциального закона) имеет вид (6):

$$f_3(x) = \frac{c}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c}, \quad (6)$$

где c – параметр формы, который также называют наклоном Вейбулла; безразмерная величина ($c=1$ – экспоненциальный случай), α – параметр масштаба, который имеет ту же единицу измерения, что и величина x (при увеличении только этого параметра кривая растягивается вправо вдоль оси абсцисс, а ее высота уменьшается; при уменьшении α кривая «сжимается» влево, а ее высота увеличивается).

Частным случаем распределения Вейбулла с параметрами $c = 2$ и $\alpha = \sqrt{2} b$ является распределение Рэля:

$$f_4(x) = \frac{x}{b^2} e^{-\frac{x^2}{2b^2}}, \quad (7)$$

где b – параметр распределения Рэля, является модой этого распределения (имеет размерность x). Выбор перечисленных законов распределения обусловлен частотой их применения к анализу характеристик волновых процессов. Аппроксимация гистограммы производится средствами библиотеки Matlab dfittool.

Также гистограмма может быть построена без выравнивания теоретическим законом распределения. При аппроксимации в окне слева отображаются значения выборочного среднего и среднеквадратического отклонения для сгруппированного ряда, а также значения параметров кривой распределения (справа). Проверяется критерий Пирсона, и выводятся значения хи-квадрат и критическое значение, по которым можно судить насколько хорошо теоретическая кривая описывает исходные данные [39].

Для модельного примера гистограмма высот хорошо аппроксимируется теоретическим логнормальным законом распределения с плотностью вероятности (5) с параметрами $\mu = 0.27$ м, $\sigma = 0.63$ м для высот волн H .

В дальнейшем планируется также добавить в комплекс блок с функционалом для прогнозирования ожидаемых высот волн на основании анализируемых записей [44, 46]. Хотя прогноз, выполненный по «коротким» записям (несколько десятков часов наблюдений) должен уточняться, в акваториях со сложными климатическими условиями он оправдан [45, 47], поскольку сложно обеспечить получение действительно длительных записей.

Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет проводить экспресс-анализ экспериментальных данных, представляющих собой запись изотермы (изопикны), в контексте исследования внутренних волн.

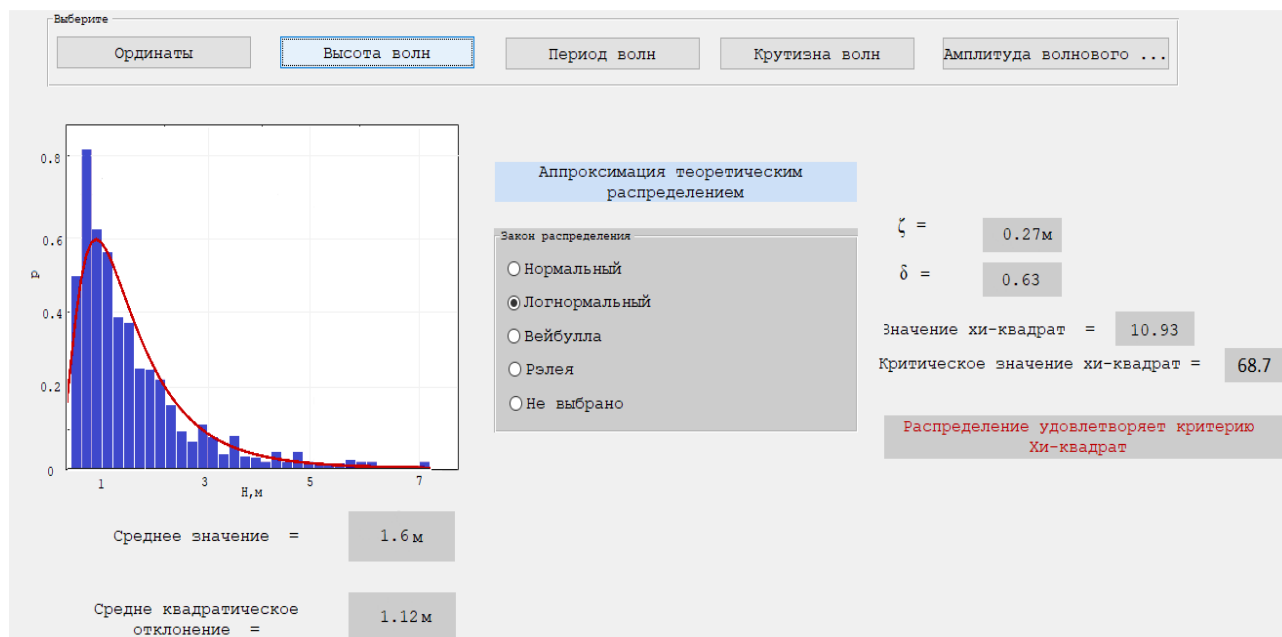


Рис. 3. Окно статистического анализа. Логнормальный закон распределения

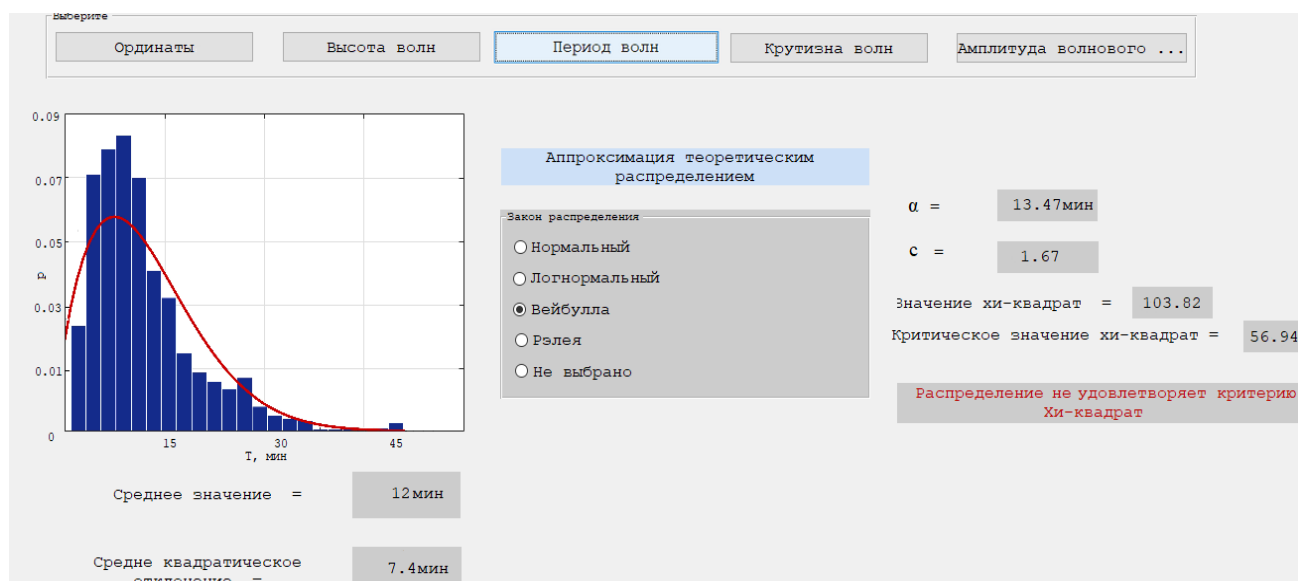


Рис. 4. Окно статистического анализа. Закон распределения Вейбулла

Заключение

В настоящей работе с использованием библиотек Matlab разработана первая версия системы обработки и анализа натурных наблюдений внутренних волн в океане с графическим интерфейсом. Программный комплекс предоставляет возможности статистического анализа временных рядов, а именно: построение гистограммы и ее выравнивание с помощью известных теоретических законов распределения, вычисление моментов ряда, а также проверка критерия хи-квадрат. Пользователь может провести статистический анализ как орди-

нат исходной записи изотермы (изопикны), так и высот выделенных из записи волн, их периодов, крутизны и амплитуды волнового склона. Функционал вкладки спектрального анализа позволяет строить спектр записи в различных вариантах отображения, а также для сравнения наносить на график частоты основных приливных компонент. Доступна также опция сравнения спектра с моделью Гаррета-Манка заякоренного и буксируемого типа. Разработанный программный комплекс является прототипом информационной онлайн системы по обработке натуральных данных внутренних волн в океане. Планируется расширить функционал системы за счет добавления различных опций фильтрации временных рядов, вкладки, предоставляющей возможности вейвлет-анализа, а также оценок воздействия на дно и сооружения в контексте динамики внутренних волн.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2485.2020.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1225.2019.5).

Библиографический список

1. **Kurkina, O.E.** Huge internal waves in the vicinity of the Spitsbergen island (Barents Sea) / O.E. Kurkina, T.G. Talipova // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2011. – V. 11. – № 3. – P. 981-986.
2. **Zahibo, N.** Strongly nonlinear steepening of long interfacial waves / N. Zahibo, A. Slunyaev, T. Talipova, E. Pelinovsky, O. Polukhina, A. Kurkin // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2007. – V. 14. – № 3. – P. 247-256.
3. **Куркина, О.Е.** Динамика солитонов неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега-де Вриза / О.Е. Куркина, А.А. Куркин, Е.А. Рувинская, Е.Н. Пелиновский, Т. Соомере // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2012. – Т. 95. – № 1-2. – С. 98-103.
4. **Талипова, Т. Г.** Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т. Г. Талипова, Е.Н Пелиновский, А.А. Куркин, О.Е. Куркина // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 714-722.
5. **Rouvinskaya, E.** Transformation of internal breathers in the idealised shelf sea conditions / T. Talipova, O. Kurkina, D. Tyugin, T. Soomere // *Continental Shelf Research*. – 2015. – V. 110. – P. 60-71.
6. **Kurkina, O.E.** Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid / O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, E.A. Rouvinskaya, T. Soomere // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2015. – V. 22. – № 2. – P. 117-132.
7. **Kurkina, O.** Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin / O. Kurkina, E. Rouvinskaya, T. Talipova, T. Soomere // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2017. – V. 185. – P. 44-54.
8. **Woodson, C.B.** The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems // *Annual review of marine science*. – 2018. – V. 10. – P. 421-441.
9. **Chakrabarti, S.** *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)* / S. Chakrabarti. – Elsevier. – 2005.
10. **Cai, S.** A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylindrical piles / S. Cai, X. Long, Z. Gan // *Ocean Engineering*. – 2003. – V. 30. – № 5. – P. 673-689.
11. **Cai, S.** Forces and torques exerted by internal solitons in shear flows on cylindrical piles / S. Cai, X. Long, S. Wang // *Applied Ocean Research*. – 2008. – V. 30. – № 1. – P. 72-77.
12. **Osborne, A.R.** *Nonlinear ocean wave and the inverse scattering transform* // *Scattering*. – Academic Press, 2002. – P. 637-666.
13. **Song, Z.J.** Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses / Z.J. Song, B. Teng, Y. Gou, L. Lu, Z.M. Shi, Y. Xiao, Y. Qu // *Applied Ocean Research*. – 2011. – V. 33. – № 2. – P. 120-129.
14. **Si, Z.** A numerical simulation of shear forces and torques exerted by large-amplitude internal solitary waves on a rigid pile in South China Sea / Z. Si, Y. Zhang, Z. Fan // *Applied Ocean Research*. – 2012. – V. 37. – P. 127-132.

15. **Xie, J.** Strongly nonlinear internal soliton load on a small vertical circular cylinder in two-layer fluids / J. Xie, Y. Jian, L. Yang // *Applied mathematical modelling*. – 2010. – V. 34. – № 8. – P. 2089-2101.
16. **Xie, J.** A numerical study of the load on cylindrical piles exerted by internal solitary waves / J. Xie, J. Xu, S. Cai // *Journal of Fluids and Structures*. – 2011. – V. 27. – № 8. – P. 1252-1261.
17. Osborne, A.R. The influence of internal waves on deep-water drilling / A. R. Osborne, T.L. Burch, R.I. Scarlet // *Journal of Petroleum Technology*. – 1978. – V. 30. – №10. –P. 1497-1504.
18. **Kurup, N.V.** Study of nonlinear internal waves and impact on offshore drilling units / N.V. Kurup, S. Shi, Z. Shi, W. Miao, L. Jiang // *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. – 2011. – V. 44335. – P. 831-840.
19. **Sun, M.** A new concept of spar in deep water and its hydrodynamic performance under internal wave / M. Sun, W. Huang // *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. – International Society of Offshore and Polar Engineers. – 2012. – P.975-982.
20. **Kurup, N.V.** Numerical modeling of internal waves within a coupled analysis framework and their influence on spar platforms / N.V. Kurup, S. Shi, L. Jiang, M.N. Kim // *Ocean Systems Engineering*. – 2015. – V. 5. – № 4. – P. 261-277.
21. **Xu, W.** Internal wave soliton passage simulation during offloading / W. Xu, Y. Li, A. Voogt // *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. – 2013. – V. 55393. – P. V005T06A026.
22. **Wei, J.** Maximum Offset for the Emergency Disengagement and Control of the Deep water Semi-Submersible Platform in Internal Wave // *Ocean Engineering Equipment & Technology*. – 2017. – V. 4. – P. 29-36.
23. **Епифанова, А.С.** База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А.С. Епифанова, А.В. Рыбин, Т.Е. Моисеенко, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, Д.Ю. Тюгин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2019. – Т. 35. – № 4. – С. 395–403. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-4-395-403.
24. **Епифанова, А.С.** О разработке цифрового атласа наблюдений внутренних волн в мировом океане / А.С. Епифанова, А.А. Куркин, О.Е. Куркина, Т.Е. Моисеенко, А.В. Рыбин // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2019. – № 4. – С.17-26.
25. **Тюгин, Д.Ю.** Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане / Д.Ю. Тюгин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4, – № 2. – С. 32-44.
26. **Тюгин, Д.Ю.** Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 / Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, О.Е. Куркина // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 89-95.
27. **Шокин, Ю.И.** Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды / Ю.И. Шокин, Н.Н. Добрецов, Е.А. Мамаш, В.А. Кихтенко, П.В. Воронина, В.В. Смирнов, Д.Л. Чубаров // *Вычислительные технологии*. – 2015. – Т. 20. – № 5. – С. 157-174.
28. **Лупян, Е.А.** Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян, М.А. Бурцев, И.В. Балашов, С.А. Барталев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, О.А. Суднева, И.Г. Сычугов, В.А. Толпин, И.А. Уваров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263-284.
29. **Ростов, И.Д.** Базы данных и информационные системы по океанографии ТОИ ДВО РАН для поддержки научных исследований и морской деятельности в ДВ регионе / И.Д. Ростов, А.А. Пан, В.И. Ростов и др. // *Вест. ДВО РАН*. – 2007. – № 4. – С. 85-95.
30. **Ростов, И.Д.** Информационная поддержка научных исследований и комплексного управления прибрежной зоной России в Японском море / И.Д. Ростов, Н.И. Рудых, В.И. Ростов и др. // *Вест. ДВО РАН*. – 2011. – № 6. – С. 89-93.
31. **Ярошук, И.О.** Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря / И.О. Ярошук, А.П. Леонтьев, А.В. Кошелева, А.Н. Самченко, А.А. Пивоваров, Ф.Ф. Храпченков, А.Н. Швырев, Е.И. Ярошук // *Подводные исследования и робототехника*. – 2013. – № 1(15). – С. 37-44.
32. **Ярошук, И.О.** Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря / И.О. Ярошук, А.П. Леонтьев, А.В. Кошелева, А.Н. Самченко, А.А. Пивоваров, Ф.Ф. Храп-

- ченков, А.Н. Швырев, Е.И. Ярошук // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1. – С. 37-44.
33. **Yaroshchuk, I.O.** On intense internal waves in the coastal zone of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan) / I.O. Yaroshchuk, A.P. Leont'ev, A.V. Kosheleva, A.A. Pivovarov, A.N. Samchenko, D.V. Stepanov, A.N. Shvyryov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – V. 41. – № 9. – P. 629-634. DOI: 10.3103/s1068373916090053.
34. **Samchenko, A.N.** Internal gravity waves in the coastal zone of the Sea of Japan according to the natural observations / A.N. Samchenko, I.O. Yaroshchuk, A.V. Kosheleva // Regional Studies in Marine Science. – 2018. – V. 18. – P. 156-160.
35. **Garrett, C.** Space-time scales of internal waves: A progress report / C. Garrett, W. Munk // Journal of Geophysical Research. – 1975. – V. 80. – № 3. – P. 291-297.
36. **Desaubies, Y.J.F.** Analytical representation of internal wave spectra / Y.J.F. Desaubies // Journal of Physical Oceanography. – 1976. – V. 6. – № 6. – P. 976-981.
37. **Morozov, E.G.** Oceanic Internal Tides. Observations, Analysis, and Modeling / E.G. Morozov // Springer International Publishing. 2018. – V. 10. – P. 978-3-319-73159-9. DOI: 10.1007/978-3-319-73159-9.
38. **Levine, M.D.** A modification of the Garrett–Munk internal wave spectrum / M.D. Levine // Journal of physical oceanography. – 2002. – V. 32. – № 11. – P. 3166-3181.
39. **Джонсон, Н.Л.** Одномерные непрерывные распределения. Часть 1. / Н.Л. Джонсон, С. Коц, Н. Балкришнан // Москва: Бином. Лаборатория знаний. – 2010. – С. 703.
40. **Миропольский, Ю.З.** Динамика внутренних гравитационных волн в океане / Ю.З. Миропольский. – Л.: Гидрометеиздат. – 1981. – С. 302.
41. Guide to Wave Analysis and Forecasting // World Meteorological Organization (WMO): Geneva, Switzerland. – 1998. – V. 1998. – P. 101-119.
42. **Tayfun, M. A.** Distributions of wave steepness and surf parameter / M.A. Tayfun // Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. – 2006. – V. 132. – № 1. – P. 1-9.
43. **Kim, C. H.** Nonlinear waves and offshore structures / C.H. Kim // World scientific. – 2008. – V. 27. – P. 12-53.
44. **Kokoulina, M.V.** Statistics of field data on internal waves» / M.V. Kokoulina, O.E. Kurkina, E.A. Ruvinskaya, A.A. Kurkin, A.R. Giniyatullin // The Fourteenth MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation. – 2019. –P. 733-743.
45. **Свергун, Е.И.** Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований / Е.И. Свергун, А.В. Зимин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2017. – Т. 10. – № 2. – С. 13-19.
46. **Кокоулина, М.В.** Вероятностные характеристики интенсивных короткопериодных внутренних волн в Японском море / М.В. Кокоулина, О.Е. Куркина, Е.А. Рувинская, А.А. Куркин // Морской гидрофизический журнал. – 2020.
47. **Зимин, А.В.** Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое / А.В. Зимин, Е.И. Свергун // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. –2018. – Т. 11. – № 2. – С. 66-72.

*Дата поступления
в редакцию: 26.07.2020*

E.A. Rouvinskaya, A.S. Epifanova, M.V. Kokoulina

**THE FIRST VERSION OF THE INFORMATION SYSTEM FOR PROCESSING
AND ANALYSIS OF DATA OF INTERNAL WAVES' MEASUREMENTS IN THE OCEAN**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The aim of the work is to create a system for processing field measurements of internal waves by means of statistical analysis (calculation of statistical moments and construction of histograms for ordinates of isotherm / isopycnal displacement, heights, steepness, period and amplitude of the wave slope angle of the identified waves with the possibility of approximation with the known theoretical distribution laws (normal, lognormal, Weibull, Rayleigh); the chi-square test is used to check the quality of the approximation) and the construction of the spectrum with the possibility of comparing it with the Garrett-Munk model (for convenience, one can also selectively mark the frequencies of the fundamental tidal harmonics (semidiurnal (M2, S2, N2, K2) and diurnal (P1, K1, O1, Q1))).The user has access to options for displaying spectra in a linear, logarithmic and semi-logarithmic scale of the axes.

Design/methodology/approach: The developed software package has a graphical interface, created by GUI Matlab. The functional testing of the software package was carried out on the temperature measurement data obtained in the shelf zone of the Sea of Japan and provided by the staff of the POI FEB RAS.

Findings: It is a prototype of the online information system, which we are planning to create on its basis for the analysis of isotherm / isopycnal time series in the context of studying the dynamics of internal waves in the ocean.

Originality/value: Such system can be successfully used for the express analysis of experimental data of internal waves' measurements.

Key words: data processing system, internal waves, field measurements, Garrett-Munk spectrum, tidal harmonics, inertial frequency, histogram, lognormal distribution, Weibull distribution, Rayleigh distribution.

УДК 004.021, 65.012.26

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_64

А.Н. Санников, М.А. Степаненко, В.И. Голованов, Т.И. Балашова, С.Н. Капранов

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОВАРОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА ЕЕ ОБЪЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева

Представлена новая постановка задачи функционирования товаропроводящей сети, приведены методы оптимального распределения продукции и внедрения мер планово-предупредительных ремонтов в процесс моделирования, способствующие повышению устойчивости работоспособности сети. Выполнено тестирование производительности и нагрузочное тестирование рассматриваемых алгоритмов, произведен сравнительный анализ алгоритмов. Предложены рекомендации по использованию рассмотренных методов при моделировании функционирования товаропроводящих сетей.

Ключевые слова: логистика, товаропроводящая сеть, устойчивость сети, управление цепями поставок, планово-предупредительный ремонт.

Введение

В настоящее время в России в условиях становления цифровой экономики происходит активное внедрение автоматизированных систем при автоматизации основных бизнес-процессов компаний. Вместе с тем, бурное развитие получила транспортно-логистическая функция, основной задачей которой является управление цепями поставок, предполагающее улучшение качества обслуживания потребителей, минимизацию расходной части предприятия, увеличение прибыли и рациональное распределение произведенной продукции.

Наиболее часто используемой схемой управления цепями поставок является распространенная в мире логистическая концепция «just in time» или «точно в срок», согласно которой поставка необходимого товара потребителю осуществляется в строго отведенное время. Таким образом, проблемы обеспечения бесперебойных поставок товара и удовлетворение потребительского спроса являются одними из главных в механизме управления цепями поставок «just in time».

Цель работы заключается в оптимизации распределения произведенной продукции при введении в производственный процесс планово-предупредительного ремонта, позволяющего проводить профилактические меры, которые сводят к минимуму риск внепланового выхода оборудования из строя.

Объект исследования

Товаропроводящая сеть (ТПС) – это совокупность хозяйствующих субъектов, располагающихся на полигоне товарного обслуживания, находящихся в определенных отношениях и связях между собой, имеющих развитые коммуникации, обеспечивающих эффективное взаимодействие между поставщиками, перевозчиками и потребителями товарной продукции и услуг в соответствии с их потребностями [1].

Товаропроводящая сеть представлена в виде ориентированного графа $G=(V,E)$ без контуров и петель [2], построенного на множестве вершин $V=\{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{ij}\}$ и ребер $E=\{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{ij}\}$. Каждой вершине графа соответствует узел сети одного из трех видов: v_{1j} – производитель ($i=1$), v_{2j} – складские помещения ($i=2$) и v_{3j} – потребитель ($i=3$). Дуги графа – маршруты транспортировки продукции между узлами сети.

Графовая визуализация товаропроводящей сети, имеющая пять пунктов производства, шесть складов и пять пунктов потребления, представлена на рис. 1.

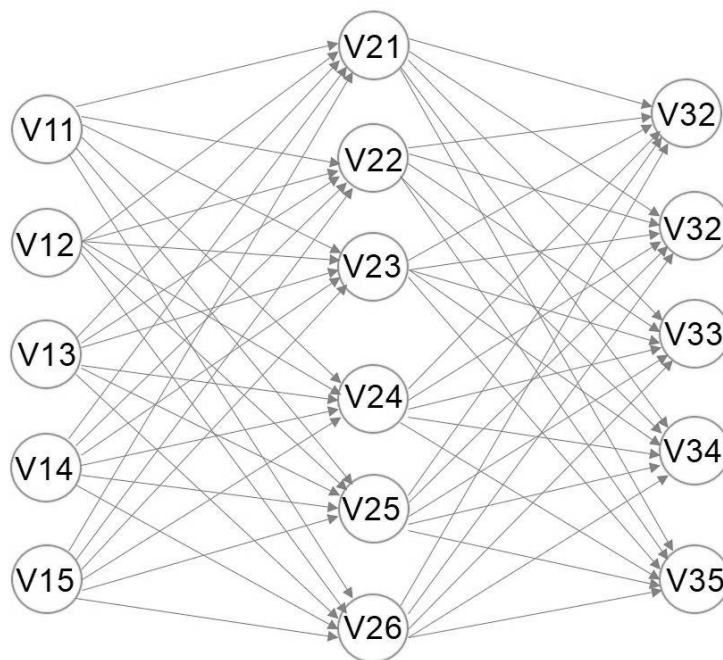


Рис. 1. Визуализация товаропроводящей сети

Постановка задачи

Функционирование сети, представленной на рис. 1, носит динамический характер и происходит в дискретные моменты времени, разбитые на такты. Такт – единица времени, в течение которого выполняется следующий алгоритм.

1. Производство продукции на j -ом пункте V_{1j} согласно функции производства.
2. Произведенная продукция распределяется по складским помещениям по маршрутам транспортировки.
3. Продукция со складских помещений распределяется по пунктам потребления в соответствии с функцией потребления.

Цель моделирования – определить оптимальные значения объемов производства товаров, при котором ТПС будет находиться в устойчивом (работоспособном) состоянии. Для минимизации выхода из строя компонентов сети используется система планово-предупредительных ремонтов (ППР) [3].

Для внедрения системы планово-предупредительного ремонта в моделирование работы ТПС, необходимо составить бинарную матрицу $repair$ (1), которая будет определять участие j -ого пункта производства в профилактических мерах на текущем такте.

Элемент матрицы

$$repair[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{– в случае участия в ППР} \\ 0 & \text{– в случае работы пункта производства в штатном режиме} \end{cases} \quad i = \overline{1..n}, j = \overline{1..m}$$

Матрица для товаропроводящей сети, представленной на рис. 1, в которой предусмотрены профилактические меры пунктов производства V_{12} на четвертом, пятом, шестом и седьмом тактах и V_{15} на втором, третьем и четвертом тактах соответственно, примет следующий вид (1):

$$repair = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ограничениями в данной задаче будут выступать:

1. Время выполнения ППР, которое рассчитывается по формуле (2):

$$\sum_{j=1}^n t_j b_j \leq T \quad (2)$$

где t_j – время, за которое происходит ППР j -ого пункта производства,
 b_j – определяет принадлежность пункта производства к ремонту, $b_j \in \{0,1\}$,
 T – плановое время ремонта.

2. Переполняемость складов, которая рассчитывается по формуле (3):

$$Val_i \leq Val_{\max i} \quad (3)$$

где Val_i – вместимость i -ого склада, $i \in 1..n$

Алгоритмы моделирования

Для моделирования функционирования товаропроводящей сети были последовательно использованы два алгоритма: двухэтапная транспортная задача и уровневый алгоритм заполняемости складских помещений.

Двухэтапная транспортная задача – частный случай классической транспортной задачи об оптимальном плане перевозок продукта из пункта производства в пункт потребления. Ее целью является доставка продукции в определенное время и место при минимальных совокупных затратах на трудовые, материальные и финансовые ресурсы [4]. Описание алгоритма двухэтапной транспортной задачи [5] имеет следующий вид.

Пусть имеется m пунктов производства продукции, при этом известны объемы производства a_i в каждом из пунктов. Имеется s пунктов складирования продукции с максимально возможными объемами хранилища q_k . Имеются также n пунктов потребления готовой продукции с объемами потребностей b_j . Кроме того, известны:

C_{ik}^1 – затраты на производство единицы продукции в i -ом пункте производства и ее транспортировку в k -ый склад;

C_{kj}^2 – затраты на переработку единицы продукции в k -ом складе и ее транспортировку в j -ый пункт потребления.

Требуется определить объемы переработки продукции в промежуточных пунктах (при условии $\sum_{k=1}^s q_k > \sum_{i=1}^m a_i$) и определить план перевозок из пунктов производства в пункты потребления через складские помещения (из i -ых в k -ые, а из k -ых в j -ые) при условии, что общие издержки на производство, переработку и транспортировку были минимальными. Целевая функция и ограничения задачи представлены в системе (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s C_{ik}^1 X_{ik}^1 + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n C_{kj}^2 X_{kj}^2 \rightarrow \min \\ \sum_{k=1}^s X_{ik}^1 = a_i \\ \sum_{k=1}^m X_{ik}^1 = q_k \\ \sum_{j=1}^n X_{kj}^2 = q_k \\ \sum_{k=1}^s X_{kj}^2 = b_j \\ i = \overline{1..m}, \quad j = \overline{1..n}, \quad k = \overline{1..s} \end{array} \right. \quad (4)$$

В системе 4:

X_{ik}^1 – объемы перевозки продукции из i -го пункта производства в k -ый склад;

X_{kj}^2 – объемы перевозки продукции из k -го склада в j -ый пункт потребления.

Решение двухэтапной транспортной задачи выполняется по следующим шагам:

1 – решается транспортная задача перевозок из пунктов производства в складские помещения;

2 – устанавливается запрет на транспортировку из пунктов производства в пункты потребления, минуя складские помещения. Стоимость такой перевозки $C_{ij} = +\infty$;

3 – решается транспортная задача перевозок из складских помещений в пункты потребления.

Дальнейшее решение заключается в последовательном моделировании данных шагов и производится по методу потенциалов, схема которого представлена на рис. 2.

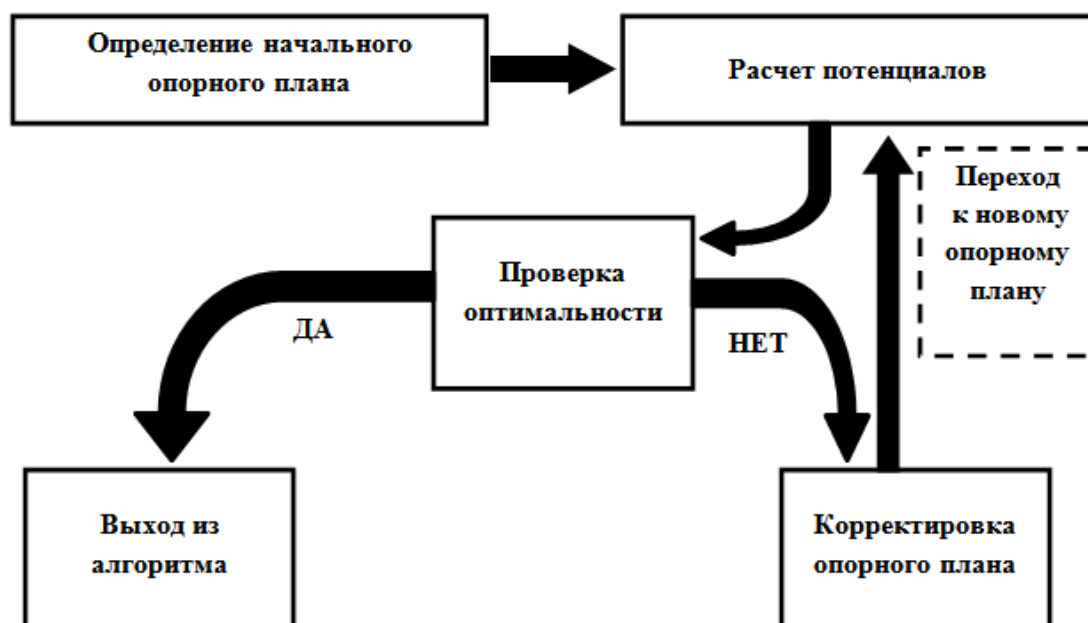


Рис. 2. Базовая схема метода потенциалов

В результате при решении транспортной задачи на шаге 1 найден оптимальный план перевозок из пунктов производства в склады, на 4 шаге – оптимальный план перевозок из складов в пункты потребления, а полученные результаты на 3 шаге иллюстрируют суммарную продукцию на складах до распределения на k -ом такте – запас продукции.

Решение задачи уровневым алгоритмом распределения продукции по складам выполняется по следующим шагам:

1 – определяются значения уровней заполняемости складов (минимальный, рабочий, критический);

2 – проверка включения пункта производства в планово – предупредительный ремонт на k -ом такте;

3 – согласно установленным в шаге 1 уровням заполняемости производится распределение на k -ом такте по j -ым складам;

4 – удовлетворение функции производства путем перемещения продукции из складских помещений в вершины v_{3j} .

Базовая схема уровневого алгоритма распределения продукции по складам представлена на рис. 3.



Рис. 3. Базовая схема уровневого алгоритма

Сравнительный анализ алгоритмов

С целью определения быстродействия работы алгоритмов произведено тестирование производительности. Для тестирования алгоритмов и моделирования работы ТПС был использован персональный компьютер Lenovo B50-70. Компьютер оборудован двухъядерным процессором Intel Core i3-4030U с частотой 1,9 ГГц, графическим контроллером AMD Radeon R5 230 2ГБ. Оперативная память Lenovo B50-70 составляет 6Гб.

Тестирование производительности выполнялось на товаропроводящей сети, состоящей из 15 элементов, в которой количество пунктов производства, складских помещений и пунктов потребления варьировалось от 3 до 7 при связи вершин графа «все со всеми».

В результате моделирования работы товаропроводящей сети с помощью рассмотренных методов можно сделать следующие выводы:

1. Оба алгоритма показали свою устойчивость при моделировании ТПС до 100 временных тактов.
2. В отличие от двухэтапной транспортной задачи в уровневом алгоритме задействованы все склады, а не только те, которые определяют оптимальный опорный план, но уровеньный алгоритм не подразумевает оптимизацию затрат на транспортировку в отличие от транспортной задачи.
3. Быстродействие алгоритмов представлено на рис. 4.

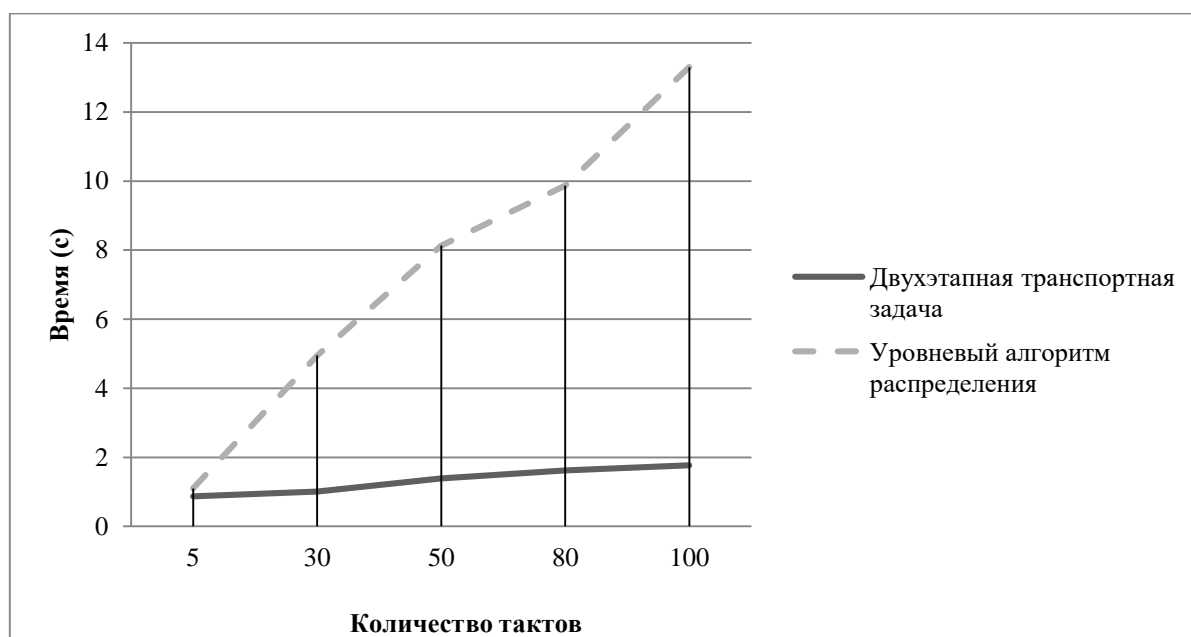


Рис. 4. Сравнительный анализ работоспособности алгоритмов по времени от количества тактов моделирования ТПС

Исходя из приведенного на рис. 4 графика видно, что двухэтапная транспортная задача в несколько раз быстрее справляется с поставленной целью, однако уровеньный алгоритм распределения дает более точный результат, поскольку данный метод учитывает рентабельность складов путем участия каждого из них в процессе распределения продукции. Этот аспект способствует увеличению потока товара, проходящего через каждый склад, что позволяет оптимально распределить продукцию по складским помещениям и увеличить устойчивость сети.

Для определения максимального времени моделирования оптимального распределения продукции при указанных выше характеристиках компьютера было проведено нагрузочное тестирование, согласно которому работоспособность рассматриваемой товаропроводя-

щей сети возможна до 200 тактов при методе двухэтапной транспортной задачи и до 150 тактов при уровневом алгоритме соответственно.

Исходя из полученных результатов, алгоритм двухэтапной транспортной задачи имеет ряд преимуществ: высокое быстродействие и устойчивость при моделировании сети на длительном промежутке времени. Однако уровневый алгоритм, уступая в быстродействии, эффективен при оптимизации распределения продукции при краткосрочном моделировании, поскольку при его работе задействованы все складские помещения, а не только те, которые были включены в опорный план транспортной задачи на рассматриваемом такте.

Таким образом, уровневый алгоритм эффективно использовать при моделировании работы товаропроводящей сети на короткие промежутки времени (до 100 тактов), а метод двухэтапной транспортной задачи – на длительном функционировании ТПС.

Заключение

В результате исследования были рассмотрены и реализованы методы оптимизации распределения продукции в товаропроводящих сетях при использовании планово-предупредительного ремонта. Произведена оценка эффективности данных методов путем проведения нагрузочного тестирования и тестирования производительности, выполнен сравнительный анализ по основным критериям.

В дальнейшем предполагается апробация рассматриваемых алгоритмов на товаропроводящих сетях с большим количеством элементов и адаптация методов с целью повышения эффективности их работы.

Библиографический список

1. **Аникин, Б.А.** Логистика. Теория и практика. Управление цепями поставок / Б.А. Аникин, Т.А. Родкина. – М.: Проспект, 2019. – 216 с.
2. **Балашова, Т.И.** Слияние товаропроводящих сетей на основе эвристических алгоритмов оптимизации по критерию минимальных стоимостей путей / Т.И. Балашова, В.И. Голованов, С.Н. Капранов, М.А. Степаненко, И.В. Лисин // Материалы XXV международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии. ИСТ – 2019», 2019.
3. **Фаскиев, Р.С.** Техническая эксплуатация и ремонт технологического оборудования: учебное пособие / Р.С. Фаскиев, Е.В. Бондаренко, Е.Г. Кеян, Р.Х. Хасанов. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т ОГУ, 2011. – 261 с.
4. **Цыплакова, О.Н.** Транспортная задача и её применение в решении экономических задач / О.Н. Цыплакова, Ю.В. Цысь, А.В. Кобылина // Материалы VI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – 2014. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014005189>, свободный (дата обращения: 13.11.2019).
5. **Жданова, А.И.** Двухэтапная транспортная задача / А.И. Жданова, Д.С. Завалицин // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум», 2018. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018002092>, свободный. (дата обращения: 21.11.2019).
6. **Санников, А.Н.** Алгоритм анализа устойчивости товаропроводящей сети при условии несоблюдения графика планово-предупредительного ремонта / А.Н. Санников, М.А. Степаненко, Т.И. Балашова // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-техн. конф. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. – 545 с.
7. **Бродецкий, Л.Г.** Экономико-математические методы и модели в логистике. Процедуры оптимизации / Л.Г. Бродецкий, Д.А. Гусев. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 195 с.
8. **Гвинн, Р.** Управление современным складом / Р. Гвинн. – М.: Эксмо, 2017. – 496 с.

*Дата поступления
в редакцию: 20.03.2020*

A.N. Sannikov, M.A. Stepanenko, V.I. Golovanov, T.I. Balashova, S.N. Kapranov

**OPTIMIZATION OF FUNCTIONING GOOD'S DISTRIBUTION NETWORK DURING
SCHEDULED PREVENTIVE REPAIRS OBJEKTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The task of optimal distribution of manufactured products on the objects of the distribution network is one of the urgent tasks of modern logistics. The purpose of the work is to optimize the distribution of industrial products across the warehouse when scheduled preventive repairs are introduced into the production process.

Methodology: This article presents the statement of the problem of the functioning of the distribution network. The methods of optimal distribution of products are presented: an algorithm of a two-stage task and a level method for the distribution of products in warehouses.

Implications: The article includes the results of performance testing and load testing. A comparative analysis of the considered methods was carried out, confirming the effectiveness of the results. Recommendations on the use of the considered methods in modeling the functioning of distribution networks are suggested.

Key words: logistics, distribution network, network resilience, supply chain management, preventive maintenance.

А.Г. Шмелева¹, И.В. Каленюк¹, С.Ю. Обыденнова²,
Д.В. Сяиков³, Г.Д. Пильщиков³, С.С. Шилков¹

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КРЕДИТОСПОСОБНОСТИ КЛИЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

МИРЭА – Российский технологический университет¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²
Российский университет дружбы народов³

Обоснована актуальность применения методов искусственного интеллекта для оценки кредитоспособности физических лиц. Построена математическая модель оценки кредитоспособности посредством присвоения физическому лицу соответствующего коэффициента доверия, при этом отражены лишь некоторые оцениваемые характеристики заемщика для формирования скоринг-балла. На основании построенной математической модели реализована программа на языке программирования С#. Представлены результаты численного моделирования оценки кредитоспособности клиента с применением разработанной программной реализации на основе предложенной скоринговой модели. Произведена оценка кредитоспособности физических лиц, полученные результаты были сравнены с оценкой «Национального бюро кредитных историй». Разработанная модель и программа может применяться для оценивания и ранжирования объектов в разнообразных прикладных задачах имитационного моделирования. Программа имеет простой интерфейс, возможность выбора параметров оценки, расширения их числа. Реализованные алгоритмы машинного обучения позволяют уточнять коэффициенты модели с ростом статистических данных.

Ключевые слова: имитационное моделирование, машинное обучение, скоринг-балл, кредитный скоринг, оценка кредитоспособности.

Введение

В условиях цифровой экономики актуальным является применение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа данных о клиентах с целью получения знаний, снижающих риски организации при заключении договоров. Наличие информации о клиенте, его предпочтения, потребительские запросы и финансовые возможности, позволяют лицу, принимающему решения формировать специальные предложения, ориентированные на определенный тип клиентов, разрабатывать стратегии увеличения числа клиентов с минимизацией рисков, способствующих эффективному развитию организации. Разрабатываемые методы оценки клиентов способствуют составлению объективных оценок, что обеспечивает снижение рисков при принятии решений. Например, в настоящее время статистические методы широко применяются банками для оценки кредитоспособности заемщиков. Данные методы объединены термином «кредитный скоринг» – каждому клиенту на основе анализа персональных данных ставится в соответствие скоринг-балл, который упрощает и автоматизирует процесс первоначального принятия решений по предоставлению или отказу в кредите.

Информационные системы, включающие инструменты скоринга, имеют ряд преимуществ: скорость, систематизация и объективность оценки характеристик клиентов. Например, возрастающая потребность населения в кредитных средствах, а следовательно, и возросшая из-за этого конкуренция между банковскими учреждениями, требует от банков создание и развитие собственных уникальных скоринговых моделей для оптимизации принятия решений по заявкам с учетом критериев валидности клиента, которые в разных организациях могут отличаться. Первоначальные варианты скоринговых моделей базировались на линейных методах, учитывающих весовые коэффициенты, но развитие информационных

технологий требует совершенствования внутрибанковских скоринг-систем с учетом собственных накапливаемых данных о клиентах.

В современном мире каждый час происходит огромное количество операций прямо или косвенно связанных со скорингом; например, скоринговые системы применяются не только в оценке кредитоспособности заемщика, а также в оценке причин уменьшения количества клиентов, в области увеличения кредитного лимита по кредитным картам или оценки просроченных платежей, анализируя причины пропуска. Широкий спектр услуг и большой объем операций требует создание инструментов, направленных на анализ данных, способствующих принятию оптимального решения. Например, еще недавно для оформления кредита обязательно было личное присутствие в банке заемщика для предоставления документов, что, в свою очередь, накладывало определенную нагрузку на штат сотрудников, время на обработку данных вручную и, в итоге, порождало потерю времени, средств и клиентов. Процедура рассмотрения и одобрения (отказа) кредита занимала долгое время – это в современных реалиях неэффективно, так как приводит к потере клиентов, а также со стороны банковского сектора к дополнительным расходам на содержание сотрудников, занимающихся обработкой данных вручную. Цифровая экономика направлена на внедрение информационных систем [1-3], способствующих автоматизации принятия решений, повышающих точность и быстродействие управления. Например, развитие интернет банкинга позволяет упростить способы взаимодействия с банками, в частности, автоматический анализ кредитоспособности и подбор наилучшего варианта, как для банка, так и для клиента с целью уменьшения рисков обеих сторон.

В течение последних лет в банковском секторе наблюдается увеличение объема размещенных денежных средств. Объединенное Кредитное Бюро (ОКБ) подвело итоги кредитной активности граждан за I квартал 2019 г. на основе информации от 600 кредиторов, передающих данные в бюро [4]. Всего за I квартал 2019 г. банки выдали россиянам 8,84 млн новых кредитов общим объемом свыше 1,97 трлн руб. В годовом отношении количество выданных кредитов выросло на 11 %, при этом объемы кредитования увеличились на 17 %. В I квартале 2018 г. было выдано 7,95 млн кредитов на 1,67 трлн руб. Количество новых кредитов наличными выросло на 16 %, при этом объем кредитования увеличился на 31 %. За январь-март 2019 г. было выдано 3,71 млн кредитов наличными на 998,35 млрд руб. против 3,20 млн кредитов на 763,45 млрд руб. годом ранее. Средний размер выданного кредита наличными вырос на 12 %: с 239 до 269 тыс. руб. Кредитная нагрузка россиян повышается с каждым годом, что ставит перед банками задачи разработки инструментов принятия решений по оценке кредитоспособности клиентов с учетом их возможностей для минимизации рисков как банка, так и клиента. Это обосновывает необходимость разработки методов и алгоритмов [5], которые позволят быстро и эффективно на основании предоставленных данных со стороны заемщика, с применением внедряемых информационных систем, включающих инструменты мониторинга и статистики, принимать решение о выдаче кредита заемщику с целью минимизации взаимных рисков.

Математическая модель кредитного скоринга

Современные скоринг-модели могут включать набор методов и алгоритмов анализа данных: регрессионный анализ, нейронные сети, методы машинного обучения и искусственного интеллекта, обладающих следующими преимуществами: анализ большого количества признаков, установление закономерностей, быстродействие. Стоит учитывать, что для эффективной классификации и принятия решений необходимо осуществлять накопление статистических данных о клиентах, которые позволят произвести формирование обучающей выборки и в дальнейшем уточнение весовых коэффициентов.

Полученные при анализе данных знания о клиентах формируют стратегию развития компании посредством разработки предложений направленных на определенный тип клиентов в результате анализа и классификации статистических данных. Для демонстрации оценки

кредитоспособности клиентов рассмотрим построенную скоринг-модель анализа кредитной заявки клиента при программной реализации которой применялись нейронные сети. Созданная программа позволяет при накоплении данных вносить дополнительные критерии оценки.

Цель модели – классификация данных об объекте исследования, в рассматриваемой задаче о клиенте (физическом лице) согласно его характеристикам и соответствующим весам, определенным на основе анализа статистических данных. При накоплении статистических данных значения весовых коэффициентов уточняются в процессе эксплуатации созданной программы.

В общем случае для обученной нейронной сети можно установить бинарное значение выходных переменных. Например, для разработанной и тестируемой скоринг-модели достаточно двух классов результата:

- клиенту можно одобрить заявку и заключить договор;
- клиенту нельзя одобрить заявку и, следовательно, нельзя заключить договор.

По принципу построения нейронной сети, зададим функцию активации нейрона – пороговую функцию. Поскольку существует всего два результирующих класса, например, можно кодировать их при помощи 0 и 1 (где 0 – нельзя заключить договор, 1 – можно заключить договор).

Для реализации данной модели мы будем использовать пороговую функцию (1):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq d, \\ 0, & \text{если } x < d, \end{cases} \quad (1)$$

где d – это коэффициент доверия, пороговое значение, для нашей модели примем $d = 0,7$. Таким образом, будем считать, что объект оценки на 70 % удовлетворяет установленным критериям. Пороговое значение d вычисляется в зависимости от оценки характеристик клиента. Например, наличие действующих кредитов, заработная плата, образование и т.д. Для оценки характеристик клиента формируется список оцениваемых параметров и соответствующие им начальные значения весовых коэффициентов, в процессе обучения коэффициенты уточняются. На основе статистических данных числовые значения характеристик нормированы в диапазоне значений от 0 до 1.

В рассматриваемом модельном примере приведены оценки базовых характеристик клиента для принятия эффективных кредитных решений. Предложенная модель позволяет использовать как бинарные, так и небинарные переменные. Например, бинарные переменные: есть ли за последний год пропуски платежей по кредиту 0 – нет, 1 – да. По результатам анализа статистических данных о клиентах определены начальные значения весовых коэффициентов. При изменении статистической выборки данные коэффициенты определяются в процессе обучения. При построении первоначальной модели учитывалось, что есть значимые характеристики, например, лучше работать с платежеспособными клиентами, поэтому для данной характеристики присвоено начальное значение весового коэффициента равное 0,7. По аналогии формировались и другие значения.

Для демонстрации работы созданной программы представим модельный пример, содержащий список некоторых главных оцениваемых характеристик клиента.

1. Наличие двух и более просроченных платежей по кредитам за год – бинарный параметр, принимающий значение 0 или 1. Вес $w_1 = -0,8$.

2. Отсутствие просроченных платежей по кредитам за год – бинарный параметр, принимающий значение 0 или 1. Вес $w_1 = 0,7$.

3. Заработная плата клиента, где за y принимаем минимальный размер оплаты труда в регионе проживания клиента (2):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 4 * y; \\ 0,7, & 2 * y < x \leq 3 * y; \\ 0,5, & y < x \leq 2 * y; \\ 0,3, & 0,5 * y < x \leq y \\ 0, & x \leq 0,5 * y. \end{cases} \quad (2)$$

Присвоим вес $w_3 = 1$.

4. Кредитная нагрузка клиента, в данном случае будем учитывать соотношение ежемесячных платежей по кредитам к доходу клиента (3):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & 0,7 < x; \\ 0,7, & 0,5 < x \leq 0,7; \\ 0,5, & 0,3 < x \leq 0,5; \\ 0,3, & 0,1 < x \leq 0,3; \\ 0, & x \leq 0,1. \end{cases} \quad (3)$$

Вес $w_4 = -1$. Значение весового коэффициента присвоено исходя из предположения, что данный фактор, как и заработанная плата клиента, играет важную роль общей модели.

5. Стаж работы клиента в организации (4):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ более } 10 \text{ лет;} \\ 0,7, & x \text{ в диапазоне } 7 - 10 \text{ лет;} \\ 0,5, & x \text{ в диапазоне } 4 - 6 \text{ лет;} \\ 0,3, & x \text{ в диапазоне } 1 - 3 \text{ лет;} \\ 0, & x \text{ менее } 1 \text{ года.} \end{cases} \quad (4)$$

Вес $w_5 = 0,5$.

6. Возраст заемщика (5):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ в диапазоне } 33 - 40; \\ 0,7, & x \text{ в диапазоне } 27 - 32 \text{ и } 41 - 47; \\ 0,5, & x \text{ в диапазоне } 22 - 26 \text{ и } 48 - 55; \\ 0,2, & x \text{ в диапазоне } 18 - 22 \text{ и } 56 - 59; \\ 0,1, & x \text{ от } 60 \text{ и старше.} \end{cases} \quad (5)$$

Вес $w_6 = 0,7$.

7. Образование заемщика (6):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{высшее;} \\ 0,5, & \text{среднее специальное;} \\ 0,3, & \text{среднее;} \\ 0, & \text{остальное.} \end{cases} \quad (6)$$

Вес $w_7 = 0,7$.

8. Условия труда, будем классифицировать по степени вредности (7):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{оптимальные условия труда;} \\ 0,7, & \text{допустимые условия труда;} \\ 0,3, & \text{вредные условия труда;} \\ 0, & \text{опасные условия труда.} \end{cases} \quad (7)$$

Вес $w_8 = 0,5$.

9. Наличие задолженности по данным Федеральной службы судебных приставов (ФССП) – бинарный параметр, принимающий значения 0 или 1.

Вес $w_9 = -0,6$.

10. Наличие аккаунта в социальных сетях – бинарный параметр, принимающий значения 0 или 1.

Вес $w_{10} = 0,5$.

11. Наличие стационарного телефона – бинарный параметр, принимающий значения 0 или 1.

Вес $w_{11} = 0,4$.

Рассмотренный модельный пример содержит некоторые главные характеристики клиента, в созданной программе на усмотрение лица принимающего решения можно добавлять дополнительные пункты. Использование созданной программы позволяет провести быструю и эффективную оценку клиента по вопросу одобрения или отказа кредитной заявки.

Программная реализация и результаты расчетов

В качестве языка программирования был выбран язык C# в среде разработки Visual Studio. При открытии программы автоматически загружаются весовые коэффициенты, которые могут быть, как заранее подготовлены, так и динамически обновляться на основе данных о новых клиентах. Окно программы (рис. 1) позволяет ввести необходимую информацию о клиенте и на ее основе рассчитать скоринг-балл. Помимо этого, с помощью пункта меню «Действия → Добавить дополнительную информацию» в программе предусмотрена возможность добавления необязательной информации о клиенте, которую можно использовать для уточнения весовых коэффициентов и усовершенствования параметров скоринговой модели. Программа содержит алгоритмы машинного обучения на основе нейронных сетей, что позволяет при накоплении статистических данных формировать обучающую и тестовую выборку, расширять оцениваемые параметры и повышать точность классификации оценки кредитоспособности клиентов.

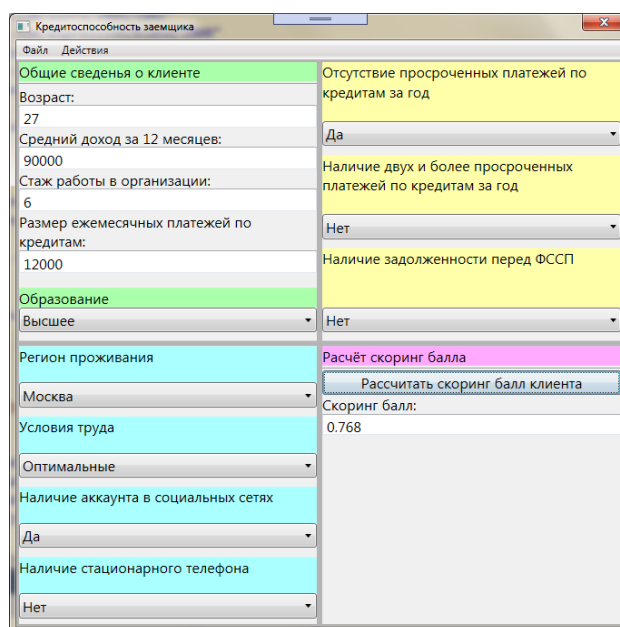


Рис. 1. Основное окно программы

Рассмотрим пример оценки кредитоспособности заемщиков по предлагаемой скоринг-модели с помощью разработанной программы. В табл. 1 представлена информация о четырех клиентах. Предполагается, что все клиенты проживают в Москве.

Таблица 1.

Данные о клиентах

	Клиент 1	Клиент 2	Клиент 3	Клиент 4
Просроченные платежи по кредитам за год	Нет	Нет	Да	Нет
Отсутствие пропуска платежей за год	Да	Да	Нет	Да
Доход, руб.	90 000	19 000	45 000	21 000

Окончание табл. 1.

	Клиент 1	Клиент 2	Клиент 3	Клиент 4
Кредитная нагрузка	Платежи по кредитам 12000, т.е., нагрузка слабая = 0,3	Нет	Платежи по кредитам 4500, т.е. нагрузка слабая = 0,3	Платежи по кредитам 8000, т.е., нагрузка = 0,5
Стаж работы в организации	6 лет	1 год	17 лет	Не работает
Возраст заемщика	27 лет	19 лет	45 лет	67 лет
Образование заемщика	Высшее	Неоконченное высшее	Высшее	Среднее специальное
Условия труда	Отличные	Отличные	0,7	Не работает
Наличие задолженности ФССП	Нет	Нет	Есть	Нет
Наличие аккаунта в социальных сетях	Есть	Есть	Есть	Нет
Наличие стационарного телефона	Нет	Нет	Нет	Есть

В табл. 2 представлены результаты оценки параметров клиентов. В последней строчке для каждого из них записан скоринг-балл, определенный с помощью разработанной программы.

Таблица 2.

Результаты анализа

Параметр	Вес параметра	Клиент 1	Клиент 2	Клиент 3	Клиент 4
Просроченные платежи	-0,8	0	0	1	0
Отсутствие пропуска платежей	0,7	1	1	0	1
Заработная плата	1	1	0,3	0,7	0,3
Кредитная нагрузка	-1	0,3	0	0,3	0,5
Стаж работы в организации	0,5	0,5	0,3	1	0
Возраст заемщика	0,7	0,7	0,2	1	0,1
Образование заемщика	0,7	1	0,3	1	0,5
Условия труда	0,5	1	1	0,7	0
Наличие задолженности ФССП	-1	0	0	1	0
Наличие аккаунта в социальных сетях	0,5	1	1	1	0
Наличие стационарного телефона	0,4	0	0	0	1
Скоринг-балл		0,768	0,5	0,27	0,264

Рассмотрев имеющиеся параметры, можно сделать следующие выводы.

Клиент 1 является усредненным примером положительного клиента для кредитора, наличие высокого дохода, отсутствие пропуска платежей и низкая кредитная нагрузка положительно сказалась на общей оценке.

Клиент 2 не имеет кредитной нагрузки, а также пропуска платежей, но финансовое положение не стабильное, маленький стаж работы, это отобразено в итоговой оценке.

Клиент 3 получает большой доход, а также относится к выгодной возрастной категории в предложенной системе оценке, но получил схожую оценку с клиентом 4, который имеет соответственно меньший доход и относится к не столь выгодной возрастной категории.


Связано это с наличием у клиента 3 пропуска платежей и задолженности по данным ФССП, что негативно сказалось на общей оценке.

Стоит отметить, что необходимо накапливать статистические данные для формирования обучающей выборки – это позволит произвести уточнение весовых коэффициентов. Для более эффективно анализа клиента аналитику необходимо дополнять количество рассматриваемых характеристик. Однако, даже рассмотрев не столь большое количество имеющихся параметров можно сделать определенную оценку.

Результаты тестирования работы программы совпали с данными НБКИ [3]. Пример для одного клиента представлен в табл. 3.

Таблица 3.

Сравнение результатов

Скоринг-балл, полученный в результате расчета программы	Скоринг-балл на основании отчета НБКИ
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>Скоринг балл:</p> <p>0,795</p> </div>	

Сравнение результатов с учетом основных характеристик показало соответствие, отличие обусловлено различием в принимаемом максимальном значении скоринг-балла – максимальное значение кредитного рейтинга в отчете НБКИ 850 баллов, а в разработанной модели и программе 1000. Предложенная скоринг-модель и созданная программа обладают рядом преимуществ. Например, при деятельности банковской организации веса уточняются при помощи алгоритмов машинного обучения. Если был заключен договор с клиентом (в соответствии со скоринг-моделью), но при этом сотрудничество не принесло ожидаемых результатов, веса в модели меняются при обучении.

Заключение

В условиях цифровой экономики актуальным является разработка и применение инструментов автоматизации бизнес-процессов и принятия решений, например, оценки клиентов. Наличие информации о клиенте позволяет оценить его предпочтения, потребительские запросы и возможности. Применение искусственного интеллекта для оценки кредитоспособности заемщиков позволяет анализировать множество дополнительных критериев, выявляя индивидуальные предпочтения каждого клиента, финансовое положение, круг общения, потребительские запросы. Все это позволяет построить полную картину о клиенте и учесть все риски для кредитора.

В свою очередь, для банка это несет следующие преимущества.

1. Снижение штата сотрудников отдела проверки и рассмотрения кредитных заявок, а, следовательно, и расходов на данные отделы.
2. Уменьшение времени на рассмотрения заявки на кредитный продукт.
3. При анализе и принятии решении по заявке клиента не принимает прямого решения сотрудник, это позволяет избежать влияния человеческого фактора.
4. В зависимости от политики компании допустимо изменять веса значимости характеристик клиента, производить имитационное моделирование возможных альтернатив, на основе которых принимать стратегические решения управления.

Предложенная математическая модель и прикладная программа позволяют автоматизировать процессы анализа и оценки кредитных заявок, поступающих в банки, что повышает точность и быстрдействие принимаемых сотрудниками банковской организации решений.

Также разработанная модель и программа может применяться для оценивания и ранжирования объектов в разнообразных прикладных задачах имитационного моделирования. Программа имеет простой и ясный интерфейс, возможность выбора параметров оценки, расширения их числа. Реализованные алгоритмы машинного обучения позволяют уточнять коэффициенты модели с ростом статистических данных.

Библиографический список

1. **Shmeleva, A.G.** Industrial Management Decision Support System: from Design to Software. Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) / A.G. Shmeleva, A.I. Ladynin. – 2019. – P. 1474-1477. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657313.
2. **Тюлин, А.Е.** Интеллектуальная космическая система в цифровой экономике: новые возможности и перспективы / А.Е. Тюлин, А.А. Чурсин, Р.В. Шамин, А.В. Юдин // Современная научная мысль. – 2018. – № 6. – С. 213-223.
3. **Shmeleva, A.G.** Manufacturing Planning Information System Development / A.G. Shmeleva, Y.V. Talanova, E.A. Galemina, A.I. Ladynin // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – P. 366-369. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317108.
4. Объединенное кредитное бюро. <https://bki-okb.ru/press/news/v-i-kv-2019-g-zaemshchiki-vzyali-kreditov-na-197-trln-rub>.
5. **Шмелева, А.Г.** Когнитивное моделирование в информационной системе поддержки принятия решений / А.Г. Шмелева, Ю.В. Таланова, В.В. Наумов, А.И. Ладынин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород. – 2018. – Т. 78. – № 2 (121). – С. 60-67.

*Дата поступления
в редакцию: 03.08.2020*

**A.G. Shmeleva¹, I.V. Kalenyuk¹, S.Yu. Obydenнова²,
D.V. Syasikov³, G.D. Pilshchikov³, S.S. Shilkov¹**

A SOFTWARE MODEL FOR ASSESSING CUSTOMERS' CREDITWORTHINESS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

MIREA – Russian technological university¹
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev²
Russian University of Peoples³

Purpose: Current trends in the development of digital infrastructures organizations in digital economy conditions are directed on the development of decision-making tools based on data analysis.

Design/methodology/approach: Organizations designed information systems must contain relevant elements that include automation of decision-making without human participation. The article substantiates the relevance of use of artificial intelligence methods for evaluating the creditworthiness of individual person.

Findings: A mathematical model for assessing creditworthiness was constructed by assigning a corresponding confidence coefficient to an individual. The program is implemented in the C# programming language.

Research limitations/implications: The results of numerical modeling of the client's creditworthiness assessment using the developed software implementation based on the proposed scoring model are presented. An assessment of the creditworthiness of individuals was made, the results were compared with the assessment of the «National Bureau of Credit Histories».

Originality/value: The developed model and program can be used for evaluating and ranking objects in various simulation applications. The program has a clear interface, the ability to select evaluation parameters and expand their number. Implemented machine learning algorithms allow you to refine the coefficients of the model with the growth of statistical data.

Key words: simulation modeling, machine learning, scoring score, credit scoring, credit rating.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 624.074.432(539.374)

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_3_80

С.В. Кожевников, С.А. Пименов

О РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Рассмотрен процесс «модельно-ориентированных испытаний» (расчетно-экспериментальной отработки изделий) в рамках использования платформы Simcenter применительно к изделиям программно-технических средств (ПТС), на которые действуют различные механические нагрузки динамического характера. Задействованы два основных компонента платформы: Simcenter 3D и Simcenter Testlab с набором оборудования SCADAS. Сферой применения технологии расчетно-экспериментальной отработки ПТС выступают автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных электростанций (АСУ ТП АЭС). Преимуществом «модельно-ориентированных испытаний» является связь с численным моделированием и командная работа расчетчиков и испытателей в ходе процесса расчетно-экспериментальной отработки. В рамках представленного подхода также минимизируется субъективизм инженеров и снижаются затраты, большое количество классических экспериментов заменяется модальными испытаниями с последующей расчетной отработкой на верифицированных моделях, что особенно важно при проектировании крупногабаритных изделий ПТС. Данный подход позволяет проводить расчетно-экспериментальную отработку оборудования не только для АСУ, но и для большого количества крупногабаритного оборудования, устанавливаемого на АЭС.

Ключевые слова: программно-технические средства, численное моделирование, расчетная отработка, экспериментальная отработка, радиоэлектронная аппаратура, энергоблок, блочный пункт управления, атомная электростанция.

Введение

В настоящее время на атомных электростанциях (АЭС) для управления энергоблоком (ЭБ) используются автоматизированные системы управления (АСУ), состоящие из программно-технических средств (ПТС) специального назначения. ПТС представляют собой сложно-функциональную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), построенную по модульному иерархическому принципу, и являются информационным и управляющим инструментом в виде отдельных самостоятельных систем.

1. *Технические средства оперативного диспетчерского управления* энергоблоком (ТС ОДУ) служат для создания на блочном пункте управления ЭБ АЭС средств обобщенной мнемосхемы резервной зоны контроля и управления оборудованием нормальной эксплуатации энергоблока. Конструкция ПТС представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками (мозаичные элементы контроля, управления и индикации, измерительные приборы, монитор, клавиатура, трекбол, сетевые фильтры, акустическая система, оптический кросс и др.). Фрагмент конструкции представлен на рис. 1.

2. *Программно-технический комплекс системы верхнего блочного уровня управления* (СВБУ) служит для централизации информационных потоков и предоставления оперативному персоналу АЭС необходимых средств управления. Конструкция ПТС представляет

собой пульт, состоящий из двух тумб со столешницами, и установленными мониторами. Одна из тумб предназначена для установки аппаратной части (на 19” адаптеры установлено оборудование рабочей станции), другая – для размещения клеммных соединителей, обеспечивающих соединение элементов МПКУ с внешними устройствами.

3. Система регистрации важных параметров эксплуатации энергоблока (СРВПЭ) служит для сбора данных от всех предусмотренных источников информации, их записи и хранения, а также для передачи информации на СВБУ о неисправностях технических и программных средств СРВПЭ. Конструкция ПТС представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками (на 19” адаптеры установлено в зависимости от модификации от одного до трех оптических кроссов, к которым подсоединяются внешние волоконно-оптические кабели, промышленные компьютеры, источники переключения питающих сетей, источники бесперебойного питания).

В соответствии с техническими условиями эксплуатации для оборудования, поставляемого на АЭС, а также требованиями ГОСТ 25804.3-83 [1], конструкция ПТС должна быть прочной и работоспособной при воздействии:

- механических факторов (синусоидальная вибрация, удары, сейсмические нагрузки, воздействия от удара падающего самолета и воздушной ударной волны);
- климатических факторов (перепады температуры окружающей среды в заданном диапазоне и относительная влажность).

Конструкции ПТС (шкаф представляет собой сваренную балочную конструкцию с установленными электронными модулями соединенными кабельными трассами) состоят из множества составных элементов, количество которых может достигать нескольких тысяч. При этом ПТС являются массогабаритными конструкциями, для которых, в большинстве своем, нет возможности проведения классических натуральных испытаний на воздействие заданных механических факторов. Причиной этого является сложность выбора испытательных вибростендов, способных работать с такими массогабаритными объектами. Аналогичная проблема возникает и для других конструктивных элементов АЭС, отличающихся большой массой и габаритами (элементы трубопроводной арматуры, элементы реакторных установок, турбины и т.п.) Обоснование прочности и стойкости таких объектов, как правило, осуществляется много-итерационным расчетным путем с учетом приближений при использовании численных методов [2] и субъективных методик различных групп инженеров. Следует заметить, что эффективную разработку массогабаритных конструкций, в том числе, данного класса РЭА (конструкции ПТС), быструю адаптацию проектов под новые требования заказчиков, обеспечение конкурентоспособности по техническим параметрам и стоимостным показателям можно реализовать только с применением технологий расчетно-экспериментальной отработки изделий на основе современных систем автоматизированного проектирования и модальных испытаний.

Предметом исследования в настоящей статье является технология расчетно-экспериментальной отработки ПТС при проектировании. Классический подход предполагает здесь два основных этапа:

- 1) проектирование конструкции ПТС [3] с расчетной отработкой для минимизации отказов оборудования на уровне стендовых испытаний (экспериментальная отработка);
- 2) проведение стендовых испытаний.

Для проектирования оборудования АСУ ТП АЭС, в частности, оборудования систем ТС ОДУ, СВБУ, СРВПЭ, используется как коммерческие программные продукты класса САД (САПР NX, Eplan, ACAD, Компас и др.), так и ПО класса CAE-Simcenter 3D, которое имеет встроенный, полнофункциональный САД модуль от САПР NX. САД модули предназначены для твердотельного моделирования, создания 3D-моделей и на их основе чертежей конструкций ПТС (рис. 2). Это классический подход на основе ассоциативности данных и использования технологии «мастер моделей». Геометрия ПТС в виде 3D-моделей является основой для построения расчетных моделей и проведения расчетной отработки в Simcenter

3D. ПО Simcenter 3D поддерживает возможность импорта 3D-моделей из сторонних CAD САПР с применением универсальных форматов (IGES, STEP и др.) или на уровне геометрического ядра Parasolid. Расчетная отработка ведется с учетом внешних нагрузок [4].

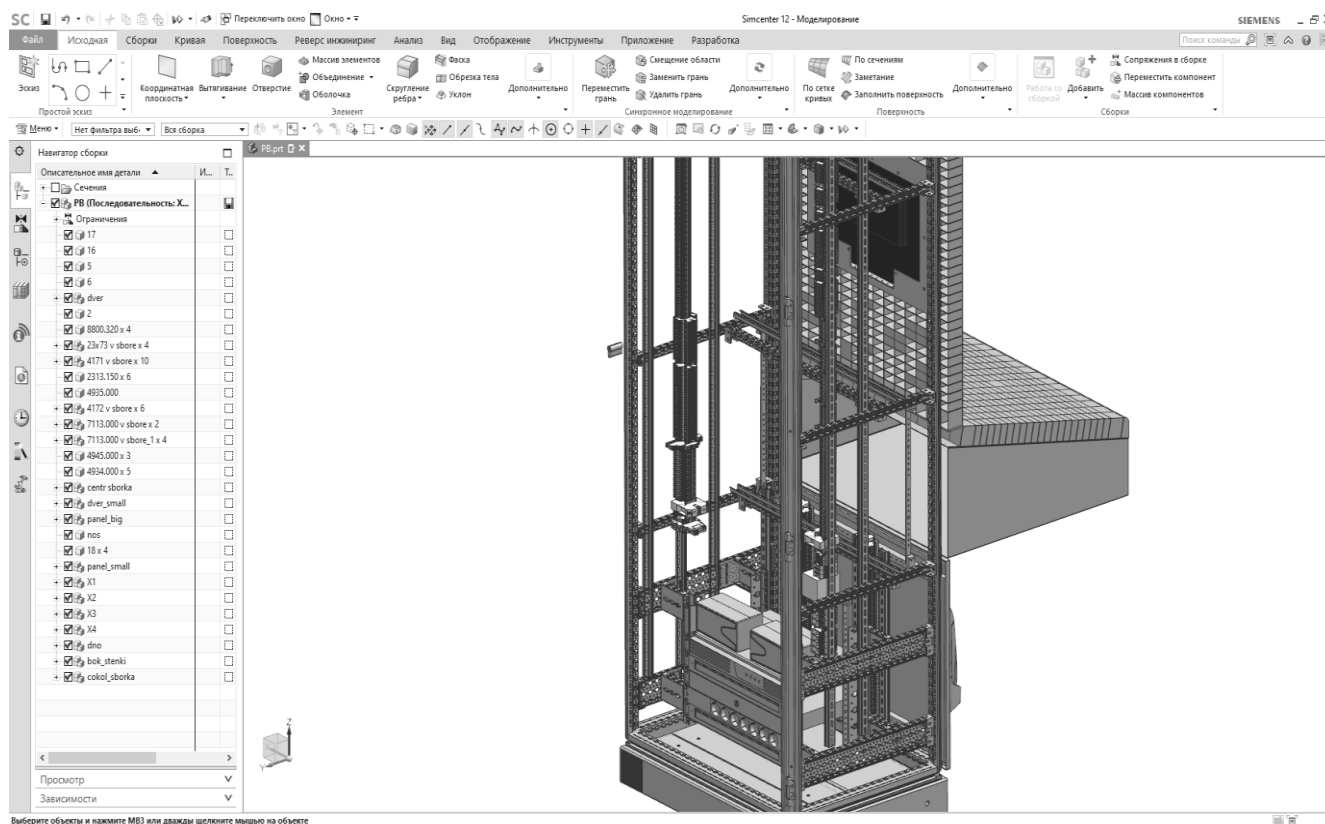


Рис. 1. Фрагмент конструкции ПТС, модель в Simcenter 3D

О применяемых системах автоматизированного проектирования и технологиях расчетно-экспериментальной отработки

Основным видом нагрузок на ПТС являются динамические: синусоидальная вибрация, максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), проектное землетрясение (ПЗ), падение самолета (ПС), воздушная ударная волна (ВУВ). ПТС устанавливаются в здании АЭС путем приварки цокольной части к металлическим закладным элементам конструкции перекрытия. Таким образом, все выше перечисленные нагрузки передаются через здание АЭС на основание ПТС – цоколь. При проведении расчетов на внешние механические воздействия ПТС рассматривается как конструкция с вынужденными динамическими перемещениями основания. В результате расчетных исследований производится анализ собственных частот конструкции, анализ откликов конструкции на динамические воздействия, оценка уровня перегрузок, напряжений, деформаций и т.п. В случае нарушения прочности, жесткости, ударо-вибро-стойкости конструкции и электронных компонентов производится доработка (оптимизация) конструкции с дальнейшими новыми расчетными исследованиями. Такие расчетные исследования должны проводиться для всех модификаций и исполнений ПТС.

Учет влияния внешних воздействующих факторов на работу изделия ПТС АСУ ТП АЭС является важной составляющей получения надежной и конкурентно способной продукции. В этом плане проводятся как расчетные оценки, так и экспериментальная отработка изделий. Это классические (стандартные) составляющие современного процесса проектирования. Расчетная отработка производится с целью минимизации отказов изделия, которые могут произойти при испытаниях. Экспериментальная отработка в виде стендовых или натур-

ных испытаний имеет целью получить окончательные доказательства о работоспособности, прочности и надежности изделия.

Как правило, процессы расчетной и экспериментальной отработки распределены между различными подразделениями предприятия. Расчетчик субъективно принимает решение о математической постановке расчетной модели изделия, и результат в значительной мере зависит от его квалификации. Результаты расчета могут значительно отличаться от результатов испытаний. Здесь можно уже говорить об «искусстве» создавать корректные расчетные модели изделий. Имеют место и субъективные аспекты: выбор испытательной оснастки, замена реального режима нагружения на эквивалентный (который можно реализовать на имеющемся испытательном оборудовании), выбор мест расположения датчиков и т.п.; в связи с этим возникает ряд проблем.

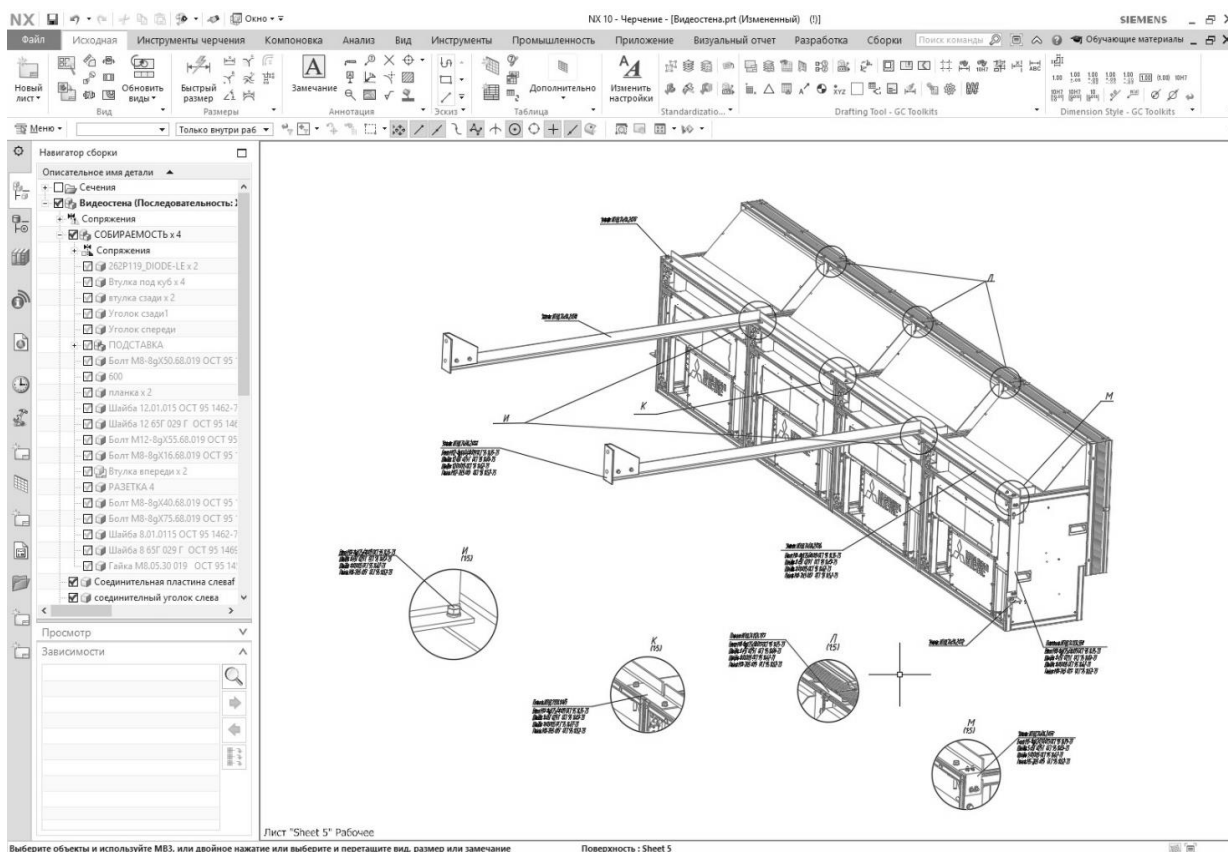


Рис. 2. Монтажный чертеж

Однако на современном этапе развития появилось понятие «модельно-ориентированных испытаний». Здесь подразумевается связь испытаний с расчетным (численным) моделированием, а расчетчики и испытатели работают в одной команде в рамках процесса расчетно-экспериментальной отработки (численный анализ с последующей тарировкой расчетной модели на основе модального эксперимента). Это необходимо для уменьшения инженерного субъективизма на расчетных и экспериментальных этапах отработки, чтобы в конечном итоге получить качественное изделие при минимальных затратах.

Расчетная-экспериментальная отработка изделий ПТС с применением платформы Simcenter

Рассмотрим реализацию процесса «модельно-ориентированных испытаний» (расчетно-экспериментальная отработка изделий) в рамках использования платформы Simcenter и применительно к изделиям ПТС, на которые действуют различные механические нагрузки

динамического характера. Задействованы два основных компонента платформы: Simcenter 3D (рис. 1) и Simcenter Testlab (рис. 3) с набором оборудования SCADAS.

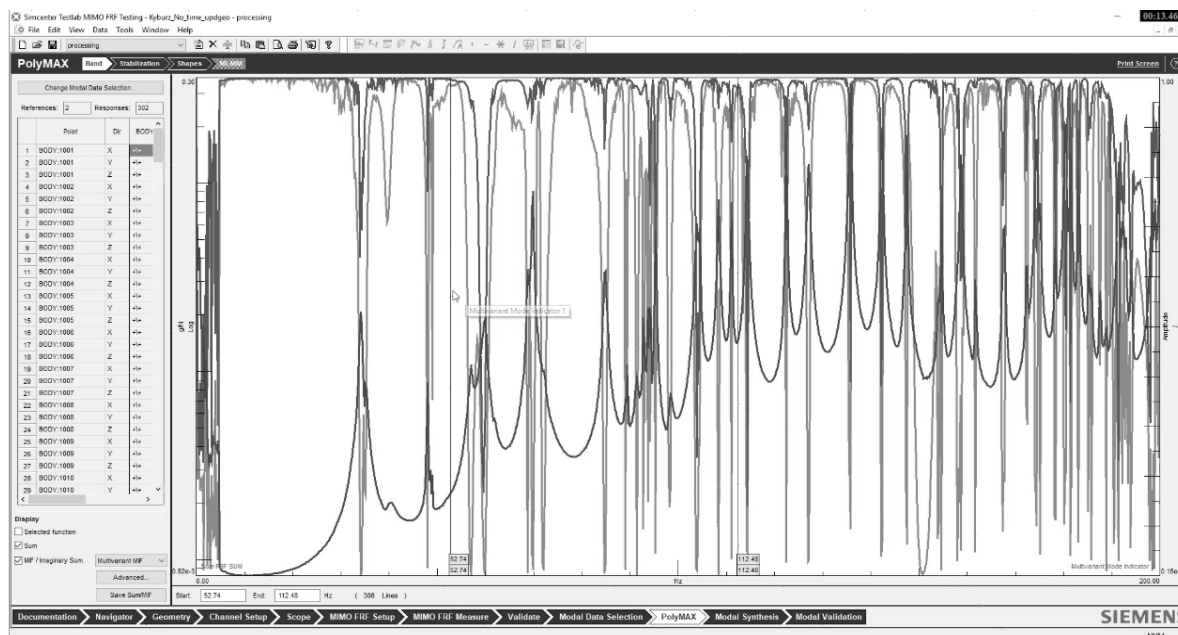


Рис. 3. Программная платформа Simcenter Testlab

На первом этапе проводится классическое расчетное (численное) моделирование с построением расчетной модели (РМ) в виде конечно-элементной структуры, ассоциативно связанной с геометрической 3D моделью, с приложенными условиями нагружения и закрепления. Расчетное моделирование проводится в рамках Simcenter 3D, где происходит расчет собственных частот. На основе полученной РМ автоматизировано строится так называемая «проволочная модель» (модель с использованием специальных 1D конечных элементов) в узлах которой производится оптимальная расстановка сенсоров и источников возбуждения. Собственные частоты РМ и проволочной модели корреляционно связываются. В целом это называется «претест анализ» (рис. 4), результатом которого является «тест модель» («проволочная модель» с набором сенсоров и источников возбуждения, привязанных по координатам узлов, а также набор расчетных собственных частот). Полученная «тест модель» передается в Simcenter Testlab.

Второй этап – модальные испытания (рис. 4). В рамках подготовки производится установка (вывешивание) экспериментального образца изделия (в нашем случае использовался опытный образец ПТС системы ТС ОДУ АЭС «Куданкулам», рис. 5). На экспериментальном образце в координатных местах согласно «тест модели» устанавливаются источники возбуждения и сенсоры (датчики оборудования SCADAS) для получения откликов модели. В качестве возбуждения могут использоваться локальные генераторы вибрации (рис. 6) или возбуждение осуществляется путем удара специальным динамическим молотком (рис. 7). Отклики модели – передаточные функции в частотной или временной области с амплитудой в виде ускорений, перемещений, напряжений, деформаций и др. (в зависимости от типа датчика). Дальнейший процесс – это измерение и получение передаточных функций откликов в местах установки сенсоров с учетом воздействий возбуждения. На основе измеренных передаточных функций откликов производится расчет амплитудно-частотных и демпфирующих характеристик экспериментального образца изделия. Для этого используется специальный функционал (модальный анализ) Simcenter Testlab. Результатом модальных испытаний является «экспериментальная модель» («проволочная модель» с набором воздействий возбуждения и передаточных функций откликов, привязанных по координатам динамических нагру-

зок и датчиков измерений соответственно, а также набор экспериментальных собственных частот и коэффициентов демпфирования). Полученная «экспериментальная модель» передается в Simcenter 3D для дальнейшего уточнения (тарировки) РМ.

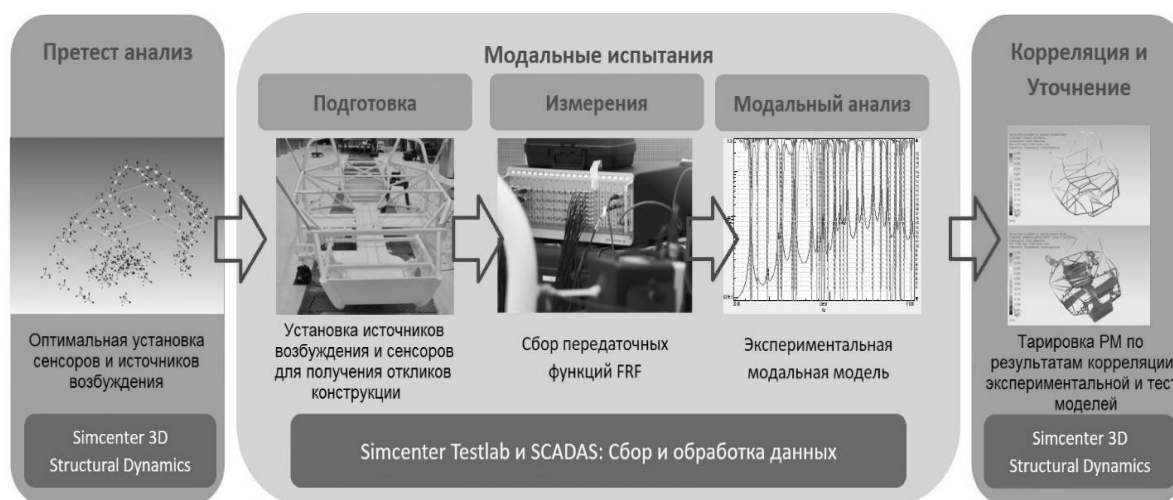


Рис. 4. Расчетно-экспериментальная отработка изделий

На *третьем этапе* в Simcenter 3D производится корреляция расчетных и экспериментальных данных на уровне «тест» и «экспериментальной» моделей. Дальнейшее уточнение (тарировка) РМ производится на основе корреляции «экспериментальной» и «тест» моделей с применением оптимизатора Simcenter Nastran Sol 200 [5]. Оптимизации подвергается конечно-элементная структура РМ за счет изменения величины дискретизации сеток, параметров материала, ввода специальных конечных элементов и т.п. При этом целевая функция направлена на совпадение расчетных и испытательных собственных частот, их амплитуд и форм колебаний с учетом экспериментальных коэффициентов демпфирования. В результате получается тарированная РМ, результаты расчета собственных частот и откликов на динамические воздействия которой с минимальной погрешностью совпадают с результатами испытаний. Это уже верифицированная по результатам испытаний математическая модель изделия.



Рис. 5. Установка (вывешивание) экспериментального образца ПТС



Рис. 6. Источник возбуждения вибрационной нагрузки

На основе верифицированной математической модели можно провести и другие расчетные исследования, которые невозможно воспроизвести на имеющемся испытательном оборудовании ввиду массогабаритных характеристик изделия. Верифицированные математические модели также могут использоваться в рамках Simcenter Amesim для общесистемных расчетных исследований.



Рис. 7. Динамический молоток для возбуждения ударного воздействия

Заключение

При описанном расчетно-экспериментальном подходе («модельно-ориентированных испытаний») минимизируется субъективизм инженеров, большое количество классических экспериментов заменяется модальными испытаниями с последующей расчетной отработкой на верифицированных моделях. Это особенно важно при проектировании крупногабаритных изделий ПТС, когда нет возможности проведения испытаний ввиду их дороговизны или ввиду отсутствия испытательного оборудования требуемой мощности или требуемых характеристик. Данный подход позволяет проводить расчетно-экспериментальную отработку оборудования не только для АСУ, но и для большого количества крупногабаритного оборудования, устанавливаемого на АЭС. Речь идет об оборудовании и конструкциях, которые ввиду массогабаритных характеристик невозможно испытать на классических вибростендах.

Расчетно-экспериментальный подход реализован в рамках плановой тематики службы Главного конструктора по АСУ ТП в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и планируется к внедрению в процессе проектирования конструкций ПТС.

Библиографический список

1. ГОСТ 25804.3-83. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Требования по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам.
2. **Зенкевич, О.К.** Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. **Кожевников, С.В.** Моделирование конструкций ПТС / С.В. Кожевников, А.А. Миронов. // Сборник материалов XV Международной молодежной научно-техн. конф. «Будущее технической науки». – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017.
4. Оценка работоспособности электрорадиоизделий в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры при динамическом нагружении / С.В. Кожевников, С.А. Пименов. // Сборник докладов 12-й научно-технической конференции «Молодежь в науке». – Саров: изд-во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014.
5. NX Nastran Numerical Methods User's Guide [Electronic version] / – UGS, 2005. – From: http://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/custom/numerical/numerical.pdf.

*Дата поступления
в редакцию: 25.03.2020*

S.V. Kozhevnikov, S.A. Pimenov

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL PROCESSING
OF SOFTWARE AND HARDWARE**

Measuring System Research Institute n.a. Yu.Ye. Sedakov

Purpose: Consideration of influence of external factors on the equipment of the automated process control system of NPP as an important component for obtaining reliable and competitive goods. At the present development stage the need arose for linking tests with computational (numerical) modeling as part of the computational and experimental processing. The implementation of the computational and experimental processing of products is considered within Simcenter platform use and in relation to software and hardware products that are subject to various dynamic mechanical loads.

Design/methodology/approach: A classical computational (numerical) simulation is carried out by construction of a computational model in the form of a finite element structure associatively associated with a 3D geometric model under loading and fixing conditions applied. Within preparation of modal tests, installation (hanging-out) of an experimental product sample is carried out. Calculated and experimental data are correlated by Simcenter 3D at the level of “test” and “experimental” models. The subsequent refinement (calibration) of the calculation models is based on the correlation of the “experimental” and “test” models using Simcenter Nastran Sol 200 optimizer. On the basis of the verified mathematical model, it is possible to carry out computational studies that cannot be reproduced on existing test equipment or are impossible due to weight and size characteristics of the product.

Conclusions: As a result of such computational and experimental approach, the subjectivity of engineers is minimized; a large number of classical experiments are replaced by modal test followed by calculated testing on verified models.

Key words: software and hardware, numerical simulation, estimated mining, experimental testing, radio-electronic equipment, generating unit, main control room, nuclear power plant.

С.В. Попов¹, А.В. Бишлетов²

ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ СЕТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С АВТОНОМНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Волжский государственный университет водного транспорта¹
ООО «Электро Лэнд»²

Рассмотрена проблема применения стандартных устройств защиты сети при параллельной работе с автономным генератором. Использование устройств защиты является обязательным требованием при параллельной работе автономных генераторов с сетью, от их корректной работы зависит безопасность работы обслуживающего персонала со стороны питающего фидера сети или высокого напряжения. Указаны особенности и физические принципы работы таких устройств, а также сложность в их настройке для выполнения точного определения отключения сети без ложных срабатываний. Приведено обоснование для разработки нового устройства, которое было реализовано на базе контроллера Siemens. Показан новый алгоритм работы устройства защиты сети и описаны результаты его апробации в составе электрооборудования автономной электростанции котельной. Алгоритм защиты сети может быть использован в составе автоматизированных электроэнергетических установок, где предусмотрена параллельная работа генерирующих агрегатов с сетью.

Ключевые слова: электроснабжение, автономная электростанция, параллельная работа с сетью, генерирование электроэнергии, устройства защиты сети, векторные диаграммы синхронного генератора.

Для качественного и бесперебойного электроснабжения потребителей необходимо надежное согласование всех элементов энергосистемы: источника электроэнергии, сети, нагрузки и устройств защиты. Особую роль здесь играют устройства защиты источников и потребителей от возможных аварийных режимов в энергосистеме.

В автономных электростанциях, как правило, в качестве источников электроэнергии используют синхронные генераторы, приводимые в действие различными видами двигателей (дизельные, газо-поршневые и др.) Для повышения эффективности работы автономной электростанции, а также для снижения себестоимости вырабатываемой электроэнергии синхронный генератор могут включать в режим параллельной работы с сетью. Такой режим работы автономной электростанции не является основным и применяется при незначительном дефиците электроэнергии для штатного питания электропотребителей объекта. Режим параллельной работы автономного генератора с сетью также применяется на объектах первой категории, когда необходимо бесперебойное электроснабжение. В таком случае при отключении какого-либо источника электроснабжение не прекращается. Следует отметить, что система АВР (автоматический ввод резерва) и система автоматического запуска АДГ (аварийный дизель-генератор) обеспечивают подачу питания на потребителей, но не его бесперебойность.

Существует несколько вариантов обеспечения бесперебойности электроснабжения:

- размещение автономного источника переменного тока для параллельной работы с сетью, либо другим источником;
- внедрение индивидуальных ИБП (источник бесперебойного питания) для ответственных потребителей;
- установка системы хранения электроэнергии большой мощности.

Выбор любого направления является технико-экономической задачей, которая решается для каждого объекта индивидуально. Следует отметить, что на одном объекте могут быть использованы предложенные решения в различной комбинации.

На примере реализованной электростанции на рис. 1 показана схема системы электроснабжения объекта [1].

На схеме обозначено: G1 – аварийный дизель-генератор, G2 и G3 – основные автономные генераторы, АВР – автоматический ввод резерва, ИБП1 и ИБП2 – источники бесперебойного питания.

В штатном режиме работы нагрузка может получать электропитание как от сети, так и от генератора или генераторов, работающих параллельно. Синхронизация генераторов между собой, прямая и обратная синхронизация генераторов с сетью выполняется автоматически. Система автоматики выполняет все виды защиты генераторных агрегатов и контроль параметров напряжения сети.

В нештатном режиме, когда генераторный агрегат работает параллельно с сетью, по каким-либо причинам может произойти отключение цепи питания на действующем фидере. Отключение может иметь место как на вторичной обмотке трансформатора, установленного на распределительной подстанции, так и на его первичной обмотке. В этом случае основная опасность заключается в том, что сетевой контактор КМ_С, как и генераторный контактор КМ_Г, остаются включенными, следовательно, напряжение от генератора будет приложено к питающему фидеру. Соответственно, фидер, отходящий от подстанции, как и электрооборудование, включенное в эту цепь, будут под напряжением.

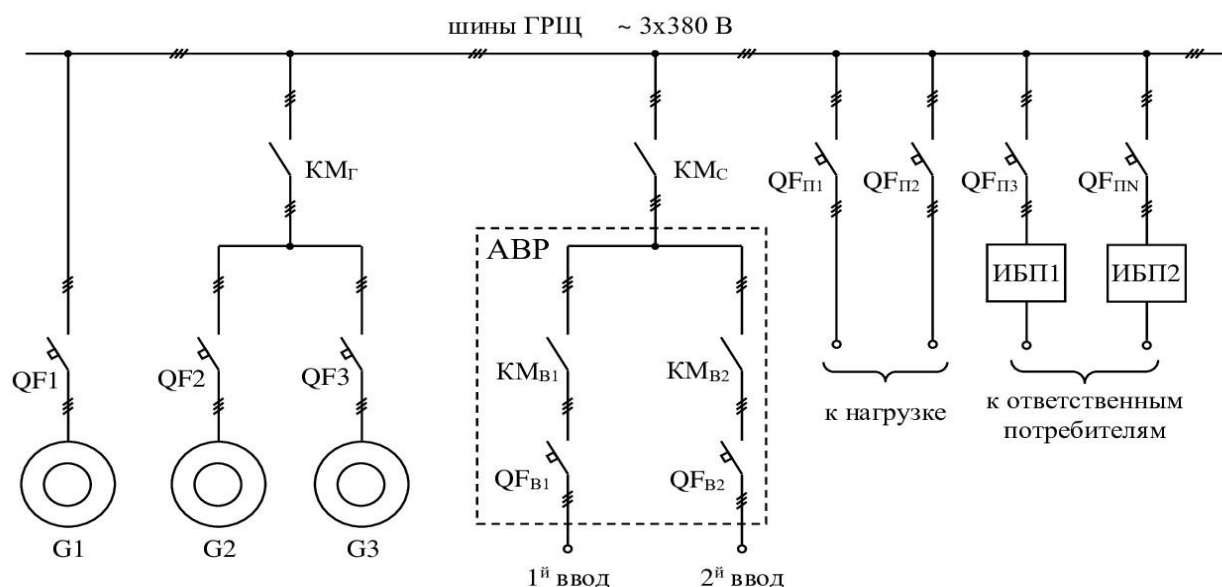


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения

Именно по этой причине в системах генерирования и распределения электроэнергии, работающих на сеть, должна быть установлена защита сети от подачи напряжения со стороны автономных источников.

Для определения отключения напряжения сети при параллельной работе выполняются:

- контроль скорости изменения напряжения;
- контроль скорости изменения мощности;
- контроль скорости изменения частоты генератора;
- защита от броска вектора.

Современная электротехника предлагает устройства защиты сети, работающие на основе контроля скорости изменения частоты, что позволяет обнаружить потерю напряжения сети за достаточно малый период времени [2]. Измерения скорости изменения частоты может выполняться двумя путями, либо за счет контроля времени между моментами перехода

напряжения через ноль, либо методом разложения напряжения в ряд Фурье, который позволяет определить частоту основной гармоники. Первый способ достаточно прост и не требует сложной обработки входных сигналов. Именно это позволяет применять этот метод обработки сигналов в многофункциональных и недорогих контроллерах. Второй способ требует выполнения более сложных вычислительных алгоритмов, поэтому используется в реле защит специального назначения.

Защита от броска вектора основана на внезапном отключении фидера питания основной сети, при этом нагрузка будет обеспечиваться электропитанием только от генератора. Алгоритм защиты сети выполняет сравнение длительности полупериодов напряжения предыдущего и последующего. При превышении полученного результата выше установленного значения алгоритм формирует сигнал об отключении сети. Схема замещения цепи распределения электроэнергии показана на рис. 2. При замкнутом контакторе КМ_С электроэнергия в нагрузку поступает от генератора – основная часть, и от сети – малая часть (10-20 % $P_{НОМ}$). Векторная диаграмма для параллельной работы генератора и сети на общую нагрузку показана на рис. 3, а. При отключении сетевого контактора КМ_С нагрузка сети мгновенно перебрасывается на генератор. При этом ток генератора, как и значение вектора E_G , увеличиваются и смещаются на некоторый угол (рис. 3, б). В результате угол нагрузки θ увеличивается на угол $\Delta\theta$. Для смещения вектора напряжения в диапазоне срабатывания защиты необходимо, чтобы разница между мощностью генератора на момент перехода в автономный режим и нагрузкой автономного участка находилась в пределах 20-30 %.

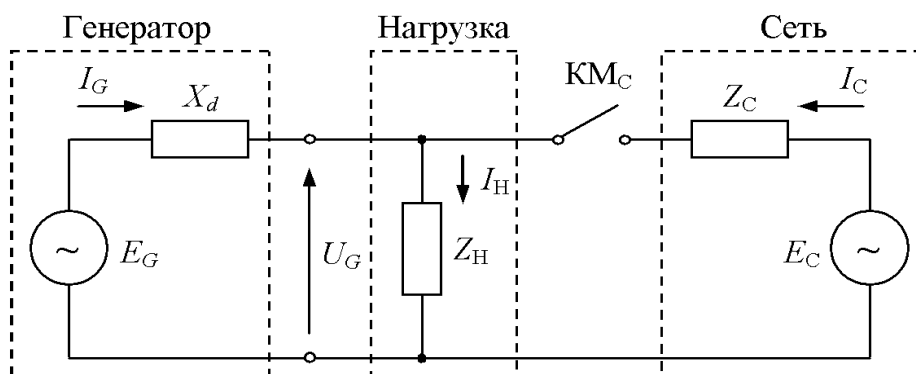


Рис. 2. Схема замещения цепи распределения электроэнергии

Опыт эксплуатации показал, что реле защиты, работающие на принципе вычисления смещения вектора, имеют ложные срабатывания, например, при пуске потребителя значительной мощности. Смещение уставок срабатывания реле не приводит к желаемому результату.

Поскольку система автоматики и управления автономной электростанцией выполнена на базе промышленного контроллера, функция по защите сети была реализована внедрением дополнительной программы [3]. Алгоритм защиты (рис. 4) при отключении сети заключается в контроле значения мощности сети, значения наброса мощности и времени нарастания нагрузки.

Анализ параметров значения наброса мощности, как и времени нарастания нагрузки, не всегда являются показателями отключения сети, поскольку многочисленная нагрузка, обладающая активным и активно-индуктивным характером, вызывает схожие переходные процессы. Поэтому в алгоритме присутствует проверка значения мощности сети, которая будет иметь нулевое значение при отключении сети.

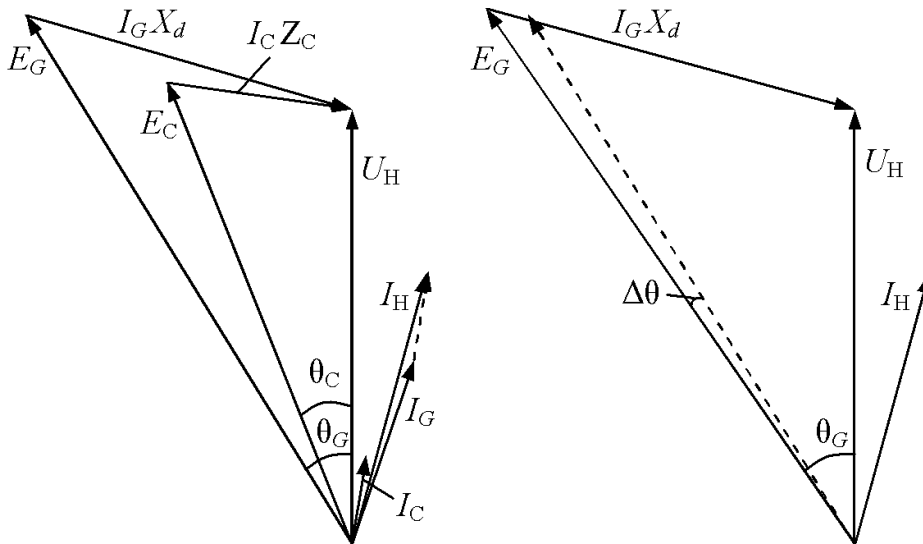


Рис. 3. Векторные диаграммы синхронного генератора:
 а) работающего параллельно с сетью, б) при отключении сети

Следует отметить, что в штатных режимах работы, даже если в соответствии с техническими требованиями ток в сети должен быть равен нулю, практически их выполнить не представляется возможным [4]. В любом случае при стремлении поддержания мощности сети равно нулю будут происходить «перетоки» мощности как активной, так и реактивной (в большей степени) от генератора в сеть и из сети в нагрузку.

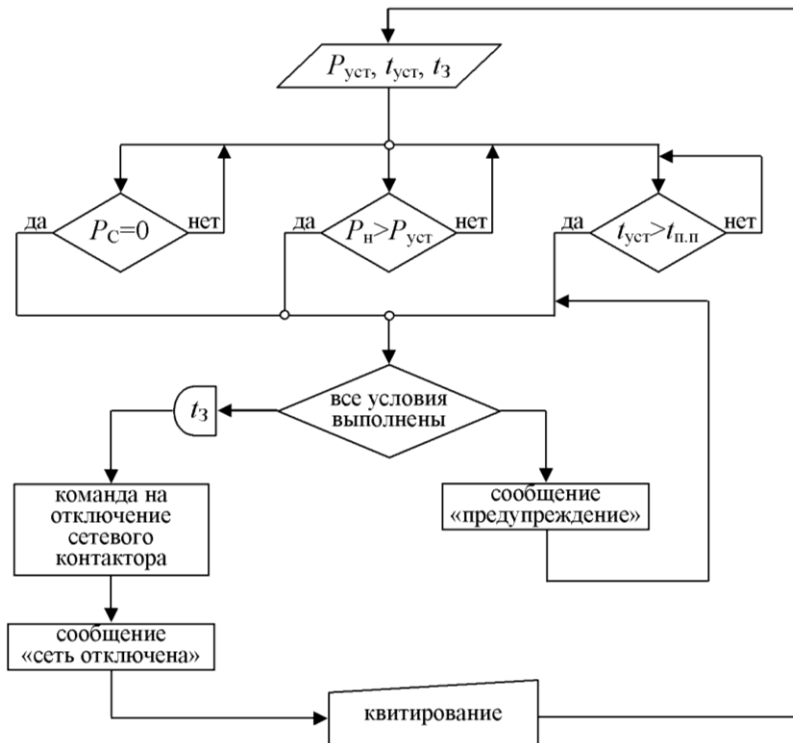


Рис. 4. Алгоритм реализации защиты сети
 $P_{уст}$, $t_{уст}$, $t_з$ – уставка мощности, минимального времени и времени задержки соответственно; P_C – мощность сети; P_H – мощность нагрузки; $t_{п.п.}$ – время переходного процесса.

Приведенный алгоритм был реализован в виде подпрограммы на базе контроллера Siemens, который выполняет основные функции по контролю параметров, автоматического запуска и остановки газопоршневых машин с их последующей синхронизацией и распределением нагрузок.

Проверка работоспособности системы защиты показала свою эффективность путем симулирования процесса отключения сети при параллельной работе с генератором за счет выключения вводного автомата. Последующее включение сетевого автомата приводит к запуску алгоритма обратной синхронизации генератора с нагрузкой к сети и распределению нагрузки в соответствии с установленными значениями. В течение двух лет эксплуатации ложных срабатываний при запуске мощных потребителей объекта зарегистрировано не было.

Библиографический список

1. **Попов, С.В.** Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети / С.В. Попов, Е.М. Бурда // Материалы научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. – С. 8-11.
2. **Алексеев, Н.** Контроллеры DEIF. Защита автономного генератора, работающего параллельно с сетью / Н. Алексеев, Г. Ростиславин // Информационно-справочное издание «Новости электротехники». – №32 (38). – 2006.
3. **Попов, С.В.** Особенность работы автономной электростанции параллельно с сетью. Флотское образование и отраслевая наука. Вызовы и перспективы развития / С.В. Попов, А.В. Бишлетов, В.В. Гуляев, М.Ю. Храмов // Материалы VII Международной научно-практической конференции в рамках программы проведения торжественных мероприятий, посвящённых празднованию 100-летия Астраханского речного училища (Астрахань, 11-12 декабря 2018 г.) – Астрахань: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 106-110.
4. **Коробко, Г.И.** Система автоматической загрузки генератора при работе параллельно с сетью // Г.И. Коробко, С.В. Попов, А.В. Бишлетов // Актуальные проблемы электроэнергетики. Юбилейный том, посвященный 100-летию со дня рождения В.И. Плескова. – Т. 70. –2008. – С. 123-125.

*Дата поступления
в редакцию: 24.08.2020*

S.V. Popov, A.V. Bishletov

NETWORK SECURITY FEATURES WHEN WORKING IN PARALLEL WITH AN AUTONOMOUS GENERATOR

Volga State University of Water Transport
ООО «Electro Land»

Purpose: The article deals with the problem of using standard network protection devices when working in parallel with an Autonomous generator.

Design/methodology/approach: The use of protection devices in parallel operation of Autonomous generators with the network is a mandatory requirement and their correct operation depends on the safety of service personnel on the part of the network feeder or high voltage. The features and physical principles of operation of such devices are specified, as well as the difficulty in configuring them to perform accurate detection of network disconnection without false positives. The rationale for the development of a new device, which was implemented on the basis of a Siemens controller, is given.

Originality: A new algorithm of the network protection device operation is shown and the results of its testing as part of the electrical equipment of an Autonomous power plant in a boiler house are described. The network protection algorithm can be used as part of automated power plants, where parallel operation of generating units is provided.

Key words: power supply, autonomous power plant, parallel operation with the network, power generation, network protection devices, vector diagrams of a synchronous generator.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 630.377

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_93

В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Описаны назначение и область применения разрабатываемой многофункциональной колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины (ВСРМ) с интеллектуальной системой управления; представлены ее характеристики и области применения для работы на уклонах. Дана оценка колесной ВСРМ по степени сохранения окружающей среды в соответствии с тремя параметрами: степенью сохранения лесопокрытой площади, степенью минерализации почвы и степенью лесовосстановления. Представлены требования, положенные в основу технических характеристик разрабатываемой отечественной колесной ВСРМ.

Ключевые слова: колесный харвестер, харвестерная головка, сортиментные лесозаготовки, манипулятор, технологическое оборудование.

Введение

Мировой парк колесных лесозаготовительных машин в настоящее время исчисляется десятками тысяч, а количество их моделей – сотнями. В целях создания новых образцов разрабатываются статистические модели для оценки и выбора наиболее рациональных параметров, максимально полно отвечающих условиям их применения. Проектирование колесных лесозаготовительных машин связано, в первую очередь, с анализом развития существующих аналогичных конструкций. Помимо этого, с технологическими и технико-экономическими требованиями к колесной лесозаготовительной системе связана природно-производственная среда, также подчиняющаяся вероятностным закономерностям и усугубляющая стохастичность параметров колесных лесозаготовительных машин.

Разнообразные природно-климатические условия эксплуатации и особенности технологии лесозаготовок требуют создания лесозаготовительных систем с варьируемыми параметрами. При этом, чем шире диапазон условия эксплуатации, тем универсальнее должна быть машина, и тем шире диапазон ее параметров. Как в нашей стране, так и за рубежом, лесозаготовки проводятся в широком диапазоне природно-климатических условий; такая их деконкретизация приводит к расширению вероятностных границ характеристик и параметров колесных лесозаготовительных систем. Тем не менее, статистический анализ показал, что закономерность появления наиболее вероятных значений параметров всегда может быть установлена.

Таблица 1.

**Прогноз производства круглого леса (млн м³)
в РФ по различным сценариям развития лесной промышленности**

Показатели	2020	2025	2030
Инновационный	207,1	248,8	301,2
Умеренный	191	231,8	259,4
Инерционный	188,7	203,1	232,4

Рост лесозаготовок по разным сценариям развития экономики в РФ на период до 2030 г. представлены в табл. 1. Даже по умеренному сценарию развития заготовка леса к 2030 г. может увеличиться на 78,2 млн м³ и составить 259,4 млн м³. В России широкое применение нашли сортиментные технологии лесозаготовки (CTL). Эти технологии предусматривают использование комплектов машин: харвестер+форвардер. Большинство этих машин производится за рубежом. В связи с прогнозируемым ростом лесозаготовок в РФ, актуальным и экономически выгодным представляется организация производства лесозаготовительных машин на отечественных предприятиях.

В рамках договора между НГТУ имени Н.Э. Баумана и ПАО «КАМАЗ» в настоящее время выполняется научно-исследовательская, опытно-конструкторская и технологическая работа, связанная с созданием комплекса современных лесозаготовительных машин, включающего в себя две машины – валочно-сучкорезно-раскряжевую (ВСРМ) и погрузочно-транспортную (ПТМ). Харвестеры и форвардеры отечественного производства должны учитывать природно-производственные условия России.

В настоящей работе приводятся результаты исследований работы харвестеров и форвардеров в природно-производственных условиях России. Используются данные, приведенные в [1-6]. Полученные результаты позволяют обосновать характеристики харвестерных головок и манипуляторов с учетом природно-производственных условий основных лесозаготовительных регионов России.

Систематизация и анализ технологического оборудования ВСРМ и предложенные варианты харвестерных головок позволят более грамотно разработать эскизный и технический проект на харвестер и разработать рабочую конструкторскую документацию на машину. Это даст возможность упростить и удешевить процесс разработки, изготовления и доводки опытных образцов и организацию серийного производства ВСРМ. Кроме того, это позволит сократить номенклатуру запасных частей, упростить ремонт и техническое обслуживание машин и применяемого в их составе технологического оборудования и снизить трудовые затраты за счет правильного и грамотного обслуживания, хранения и эксплуатации.

Назначение и область применения многофункциональной ВСРМ с интеллектуальной системой управления

В состав разрабатываемого комплекса лесозаготовительных машин входят: харвестер (ВСРМ) и форвардер (погрузочно-транспортная машина). Харвестер предназначен для спиливания одиночных деревьев в эксплуатационных лесонасаждениях, подтаскивания их на технологический коридор (волок), обрезки сучьев и раскряжевки ствола с программным отмером длин и учетом сортиментов. Он состоит из базового колесного шасси и технологического оборудования для валки деревьев. В состав шасси входят рама, моторная установка, трансмиссия, баки, кабина, ходовая часть, в состав технологического оборудования входят система управления, манипулятор и харвестерная головка (ХГ).

Природно-производственные и климатические условия эксплуатации машины должны отвечать следующим требованиям:

- рельеф местности – равнинная и слабопересеченная местность с уклонами до 15°, максимальный преодолеваемый угол подъема не более 20°;
- почвенно-грунтовые условия – первой, второй и третьей лесоэксплуатационной категории [7-9].

Харвестер представляет собой самоходную машину на колесной или гусеничной базе. Разрабатываемый колесный образец (8×8) с передним расположением манипулятора показан на рис. 1.



Рис. 1. Разрабатываемый колесный харвестер (8×8)

Харвестер относится к многооперационным машинам, так как он выполняет несколько технологических операций (спиливание дерева, обрубку сучьев, деление на сортименты (раскряжевку) и учет получаемых сортиментов). При разработке лесосеки машинами работы начинаются с рубки зоны безопасности, погрузочной площадки, магистральных и пасечных волоков. В целях безопасной работы на одной пасеке производится только обработка деревьев харвестером или только подбор с последующей транспортировкой полученных сортиментов форвардером к лесовозной дороге в штабели запасов. Для исключения разворота машины на пасеке предварительно намечаются переезды между волоками.

Машина, передвигаясь по волоку, начинает разработку лесосеки. Харвестер необходимо установить таким образом, чтобы головку можно было навести на дерево без задевания других деревьев. Желательно, чтобы обзор из кабины на место пропила был наилучшим. Валку надо производить, начиная с ближайших деревьев и заканчивая наиболее удаленными. Расстояние переноса деревьев следует стремиться делать минимальным. Последовательность выполнения работ следующая.

ХГ следует поднять в положение валки, раскрыть вальцы с сучкорезными ножами, подвести головку к дереву и захватиться за него ножами и вальцами. Можно захватиться и выше пропила, а затем опустить головку до земли. Необходимо установить ХГ таким образом, чтобы ствол дерева находился в ее центре. Важно чтобы головка не касалась земли или корней. До валки дерева необходимо убедиться, что в опасной зоне нет людей и линий электропередач. Необходимо учитывать направление ветра, наклон спиливаемого дерева и только после этого решить в какую сторону можно направить его повал. После того, как сучкорезные ножи и вальцы плотно охватили ствол, необходимо манипулятором сделать небольшой «натяг» вверх. Включением пилы следует произвести сквозной пропил. После возвращения пильной шины обратно под кожух ствол дерева отделяется от пня; этот момент идентифицируется через его «вздрагивание». Подъемом и поворотом манипулятора нужно обеспечить повал дерева в нужную сторону. Не рекомендуется поднимать головку высоко над землей, тогда верхушка дерева ударяется о землю, поскольку это создаст большую ударную нагрузку на конструкцию манипулятора и головки. Целесообразно начать продвижение дерева через ножи с помощью вальцов в процессе его валки. Это облегчает обрезку сучьев, так как вес дерева способствует его прохождению через ХГ.

Выполняя обработку дерева таким способом, первый сортимент может выйти из головки до того, как дерево ударится о землю. После этого оператор задает программу раскряжевки хлыста на сортименты определенной длины. Далее, дерево может обрабатываться в автоматическом режиме, производя протаскивание на определенную длину и отпиливание

сортиментов. Вместе с протаскиванием дерева производится очистка его от сучьев, объемный и штучный учет полученных сортиментов. Оставшаяся вершинная часть дерева сбрасывается реверсивным ходом вальцов в место накопления сучьев, после чего цикл повторяется.

ХГ, помимо спиливания деревьев, должна обеспечивать качество получаемых в процессе обработки деревьев круглых лесоматериалов в соответствии с ГОСТ 9462-88 (лиственных пород) и ГОСТ 9463-88 (хвойных пород). При работе харвестера на волоке с одной стороны образуется вал из сучьев и вершинок, а с противоположной стороны – пачки из сортиментов, которые затем с помощью погрузочно-транспортной машины (форвардера) подают к лесовозной дороге в штабель. Сучья можно использовать для укрепления волоков на переувлажненных грунтах.

Последовательность работы ВСРМ заключается в следующем [10]. Оператор, двигаясь по лесосеке, выбирает наиболее лучшую позицию машины по обзору и беспрепятственному доступу технологическим оборудованием относительно спиливаемых деревьев. Затем оператор переводит ХГ из горизонтального положения в вертикальное, чтобы открыть ножи (захваты) ХГ и обхватить ими спиливаемое дерево в районе комлевой части. После закрытия ножей оператор спиливает дерево при помощи пильного механизма ХГ и осуществляет ее валку. Дерево, находясь в горизонтальном положении, протаскивается вальцами (рябухами) ХГ на необходимую оператору длину; при этом происходит срубание сучьев при помощи ножей ХГ, затем происходит отпил сортимента определенной длины. Данный процесс повторяется до тех пор, пока дерево целиком не будет обработано.

После обработки всех деревьев, находящихся в зоне действия технологического оборудования, машина перемещается чуть дальше и снова выполняет аналогичные технологические операции.

Параметры и области применения колесной ВСРМ для работы на уклонах

Наметившаяся за последние годы тенденция смещения лесозаготовок в холмистую и горную местности выдвигает в ряд первоочередных задач создание валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин для работы на уклонах. Следует заметить, что харвестер, способный работать на уклонах, может с успехом использоваться и в равнинной местности.

Характеристика рельефа местности, на которой можно осуществлять заготовку леса, делится на три группы.

К *первой группе* относится местность с уклоном до 15° . В данных условиях лесозаготовительные машины без ограничения и круглогодично могут осуществлять свою работу.

Ко *второй группе* относится местность с уклоном от 16° до 25° . В данных условиях работа лесозаготовительных машин возможна в сухую погоду летнего периода времени.

К *третьей группе* относится местность с уклоном более 26° . В данных условиях запрещено проводить лесозаготовки машинами, при этом допускается использование специального лебедочного трелевочного оборудования [11-14].

Согласно данным [11], на уклонах более 15° площадь территорий, предназначенных для проведения лесозаготовительных операций, составляет всего около 10 %, а для уклонов свыше 26° – всего 3 %.

Для характеристики условий эксплуатации разрабатываемого комплекса машин необходимо указать предельную крутизну склонов, на которых могут работать машины с выполнением всех технологических операций, а в качестве дополнительных характеристик могут быть указаны предельные углы подъема, спуска и крена, преодолеваемые машиной (ГОСТ 4.373, п. 1.23). В пояснительной записке показано, что около 90 % лесопокрытых площадей расположено на местности с крутизной склонов до 15° , что является основанием для характеристики области применения машин по параметру крутизны склонов.

Технические характеристики колесных ВСРМ (харвестеров), закупаемых лесозаготовительными предприятиями России, ориентированы преимущественно для работы в равнинной и слабопересеченной местности (рис. 2 и 3).



Рис. 2. Работа харвестера Ponsse ScorpionKing в равнинной и слабопересеченной местности в летних условиях

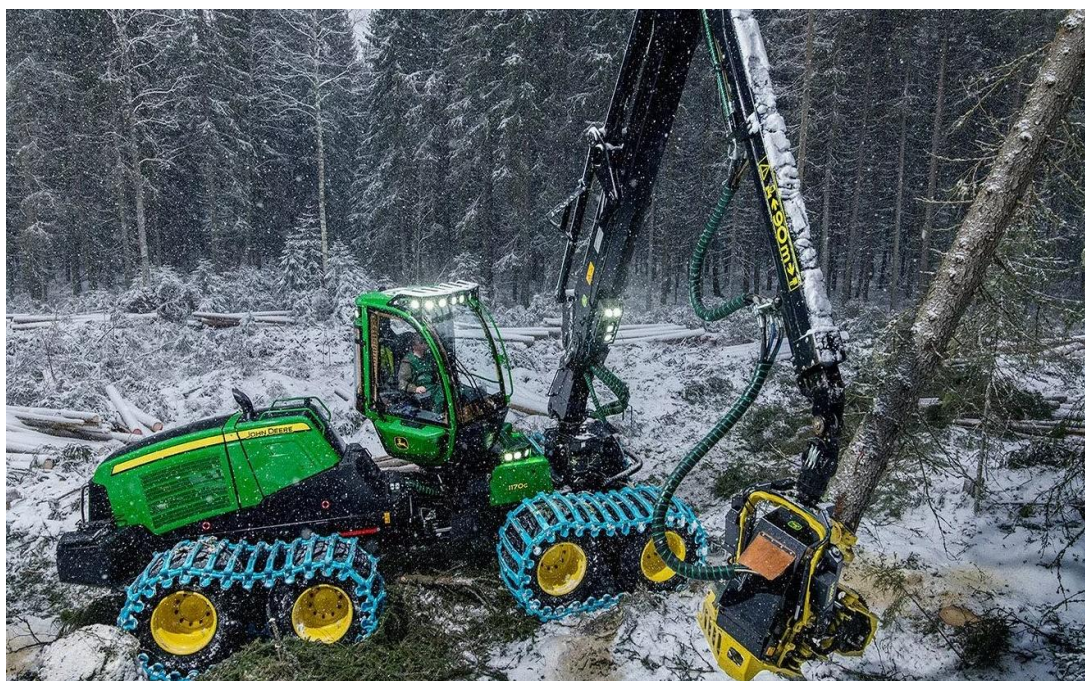


Рис. 3. Работа харвестера JohnDeere 1170G в равнинной и слабопересеченной местности в зимних условиях

В основу технических характеристик разрабатываемой отечественной колесной ВСРМ положены следующие требования.

1. Условия эксплуатации – равнинная и слабопересеченная местность с уклонами до 15° .
2. Машина должна преодолевать уклоны до 20° .
3. Колона манипулятора (наклонный стол) должна иметь механизм выравнивания при движении машины вдоль или поперек склона с обеспечением угла наклона назад/вперед $20/20^\circ$.
4. Кабина должна иметь механизм выравнивания при движении машины вдоль или поперек склона с обеспечением угла наклона продольного $\pm 20^\circ$; угла наклона бокового $\pm 7^\circ$.
5. Кабина должна иметь механизм поворота, обеспечивающий угол поворота 310° .
6. Колесная ВСРМ при работе с лесонасаждениями объемом хлыста до $1,0 \text{ м}^3$ и на уклонах должна обладать необходимой устойчивостью.
7. Колесная ВСРМ должна иметь клиренс, достаточный для пропускания под собой пней, камней и отдельно лежащих деревьев.
8. Колесная ВСРМ должна обладать надежностью на уровне лучших отечественных и зарубежных машин подобного класса.

Оценка колесной ВСРМ по степени сохранения окружающей среды

Являясь одним из немногих восполняемых природных ресурсов, а также национальным богатством страны, лес служит не только лесосырьевой базой и источником разнообразной недревесной продукции, но и мощным природоохранным и регулирующим фактором. Поэтому необходимо, удовлетворяя потребности народного хозяйства в древесине и недревесной продукции, обеспечить в то же время благоприятное влияние лесов на окружающую среду, сохранить защитно-регулирующие, средообразующие и другие полезные свойства лесных насаждений. В процессе проведения лесозаготовительных работ избежать вредного воздействия на лесную экосистему со стороны применяемых лесозаготовительных машин невозможно. К вредному воздействию на лесную экосистему можно отнести уплотнение почвы, что негативно сказывается на молодом подросте, воздействии на древостой и других компонентах лесной экосистемы.

Существуют три основных показателя, по которым оценивается степень сохранения окружающей среды. К первому относится сохраненная площадь земли, покрытая лесом в процентном соотношении; второй показывает процентное соотношение минерализации почв, третий – процентное соотношение площади восстановленного лесного фонда.

Оценка по степени сохранения лесопокрытой площади

Вылет манипулятора на разрабатываемой валочно-сучкорезно-раскряжевой машине предусматривается от 8 до 10 м. При максимальном вылете манипулятора 8 м ширина пасеки равняется 16 м, а при вылете 10 м – 20 м. Например, при проведении выборочных рубок при ширине лесосеки 160 м и вылете манипулятора 8 м потребуется 10 пасечных волоков, а при вылете манипулятора 10 м – 8 пасечных волоков. Длину лесосеки примем 500 м.

Лесопокрытая площадь определяется по формуле (1):

$$S_{лес} = a \times b, \quad (1)$$

где a – ширина лесосеки, (160 м); b – длина лесосеки (500 м).

Тогда $S_{лес} = 8 \text{ га}$.

При ширине технологического волока 5 м общая площадь пасечных волоков при максимальном вылете манипулятора 8 м (2):

$$S^8 = 500 \times 5 \times 10 = 2,5 \text{ га}. \quad (2)$$

Процент вырубаемой под волока лесопокрытой площади составит: $P_8 = 31,25 \%$.
При максимальном вылете манипулятора 10 м (3):

$$S^{10} = 500 \times 5 \times 8 = 2,0 \text{ га.} \quad (3)$$

Процент вырубаемой под волока лесопокрытой площади составит: $P_{10} = 25 \%$.

В итоге, в зависимости от вылета манипулятора, степень сокращения лесопокрытой площади при выполнении выборочных рубок леса колеблется от 25 % до 31,25 %. Наиболее благоприятный режим рубок при вылете манипулятора 10 м.

Оценка по степени минерализации почвы

Под пологом леса, как правило, формируются почвы с очень высокими водно-физическими свойствами. Под влиянием хозяйственных мероприятий эти свойства претерпевают существенные изменения. Их характер зависит не только от вида мероприятий, но и от их технологии. При рубках леса ухудшаются водно-физические свойства почвы в результате ее уплотнения и снижения пористости. Минерализацию – важный показатель, от которого зависят водно-физические свойства почвы, делят на три категории: слабая, средняя и сильная [15]. Механическое воздействие на почву при заготовке древесины по рассматриваемым вариантам технологии производят ВСРМ при перемещении по лесосеке [16]. Повышается вероятность разрушения и уплотнения грунта при обработке деревьев ВСРМ под движителем. Ширина одного колеса харвестера составляет 0,71 м, двух – 1,42 м.

С учетом рассмотренного примера, при разработке лесосеки харвестером с вылетом манипулятора 8 м суммарная минерализованная полоса от движителя харвестера составит 7100 м², что составляет 8,9 % от общей площади лесосеки. При разработке этой же лесосеки харвестером с вылетом манипулятора 10 м суммарная минерализованная полоса от движителя составит 5680 м² или 7,1 %. Разница составляет около 2 %.

Оценка по степени лесовосстановления

Лесовосстановление на вырубках ведется двумя способами – искусственным и естественным. При искусственном способе ведется посев семян или посадка сеянцев, при естественном – максимальное сохранение подростка при рубке и разброс семян ветром от стены стоящего леса или отдельных деревьев, оставленных на лесосеке для этих целей. Естественное лесовосстановление имеет ряд недостатков (сменяемость породы на менее ценные, замедленный рост, требуются рубки прореживания и т.п.), поэтому за рубежом от него давно отказались. Так, в США через год все вырубленные площади полностью засаживаются сеянцами. В табл. 2 приведены сводные показатели воздействия харвестера с вылетом манипулятора 8 и 10 м на окружающую среду.

Таблица 2.

Показатели воздействия харвестера на лесную среду

Наименование техники	Вырубаемая площадь под волока, %	Минерализация почвы, %	Сохранение подростка (по площади), %
Харвестер колесный с вылетом манипулятора 8 м	31,25	8,9	68,75
Харвестер колесный с вылетом манипулятора 10 м	25,0	7,1	75,0

Из табл. 2 видно, что в случае изготовления харвестера с вылетом манипулятора 8 м сводные показатели отрицательного воздействия харвестера на окружающую среду (уплотнение и минерализация почвы, площадь лесосеки под волоками) на 1,8-6,25 % выше, чем с вылетом манипулятора 10 м.

Заключение

Анализ тенденций развития лесозаготовительной техники на основе последних мировых достижений лесного машиностроения в современных условиях представляет несомненный интерес. Кратко эти тенденции можно сформулировать так:

- интенсификация процесса лесозаготовок с введением совмещения операций и их непрерывности на некоторых фазах;
- поиски новых технических решений для создания лесозаготовительных машин;
- повышение качества, надежности и долговечности машин за счет совершенствования и внедрения новых высокопрочных материалов;
- повышение комфортабельности и упрощение системы обслуживания и эксплуатации лесозаготовительных машин;
- совершенствование системы управления, частичная или полная автоматизация систем управления с применением интеллектуальных систем управления лесозаготовительной машиной;
- расширение универсальности машин и технологического оборудования;
- повышение мобильности, проходимости, устойчивости и других показателей машин.

Практика лесозаготовок отвергает нежизнеспособные и малоэффективные технические решения, а наиболее удачные технические решения и находки распространяются на другие лесозаготовительные машины. Вместе с тем, принципиальные конструктивные схемы лесных машин к настоящему времени изменились в большинстве случаев незначительно. По-прежнему традиционным остается применение на лесных машинах дизельных двигателей с учетом сложных условий их эксплуатации в лесу. Дизельные двигатели лесных машин имеют, как правило, турбонаддув с сухим воздушным фильтром, улучшенную систему очистки топлива, предварительный подогрев, обеспечивающий надежный запуск в любое время года.

На лесных машинах применяют гидрообъемные бесступенчатые трансмиссии, облегчающие управление и способствующие повышению проходимости и маневренности. На лесных колесных машинах обычно применяют все ведущие мосты с автоматической блокировкой. В четырехосных машинах для привода колес используются балансирные тележки с одно или двухступенчатыми шестеренчатыми передачами. Ходовые системы лесных машин выполняются с учетом жестких требований лесозаготовок. Для колесных лесных машин шина является тем элементом, который, в конечном счете, определяет все важнейшие динамические свойства машины. Выбор специальной лесной шины для лесозаготовительной машины обуславливается стремлением получить высокие тягово-динамические качества и надежность. Удачно выбранная шина обеспечивает высокую проходимость при большой грузоподъемности. Для снижения удельных давлений и повышения тягово-сцепных качеств на балансирных тележках используются гусеничные цепи.

В связи с большой информационной нагрузкой на операторов, к конструкции рабочего места сейчас предъявляются повышенные требования. На большинстве лесозаготовительных машин кабины отличаются высокой эргономичностью: место установки и конструкция кабин обеспечивают хорошую обзорность, кабины снабжаются кондиционером воздуха, для снижения вибраций кабины устанавливаются на амортизаторах, внутренние стенки облицовываются звуко- и теплоизоляционным материалом. На лесных машинах активно применяют интеллектуальные системы управления.

Большое внимание уделяется внешнему эстетическому оформлению лесозаготовительных машин. Как правило, база и технологическое оборудование машины функционально хорошо связаны. Цветовое оформление хорошо выделяет машины на фоне зеленого или заснеженного леса.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.

Библиографический список

1. **Лаптев, А.В.** Обоснование конфигурации и геометрических размеров рабочей зоны колесного харвестера / А.В. Лаптев, А.В. Матросов // Лесной вестник. – 2018. – Т. 22. № 5. – С. 77-85.
2. **Karpachev, S.P.** Simulation modelling of the felling-bunching machine logging operation with the multiple-tree accumulating head / S.P. Karpachev, M A Vykovskiy // IOP Conference Series: Earth Environ. Sci. – 2019. – V. 226, 012021.
3. **Karpachev, S.P.** Simulation modelling of the multioperational felling-bunching machine / S.P. Karpachev, M.A. Vykovskiy // IOP Conference Series: Earth Environ. – 2019. – V. 316, 012018.
4. Комплексная Оценка Эффективности Технологий Лесосечных Работ (на примере конкретных природно-производственных условий) // LAP Lambert Academic Publishing. – 2011. – № 15.
5. **Морозов, Е.В.** Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов / Е.В. Морозов, И.Р. Шегельман, П.В. Будник // Перспективы науки. – 2011. – № 7(22). – С. 183-186.
6. **Чайка, О.Р.** Моделирование работы харвестера на выборочных рубках леса / О.Р. Чайка // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 2 (55).
7. **Шегельман, И.Р.** Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях / И.Р. Шегельман, В.И. Скрышник, А.В. Кузнецов // Ученые записки ПетрГУ. – 2010. – № 4. – С. 66-75.
8. **Клубничкин, В.Е.** Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.В. Редкозубов, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 171-176.
9. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 348-352.
10. **Федоренчик, А.С.** Лесные машины «Амкодор» / А.С. Федоренчик, А.А. Герман, П.А. Протас // учеб.-метод. пособие для студентов специальностей «Лесоинженерное дело», «Машины и оборудование лесного комплекса», «Лесное хозяйство» – Минск : БГТУ, – 2013. – 240 с.
11. **Клубничкин, В.Е.** О проходимости лесозаготовительных машин на гусеничном ходу и агрегатных машин на их базе / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 4 (115). – С. 169-175.
12. **Visser, R.** Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review / R. Visser, K. Stampfer // Croat. j. for. eng. – 2015. – V. 36. – P. 321-331.
13. **Stampfer, K.** Efficiency of mechanised steep terrain harvesting systems. / K. Stampfer. // COFE-CWF Conference. – 2000. – P. 1-4.
14. Виды лесосечных работ, порядок и последовательность их проведения, Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки [Приказ Минприроды России от 27.06.2016, N 367].
15. **Курганова, И.Н.** Оценка скорости минерализации органического вещества почв в лесных экосистемах внутриматерикового умеренного, средиземноморского и тропического муссонного климата / И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню, Л. Галлардо, К.Т. Ем // Почвоведение. – 2012. – № 1. – С. 82-94.
16. **Klubnichkin, E.E.** Theoretical research of soil packing by timber harvester running gear / E.E. Klubnichkin, V.E. Klubnichkin, G.O. Kotiev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 386, 012025.

Дата поступления

в редакцию: 08.08.2020

V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.B. Kartashov

**A BRIEF ANALYSIS OF TRENDS IN THE DEVELOPMENT
OF FORESTRY MACHINES**

Bauman Moscow State Technical University

Purpose: Analysis of trends in the development of logging machines. On the basis of the analysis, the definition of technical characteristics and requirements for them for the developed domestic wheeled harvester.

Design / methodology / approach: It was shown in the work that about 90% of forested areas are located on terrain with a steepness of slopes up to 15°, which is the basis for characterizing the field of application of machines, is the basis for drawing up the requirements presented in the work to the technical characteristics of the wheeled harvester being developed.

Findings: The paper formulated an analysis of trends in the development of forestry equipment, based on the latest world achievements.

Research implications/implications: This article describes the purpose and scope of the developed wheeled harvester with an intelligent control system. It offers parameters and scopes of the wheeled harvester operation on the slopes. It gives environmental impact assessment of the wheeled harvester which includes assessment by preservation of a forested area, by soil disturbance and by forest regeneration.

Originality/value: The materials of the research carried out can be used in the design of similar wheeled forestry machines.

Key words: wheeled harvester, harvester head, cut-to-length, loader, manufacturing equipment.

УДК 629.3.014

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_103

С.Е. Манянин¹, М.Г. Черевастов²**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЯЕМОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА,
СНАБЖЕННОГО ШИНАМИ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина²

С применением расчетной модели транспортного средства, снабженного шинами сверхнизкого давления, в условиях движения по дорогам общего пользования смоделированы два различных вида испытаний: «рывок руля» и «переставка». Получены частотные характеристики вездехода в наиболее вероятном диапазоне управляющих частот. Анализ полученных характеристик позволил сделать вывод о неоднозначном влиянии увеличения боковой жесткости шин, при различных частотах управления, на боковые реакции дороги, приложенные к колесам передней и задней осей. Определена максимальная скорость движения колесной машины, обеспечивающая необходимую безопасность дорожного движения, установлено влияние боковой жесткости шин на ее величину.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, внесение изменений в конструкцию транспортного средства, шины сверхнизкого давления, управляемость автомобиля.

В настоящее время сформировался значительный потребительский спрос на колесные транспортные средства, обладающие повышенной проходимостью. Для обеспечения движения по слабонесущим опорным поверхностям необходимо, чтобы шина обладала высокой эластичностью, в том числе, и в боковом направлении. Однако данное обстоятельство негативно влияет на управляемость и устойчивость транспортного средства по причине меньшей сопротивляемости колес боковому уводу, особенно в условиях передвижения на высоких скоростях по твердым слабдеформируемым опорным поверхностям. В качестве движителя для таких вездеходов широко применяются колеса, снабженные шинами сверхнизкого давления (рис. 1). Тем не менее, эксплуатация колесных вездеходов происходит не только в сложно проходимых местах; также существует значительная потребность в передвижении по дорогам общего пользования, которые сами по себе представляют твердую опорную поверхность. Соответственно, большой интерес представляет исследование поведения (реакции) колесной вездеходной машины при различных управляющих воздействиях водителя, осуществляющего движение по шоссейной дороге.

**Рис. 1. Внешний вид шины сверхнизкого давления**

На улицах и шоссейных дорогах можно часто видеть автомобили (легковые, грузопассажирские), движущиеся в общем потоке на колесах, снабженных шинами низкого давления. Они установлены своими владельцами самостоятельно, только исходя из необходимости передвижения вне дорог с твердым покрытием. Само по себе применение таких шин зачастую не предусмотрено заводами-изготовителями и, на наш взгляд, является не чем иным, как внесением изменения в конструкцию транспортного средства. При этом необходимы изучение их влияния на безопасность дорожного движения и согласование с ГИБДД МВД РФ.

Объектом исследования в настоящей статье является типичный колесный вездеход, где в качестве шин заводом-изготовителем выбраны шины сверхнизкого давления; нами будут рассмотрены особенности его передвижения по дорогам общего пользования. Прежде чем перейти к моделированию испытаний, справочно приведем основные технические параметры вездехода, необходимые для формирования его расчетной модели. За основу нами были приняты характеристики снегоболотохода «Кержак», изображенного на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид снегоболотохода

В технической и научной литературе отсутствуют данные о величине коэффициента сопротивления боковому уводу шин сверхнизкого давления, приводится лишь метод его получения при стендовых испытаниях. Таким образом, в целях устранения неопределенности, нами была применена хорошо зарекомендовавшая себя эмпирическая формула [6,11] (1):

$$K_y = 780 \cdot B_{ш} \cdot (D_{ш} + 2B_{ш}) \cdot (P_{ш} + 98), \quad (1)$$

где K_y – коэффициент сопротивления боковому уводу колеса $\left[\frac{кН}{рад} \right]$;

$B_{ш}$ и $D_{ш}$ – ширина и посадочный диаметр шины [м];

$P_{ш}$ – внутреннее давление воздуха в шине [кПа].

Рабочий диапазон изменения внутреннего давления воздуха в шинах, применяемых на выбранном вездеходе, 1300х700-533 составляет от 15 до 80 кПа. Формула (1) с достаточной точностью может применяться как для радиальных, так и для диагональных шин, с тем лишь исключением, что во втором случае значение коэффициента может снижаться в два раза. Как правило, в рассматриваемом случае применяются диагональные шины.

Для достижения цели нашего исследования в качестве расчетной модели колесной машины применялась плоская одномассовая модель. Планируемые испытания моделировались при полной массе вездехода в 4240 кг. При этом осевая нагрузка на переднюю и заднюю оси соответственно составляла 38 % и 62 % от полной массы. Диапазон изменения коэффициента сопротивления боковому уводу шин сверхнизкого давления с учетом рабочего давления воздуха может составлять от 60 до 190 $\frac{кН}{рад}$. Колесная база транспортного средства

имеет значение 3,45 м. Таким образом, исследуемая колесная машина повышенной проходимости обладает избыточной поворачиваемостью [2, 3, 7, 9]. Особенности передвижения колесных машин повышенной проходимости, снабженных шинами сверхнизкого давления, по дорогам с твердой поверхностью и обладающих недостаточной поворачиваемостью, ранее уже рассматривались [13], изучим далее возможные особые отличия для нашего случая, где поворачиваемость вездехода избыточная. При моделировании испытаний нами учитывались условия и критерии оценки, указанные в ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний». В частности, скорость движения вездехода при испытаниях «рывок руля» выбиралась на 10 км/час меньше предполагаемой максимально допустимой.

Перейдем непосредственно к результатам моделирования. Вначале рассмотрим испытание «рывок руля». При расчетах, используя допущение о мгновенном изменении положения управляемых колес, была определена максимально допустимая скорость движения «Кержака» при прохождении испытаний. Критериями оценки для ее определения стали приведенный угол поворота управляемых колес и время 90 %-й реакции. Так как наш вездеход обладает избыточной поворачиваемостью, мы посчитали целесообразным привести величину критической скорости движения по условиям бокового увода. Расчет данной критической скорости производится по известной формуле, широко применяемой в теории автомобиля [3, 8, 12, 14, 15]. Исходя из вида поворачиваемости, можно также говорить и об отсутствии забросов угловой скорости, по причине аperiodичности переходного процесса [10].

В приведенной ниже таблице указываются предельно допустимые углы поворота управляемых колес, пересчитанные через среднее передаточное число рулевого управления по отношению к углу поворота рулевого колеса, при движении с заданным установившимся боковым ускорением. Справа через косую черту приводятся значения для категории «N₂», с левой – для «M₂».

Таблица 1.

Значения допустимых углов поворота управляемых колес

$a_y, \left[\frac{м}{с^2} \right]$	$\theta_{мин}, [рад]$	$\theta_{макс}, [рад]$
1	0,009 / 0,01	0,024 / 0,025
2	0,018 / 0,023	0,048 / 0,051
4	0,034	0,094

По полученным данным можно сделать следующие выводы (табл. 2). Увеличение боковой жесткости колес, во-первых, приводит к повышению величины критической скорости автомобиля по условию бокового увода и уменьшению времени 90 %-й реакции автомобиля, что в конечном итоге благоприятно сказывается на устойчивости и управляемости вездехода

как транспортного средства. Изменение значения коэффициента сопротивления колес боковому уводу с 60 до 120 кН на радиан повышает критическую скорость с 73 до 104 км/час, при этом время реакции достаточно велико, что характерно для случая с избыточной поворачиваемостью, и в основном превышает величину 0,3 с, которая соответствует предельно допустимой для категории «М₂», но в целом не превышает 2 с, что соответствует пределу для «N₂».

Во-вторых, повышение жесткости колес приводит к увеличению необходимого потребного угла поворота управляемых колес при других равных условиях проведения маневра, что ограничивает предельную скорость движения транспортного средства. Вместе с тем, необходимо отметить, что увеличение вдвое жесткости колес приводит к увеличению допустимой скорости движения вездехода, если рассматривать его как грузовой автомобиль, всего лишь в 1,08 раза (с 63 до 68 км/час). Если же вездеход «Кержак» является автомобилем категории «М₂», для обеспечения его безопасного движения по дорогам общего пользования необходимо повысить боковую жесткость колес до 120 кН на радиан, при этом максимально допустимая скорость его движения составит 50 км/час. Что касается сцепления колес с твердой опорной поверхностью, можно с уверенностью предполагать, что при значениях $\varphi \geq 0,4$ обеспечивается необходимая устойчивость движения против заноса.

Таблица 2.

Результаты моделирования испытания «Рывок руля»

$K_y, \left[\frac{\text{кН}}{\text{рад}} \right]$	$V_{исп}, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$	$V_{кр}, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$	$a_y, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$	$\theta_{исп}, [\text{рад}]$	$t_{90\%}, [с]$	$V_{дон}, \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$
60	11,111	20,41	1	0,01967	0,8007	17,5
			2	0,03934		
			4	0,07867		
	13,889		1	0,01	1,5570	
			2	0,01920		
			4	0,03841		
	16,667		1	0,00414	3,4680	
			2	0,00827		
			4	0,01655		
90	11,111	25	1	0,02243	0,4052	18,06
			2	0,04486		
			4	0,08972		
	13,889		1	0,01236	0,6899	
			2	0,02473		
			4	0,04945		
	16,667		1	0,00690	1,1853	
			2	0,01380		
			4	0,02759		
120	11,111	28,86	1	0,02380	0,2631	18,89
			2	0,04761		
			4	0,093		
	13,889		1	0,01374	0,4187	
			2	0,02749		
			4	0,05497		
	16,667		1	0,00828	0,6631	
			2	0,01656		
			4	0,03311		

В целом, проведенное моделирование испытания вездехода «рывок руля» достаточно хорошо описывает его поведение в установившемся (стационарном) режиме движения с постоянным радиусом кривизны траектории после протекания переходного процесса. Также оно характеризует и быстроту установления нового режима движения, что имеет несомненное значение для оценки устойчивости и управляемости. Вместе с тем, при движении по дорогам общего пользования водителю постоянно приходится маневрировать, в том числе, менять полосу движения. Данный процесс сам по себе динамичен, и от того, как вездеход, являясь объектом управления, будет реагировать на управляющее воздействие, напрямую зависит возможность его практического использования на дорогах с твердой поверхностью. Таким образом, смена полосы движения как маневр при управлении колесной машиной существенно характеризует динамические качества вездехода.

Для более глубокого изучения этих качеств нами было смоделировано испытание «переставка», которое позволит определить частотные характеристики транспортного средства повышенной проходимости, а также возможность выполнения маневра. Здесь в качестве управляющего воздействия рассматривается один период гармонической (синусоидальной) функции с нулевой начальной фазой [4,5] и последующим удержанием управляющих колес в нейтральном положении. При моделировании испытания нами учитывались наиболее вероятные частоты управления от 0,1 до 4,5 Гц [1]. Получим частотные характеристики колесной машины. Применим классический подход теории автоматического регулирования и управления. Передаточная функция вездехода как объекта управления нам уже хорошо известна [9, 10], изображение входного сигнала управления – табличная функция, следовательно, отыскание частотных характеристик не представляет собой большой сложности. На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика «Кержака» для скорости движения 50 км/час при различных величинах коэффициента сопротивления боковому уводу шин. Как видно из графика, характеристика носит монотонно убывающий характер при увеличении угловой частоты управления транспортным средством. Меньшему значению боковой жесткости соответствует более резкое уменьшение величины амплитудно-частотной характеристики или, по-другому, меньшая полоса пропускания. Также необходимо отметить, что сравнивая характеристики, можно выделить следующее. На частотах от нуля до некоторого значения характеристика с меньшей боковой жесткостью расположена выше характеристики с большей жесткостью, при дальнейшем увеличении частоты управления картина меняется на противоположную.

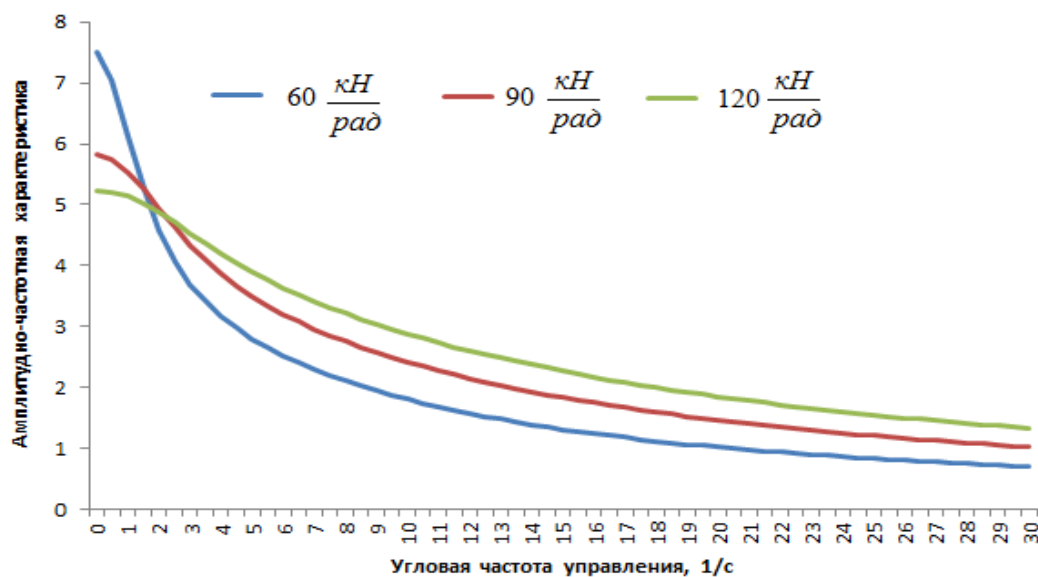


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика вездехода

Что касается фазочастотной характеристики, с увеличением частоты управления монотонно возрастает запаздывание (фазовый сдвиг) угловой скорости поворота транспортного средства от входного управляющего воздействия, и это запаздывание тем больше, чем меньше боковая жесткость шин. По условиям испытания необходимо определить максимальную скорость движения вездехода, при которой он не выйдет за пределы отведенного коридора при маневрировании, при этом движение должно происходить без заноса или отрыва колес от опорной поверхности.

На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены смоделированная траектория движения центра масс вездехода на скорости 50 км/час с минимально допустимой боковой жесткостью колес и соответствующее во времени изменение боковых реакций дороги на осях.

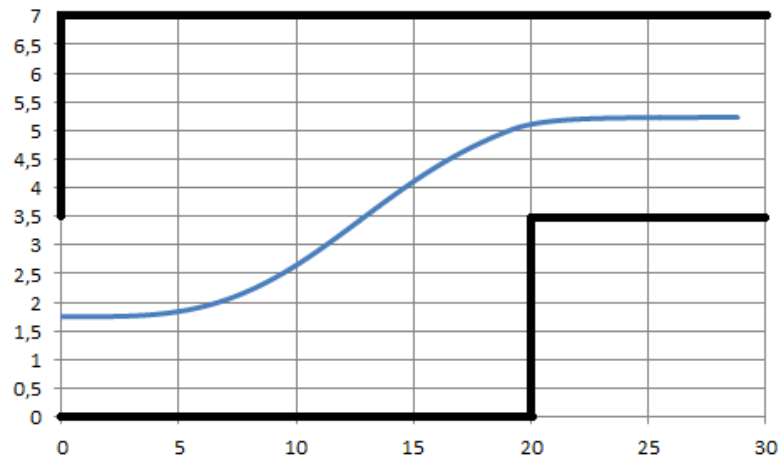


Рис. 4. Траектория движения вездехода

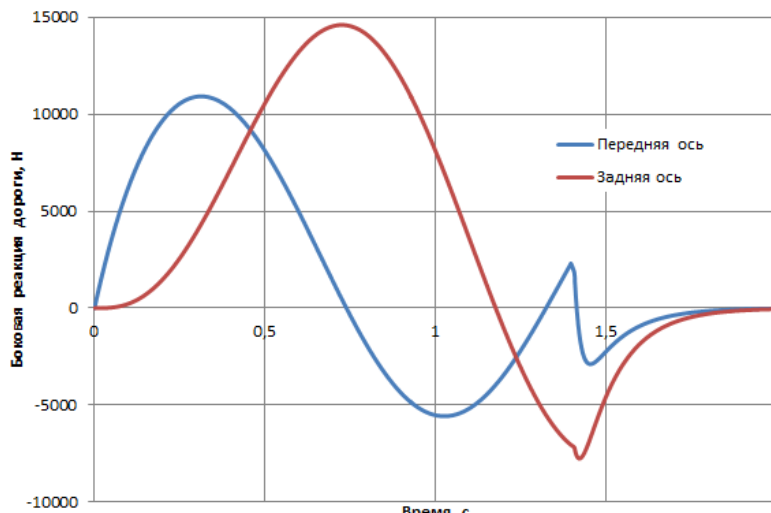


Рис. 5. Изменения боковых реакций

Данному движению соответствует частота управления равная 0,7 Гц и амплитуда угла поворота управляемых колес равная 0,15 рад. При этом необходимый коэффициент сцепления колес с дорогой должен быть обеспечен на уровне не менее 0,6. При дальнейшем увеличении скорости движения для удержания вездехода в установленном коридоре необходимо увеличивать частоту управления и (или) угол поворота управляемых колес. Это в конечном итоге приведет к увеличению боковых реакций, а, следовательно, к заносу или опрокидыванию вездехода. Так, для обеспечения устойчивого маневрирования «Кержака» со скоростью 60 км/ час потребуется обеспечить уровень коэффициента сцепления более 0,85.

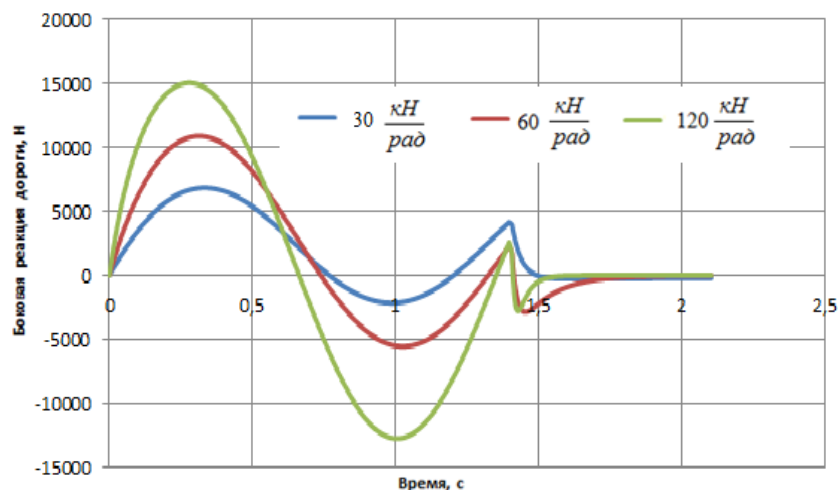


Рис. 6. Изменения боковых реакций дороги на передней оси

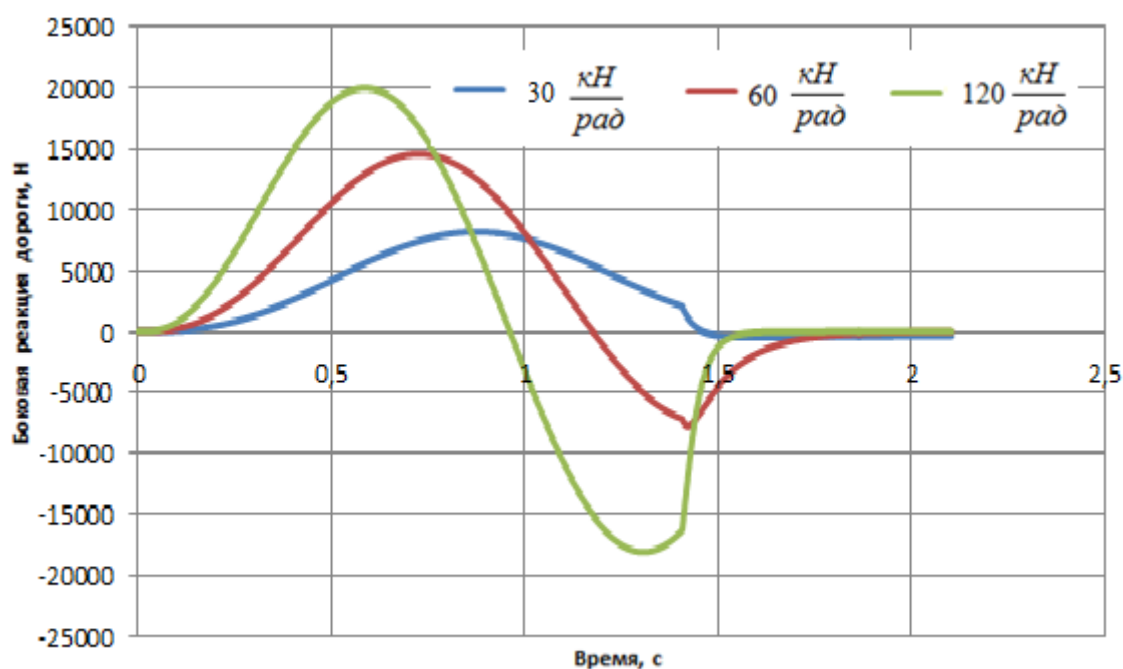


Рис. 7. Изменения боковых реакций дороги на задней оси

На рис. 6 и 7 приведены графики изменений боковых реакций дороги, приложенных к осям вездехода, при прохождении со скоростью 50 км/час испытания «переставка» с различной боковой жесткостью колес. При увеличении боковой жесткости, во-первых, увеличивается амплитуда реакций, во-вторых, происходит уменьшение периода колебаний. Также следует отметить, что установленная зависимость справедлива только при частотах управления больших частоты, при которой происходит пересечение соответствующих амплитудно-частотных характеристик (рис. 3). И в целом такая картина является особенностью избыточной поворачиваемости нашего транспортного средства.

Обобщая полученные результаты теоретического исследования, можно говорить о следующем. Важную роль в реакциях на управляющее воздействие вездехода играет частота управления. На нулевой частоте управления (маневр «рывок руля») и частотах меньше некоторого значения (для нашего случая 0,3 Гц), определяемого пересечением амплитудно-частотных характеристик, повышение боковой жесткости колес дает общее улучшение

управляемости. Происходит уменьшение длительности переходного процесса и запаздывания угловой скорости поворота колесной машины от управляющего воздействия. Не наблюдается увеличение боковых реакций при равных условиях движения. При управлении вездеходом на частотах больших данного характерного значения увеличение боковой жесткости колес, с одной стороны, также благоприятно влияет на управляемость колесной машины. С другой стороны, оно приводит к увеличению амплитуды боковых реакций, что сильно ограничивает возможность движения без заноса или опрокидывания. При этом, чем больше угловая частота управления, тем больше проявляется перераспределение боковых реакций в сторону передней оси, что приводит к ее сносу и последующей потере управляемости. Таким образом, можно говорить о приемлемом диапазоне изменения боковой жесткости для безопасного движения вездехода по твердой опорной поверхности с установленной скоростью.

Что касается максимальной скорости движения «Кержака», то с учетом обоих испытаний для опорных поверхностей с высоким коэффициентом сцепления приемлемая скорость движения, обеспечивающая необходимую безопасность, составляет 50 км/час. При учете понижения коэффициента сцепления приемлемая скорость понижается до 40 км/час. Данное скоростное ограничение справедливо при боковой жесткости шин в интервале от 60 до 90 кН/рад. При дальнейшем увеличении жесткости скорость необходимо будет уменьшать. Обращая внимание на интервал, можно также сказать о возможности использования вездехода по дорогам общего пользования как грузового автомобиля категории «N₂», для перевозки пассажиров не обеспечивается необходимая безопасность движения.

Полученные результаты исследования говорят о значительном влиянии шин сверхнизкого давления на управляемость нашего вездехода. Применительно к самостоятельной установке владельцами зарегистрированных в органах ГИБДД транспортных средств шин низкого давления взамен штатных, можно предположить, что их замена также может приводить к нежелательному изменению управляемости, которое, в свою очередь, негативно влияет на безопасность дорожного движения.

Библиографический список

1. **Бахмутов, С.В.** Научные основы параметрической оптимизации автомобиля по критериям управляемости и устойчивости: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / С.В. Бахмутов. – М., 2001. – 350 с.
2. **Брянский, Ю.А.** Управляемость большегрузных автомобилей / Ю.А. Брянский. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
3. **Вонг, Дж.** Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
4. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического регулирования и управления: уч. пос. для вузов / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1977. – 519 с.
5. **Воронов, А.А.** Устойчивость, управляемость, наблюдаемость / А.А. Воронов. – М.: Изд-во «Наука», 1979. – 336 с.
6. **Иларионов, В.А.** Эксплуатационные свойства автомобиля (Теоретический анализ) / В.А. Иларионов. – М.: Машиностроение, 1966. – 279 с.
7. **Куляшов, А.П.** Безопасность дорожного движения. Ч. III. Автомобиль и безопасность дорожного движения: учеб. пособие. – 2-е изд. / А.П. Куляшов, А.Г. Китов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин – Н. Новгород: ВГИПА, 2005. – 369 с.
8. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
9. **Милликен, У.Ф.** Применение общей теории устойчивости и управляемости автомобилей к их конструированию / У.Ф. Милликен, Д.У. Уитком // Управляемость и устойчивость автомобиля: сборник статей / пер. с англ. В.И. Котовского / под ред. А.С. Литвинова. – М.: МАШГИЗ, 1963. – С.145-204.
10. **Молев, Ю.И.** Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожного

движения: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (15 марта 2018 г.): в 2-х т. Т.2 / отв. ред. Д. А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 89-95.

11. **Пирковский, Ю.В.** Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси) / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001; Элит-2000, 2001. – 230 с.
12. **Певзнер, Я.М.** Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер. – М.: МАШГИЗ, 1947. – 156 с.
13. **Селифонов, В.В.** Исследование статических характеристик управляемости автомобиля на шинах сверхнизкого давления / В.В. Селифонов, В.И. Котляренко, Е.Е. Баулина // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №3 (56). – С. 13-17.
14. **Фалькевич, Б.С.** Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 239 с.
15. **Чудаков, Е.А.** Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.: МАШГИЗ, 1950. – 343 с.

*Дата поступления
в редакцию: 14.07.2020*

S.E. Manyanin¹, M.G. Cherevastov²

ON THE ISSUE OF CONTROL OF A VEHICLE EQUIPPED WITH EXTRA LOW PRESSURE TIRES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
Nizhny Novgorod State Pedagogical University n.a. Kozma Minin²

Purpose: In this work, the main goal of the study was to find the maximum speed of a cross-country vehicle equipped with ultra-low pressure tires and compare it with the one set by the manufacturer of the all-terrain vehicle. Evaluate the potential ability of a high-traffic vehicle to travel on public roads.

Design/methodology/approach: The work uses the classical methods of the theory of automatic control and regulation to find the frequency characteristics of the control system and the normal response of the all-terrain vehicle. Also, the main methods used in the theory of the car are applied.

Findings: In this paper, using the computational model of a vehicle equipped with ultra-low pressure tires, two different types of tests, such as "steering jerk" and "shifting", are simulated in driving conditions on public roads. The frequency characteristics of the all-terrain vehicle are obtained in the most probable range of control frequencies. The analysis of the obtained characteristics made it possible to draw a conclusion about the ambiguous influence of an increase in the lateral stiffness of tires, at different control frequencies, on the lateral reactions of the road applied to the wheels of the front and rear axles. The maximum speed of a wheeled vehicle, which ensures the necessary road safety, is determined, and the influence of the lateral stiffness of tires on its value is determined.

Research limitations / consequences: In carrying out this study, a flat single-mass design model of an off-road vehicle was used. One of the main assumptions was the linearity of the model, the smallness of the wheel slip angles and the constancy of the tire lateral slip resistance coefficient.

Key words: road safety, changes to the vehicle design, ultra- low pressure tires, vehicle handling.

В.Г. Михайлов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТЛАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

ОАО «Мидивисана»

Предложен новый способ отладки систем беспилотных автомобилей в лабораторных условиях на основе видеозаписи дорожной обстановки и записей сигналов датчиков беспилотного автомобиля. Метод базируется на имитационном моделировании движения, колебаний и управляемости автомобиля с использованием проектора, вибростенда и имитаторов излучателей радарных сигналов, управляемых компьютером.

Разработаны методика, схемы реализации имитационного моделирования для отладки систем управления беспилотного автомобиля и блок-схема реализации совместных моделей движения, нагруженности и управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink с использованием единого массива данных профилей дороги и модуля S-Function Builder, сигналов датчиков, обменом данными по сети CAN BUS.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, модель, имитационное моделирование, блок-схема реализации движения, колебаний, управляемости автомобиля, продольный профиль, микропрофиль дороги, Matlab/Simulink, S-Function Builder.

Введение

В настоящее время интенсивно ведутся разработки беспилотных автомобилей и их испытания. Массовое их производство планируют начать через 10-20 лет, поскольку требуется изменение в инфраструктуре дорог, переоснащение автомобилей, удешевление системы управления. Большинство испытаний проводится с участием инженера-испытателя, контролирующего движение автомобиля (рис. 1) на случай непредвиденных ситуаций [1].

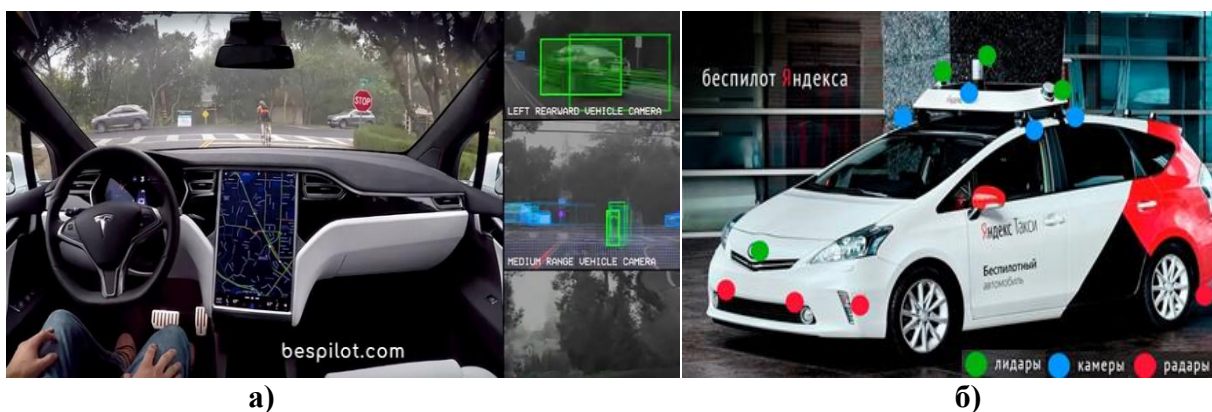


Рис. 1. Контроль движения (а), датчики и устройства беспилотного автомобиля (б)

Отработка систем управления представляет довольно сложный процесс обработки данных на компьютере беспилотного автомобиля, получаемых с множества различных устройств и выдачи сигналов на устройства управления. На данный период времени такой компьютер и его устройства сопряжения занимают более половины багажника автомобиля. Основные системы, обеспечивающими автономное передвижение, являются лидар, радары, датчик позиционирования на основе GPS или других систем, видеокamеры.

Лидар представляет лазерный дальномер, который устанавливается на крыше авто, который просматривает пространство (в радиусе до 100 м). В варианте беспилотного Яндекс Такси полученные от него данные в управляющем компьютере сравниваются с картами

Google. Это позволяет избегать аварийных ситуаций и соблюдать правила дорожного движения. Для позиционирования могут использоваться и другие системы навигации: Galileo, ГЛОНАСС. Из-за высокой стоимости лидара (до 10 000 \$) использование его на обычных автомобилях проблематично.

Радар используется для определения дальности объектов, траектории и скорости их движения. Он излучает радиоимпульсы, которые отражаются от препятствий и воспринимаются обратно антенной. Фактически радары выступают в качестве «зрения» автомобиля. Благодаря им система может мгновенно реагировать на любые изменения ситуации. Количество радаров, установленных на беспилотном автомобиле, 4-6 штук: обычно два впереди и два – сзади на бампере.

Датчик позиционирования на дороге – специальное устройство, которое определяет местоположение машины (координаты автомобиля), отслеживает его маршрут. Для этих целей используется GPS приемник или аналогичная система.

Видеокамера предназначена для реагирования на цветовые сигналы светофоров, объекты, которые приближаются на потенциально опасное расстояние путем распознавания изображений. Для распознавания используется библиотека OpenCV (Computer Vision). Обычно устанавливаются от 1 до 3 видеокамер.

Сложностью таких испытаний является непредсказуемость ситуаций в дороге. Для этого системы управления данных автомобилей делаются самообучаемыми. В идеале желательно, чтобы движущие автомобили обменивались данными. Сам процесс управления требует безопасной отладки, что можно в значительной степени осуществить в лабораторных условиях с использованием решения, рассмотренного далее.

1. Реализация имитационных испытаний беспилотных автомобилей

На автомобиле, оборудованном необходимыми датчиками и устройствами, в процессе движения проводится запись макро- и микропрофиля дорог, скорости и пути перемещения. Ведется панорамная съемка дорожной обстановки и запись сигналов радарных датчиков (синхронно с ними либо по отметкам фиксированного шага перемещений (через угол поворота колеса)). Полученные данные по первому варианту необходимо программно интерполировать для фиксированных точек дороги, например, с шагом 0,125 м. Это необходимо, чтобы дальнейшее моделирование проводилось на фиксированном значении шага пути при переменной скорости движения. Затем в лабораторных условиях осуществляется моделирование этого движения с синхронным воспроизведением визуальной обстановки и имитирующих сигналов излучателей аналогично подходам в работах [2, 3]. Управление последними осуществляется с помощью компьютеров. Все это обрабатывается компьютерной системой беспилотного автомобиля, и таким путем отрабатываются различные алгоритмы управления. Схема данного моделирования приведена на рис. 2. Для имитационного моделирования требуется задействование двух основных компьютеров и одного или двух мини-компьютеров, адаптеров и микроконтроллеров. Учитывая, что сейчас все электронное оборудование автомобиля построено на использовании CAN BUS, связь между компьютерами и системой управления целесообразно также осуществлять по этой сети. Ее применение для передачи данных с Simulink на стенды 6-DoF подробно рассмотрено ранее [2]. Привод на органы управления целесообразно осуществлять с помощью электроактуаторов; их применение на стендах рассмотрено в работах [2-4]. С помощью видеопроектора воспроизводится дорожная обстановка в пути на экране, изображение которого поворачивается вправо-влево с учетом реагирования руля и трассы движения. Это необходимо для отработки системы распознавания объектов, реализуемой с помощью библиотеки OpenCv. С помощью имитаторов излучателей подаются соответствующие отражению сигналы, которые воспринимаются системой управления беспилотного автомобиля. Близкий по сути подход применялся при ими-

тационном моделировании автомобиля [2]. Для вывода изображений разработано свое ПО, реализуемое с помощью Raspberry Pi 3/4 с использованием библиотеки OpenCV.

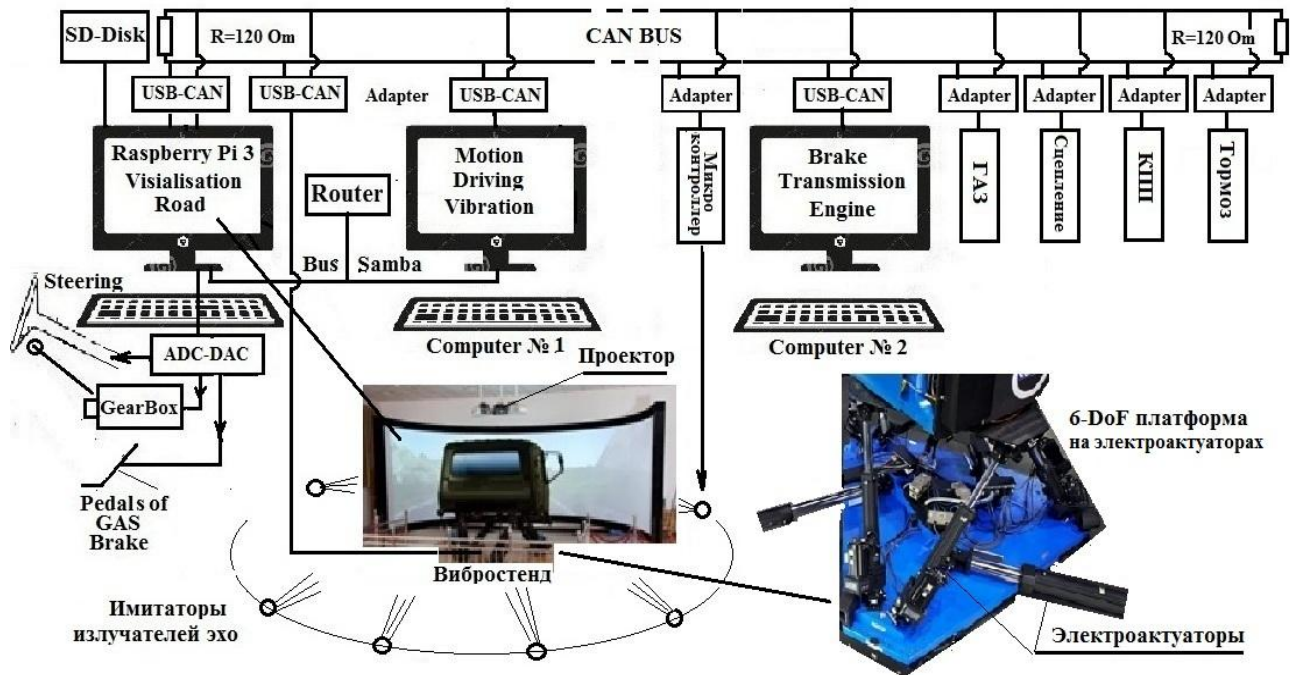


Рис. 2. Общая схема имитационного моделирования беспилотного автомобиля

Учитывая, чувствительность электроники к вибрациям, ее необходимо проверять. Помимо этого, автомобиль в движении может испытывать поперечно-угловые колебания (особенно при переезде препятствий, неровностей дороги). Поэтому необходимо контролировать реакцию системы распознавания объектов.

2. Используемые модели автомобиля

2.1. Задание внешнего возмущения. Важной частью моделирования является *задание внешнего* возмущения в виде продольного профиля и микропрофиля дороги. Для этих целей целесообразно использовать получаемый экспериментально массив этих данных с шагом замеров 0,125 м. Реализовать его воспроизведение в Simulink лучше через модуль S-Function Builder [6]. Данные этого массива должны быть связаны с массивами сигналов других датчиков. Для чего целесообразно провести одновременную запись как макро и микропрофиля дороги, позиционирования автомобиля и сигналов с датчиков. Для этого потребуются использование многоканальной регистрирующей аппаратуры с записью на компьютер, типа ZetLab.

2.2. Модель колебаний автомобиля. При имитационном моделировании беспилотных автомобилей необходимо учитывать колебания автомобиля, т.к. они влияют на сопротивление движения и динамику автомобиля из-за переменного сопротивления качения, зависящего также и от микропрофиля дороги [2]. Для этих целей целесообразно использовать более простую плоскую модель, описанную в работах [2, 7] с применением комбинированной модели трения с упругими элементами и «вязкого» трения, которая более точнее описывает динамическую характеристику подвесок и обеспечивает хорошую сходимость в октавных полосах частот (погрешность 10-15 %).

Использование пространственной модели нецелесообразно, так как она не позволяет проводить моделирование в реальном масштабе времени из-за ограниченной производительности существующих компьютеров и увеличенного в два раза числа расчетных элементов.

Судя по видео испытаний автомобилей Мерседес-Бенц [4] они не учитывают колебания автомобиля, похоже, считая это не существенным для хороших дорог. У нас же дороги значительно отличаются от зарубежных.

2.3 Управляемость и движение автомобиля. Для проведения этого требуется одновременное моделирование движения и управляемости автомобиля на основе их совместной модели, показанной на рис. 3, с учетом всех сил, действующих на автомобиль.

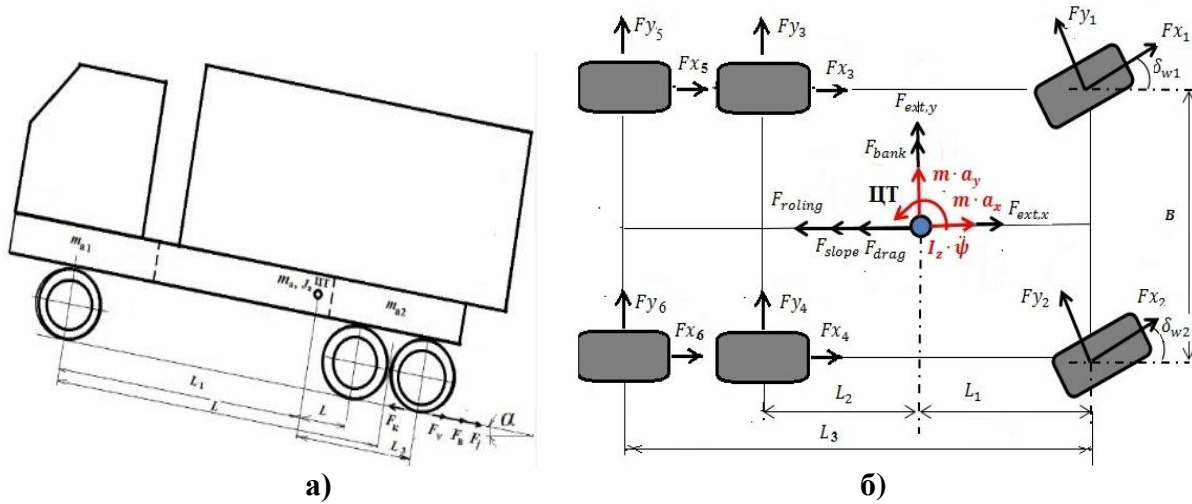


Рис. 3. Схема сил, действующих на автомобиль при движении (а) и управлении ТС (б)

Важная роль отводится модели шины (рис. 4). В вертикальной плоскости ее можно представить в виде точечного контакта как сочетание параллельного включения упругого и демпфирующего элемента. Боковой увод следует рассматривать как параллельное включение нескольких упругих элементов с ограничением их максимальных величин [2, 8, 9] и зависящем от относительной скорости, а не угла увода. Это позволяет также учитывать зависимость от частоты. В работах [8, 9] приведены графики зависимости увода и блок-схема реализации на аналоговой вычислительной машине [9], но, к сожалению, там не дано их математического описания.

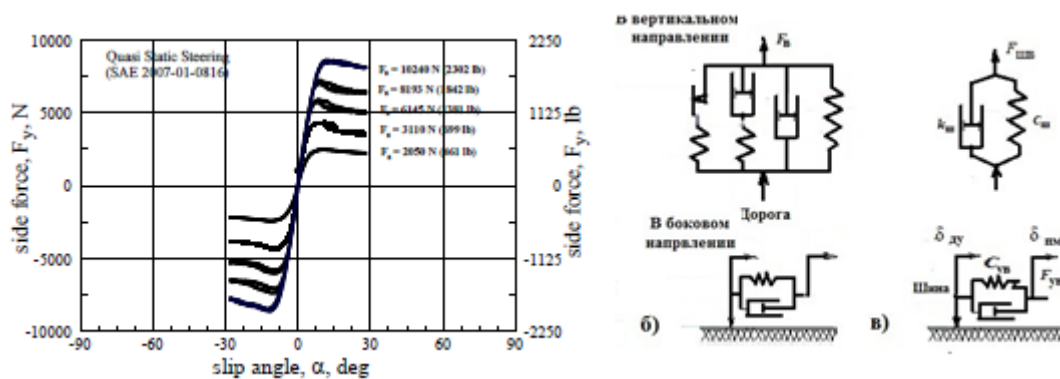


Рис. 4. Характеристика и модель увода шины

Данную модель увода шины целесообразно описать следующими уравнениями (1):

$$F_{\text{увш}} = \begin{cases} C_{\text{уш.дин1}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{па}}) dt & F_{\text{тр1}} > C_{\text{уш.дин}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{апа}}) dt > -F_{\text{огр.усил}} \\ F_{\text{огр.усил}} & \text{если } C_{\text{шу.дин1}} \int_0^t (\delta_{\text{прк}} - \delta_{\text{па}}) dt > F_{\text{огр.усил}} \end{cases} \quad (1)$$

$$[-F_{\text{огр.усил}} \quad C_{\text{шудин}} \int_0^t (\dot{\delta}_{\text{прк}} - \dot{\delta}_{\text{па}}) dt < -F_{\text{огр.усил}};$$

Совместное движение и управляемость ТС может быть описано следующими тремя дифференциальными уравнениями с использованием второго закона Ньютона (2):

в направлении продольной оси x

$$m \cdot a_x = F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + F_{x2} \cdot \cos(\delta_{w2}) - F_{y2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{x3} + F_{x4} + F_{x5} + F_{x6} - F_B - F_{\vartheta}; \quad (2)$$

$$a_x = \dot{v}_x + v_y \cdot \dot{\psi};$$

$$m \cdot a_x = 2 \cdot F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - 2 \cdot F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + 4 \cdot F_{x3} - F_B - F_{\vartheta};$$

где F_B – сила сопротивления воздуха (3).

$$F_B = K_B \cdot A_a \cdot v_a^2, \quad (3)$$

где K_B – коэффициент обтекаемости автомобиля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$; A_a – лобовая площадь автомобиля, м^2 , v_a – текущая скорость движения автопоезда, $\text{м}/\text{с}$, v_x – производная продольной скорости, v_y – боковая скорость; $\dot{\psi}$ – угловая скорость вращения автомобиля вокруг ЦТ.

$$F_{\vartheta} = 9,81 \cdot \vartheta \cdot m_a, \quad (4)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг ; ϑ – коэффициент дорожного сопротивления (5).

$$\vartheta = f_k \cdot \cos \alpha + \sin \alpha, \quad (5)$$

где α – угол наклона текущего элементарного участка маршрута, f_k – коэффициент сопротивления качению шин; F_j – инерционная сила сопротивления разгону (6),

$$F_j = m_a \cdot a \cdot \lambda, \quad (6)$$

где a – ускорение автомобиля $\text{м}/\text{с}^2$, λ – коэффициент учета вращающихся масс (7):

$$\lambda = \frac{J_{\text{eng}} \cdot \eta_r \cdot (u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{вм}})^2}{m_a \cdot r_k^2} + \frac{\sum J_k}{m_k \cdot r_k^2}, \quad (7)$$

где J_{eng} – момент инерции вращающихся масс двигателя и сцепления, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, J_k – суммарный момент инерции колес автопоезда и приводных валов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

в направлении поперечной оси y (8)

$$m \cdot a_y = (F_{x1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w1}) + F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w2}) + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{x2} \cdot \sin(\delta_{w2}) + F_{y2} \cdot \cos(\delta_{w2}) + F_{y2} \cdot \cos(\delta_{w2}) + F_{gr}); \quad (8)$$

$$F_{gr} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta)$$

$$m \cdot a_y = (2 \cdot F_{x1} \cdot \sin(\delta_{w1}) + 2 \cdot F_{y1} \cdot \cos(\delta_{w1}) + F_{gr});$$

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \cdot \dot{\psi},$$

где θ – угол поперечного наклона дороги, \dot{v}_y – производная продольной скорости, v_x – боковая скорость; $F_{xi} \dots F_{xi}$ – усилия на колесах.

Вращение автомобиля относительно оси Z вокруг ЦТ

$$J_a \cdot \ddot{\psi} = [-F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1}) - F_{x2} \cdot \cos(\delta_{w2}) - F_{y2} \cdot \sin(\delta_{w2}) - F_{x3} + F_{x4} - F_{x5} + F_{x6}] \cdot \frac{B}{2}$$

При равенстве сил $F_{x1} = F_{x2}$, $F_{y1} = F_{y2}$, $F_{x3} = F_{x4} = F_{x5} = F_{x6}$.

$$J_a \cdot \ddot{\psi} = [-2 \cdot F_{x1} \cdot \cos(\delta_{w1}) - 2 \cdot F_{y1} \cdot \sin(\delta_{w1})] \cdot \frac{B}{2}.$$

Значение для \sin углов δ_{w1}, δ_{w2} целесообразно заменить на δ_{wi} (в радианах), чтобы учесть изменение знака величины. И принять углы $\delta_{w3} \dots \delta_{w6} = 0$. Значение $\cos(\delta_{w1..2})$ меняются в пределах $1 \dots 0,94$ при $0 \dots 10^\circ$. Их также можно заменить на 1, включая $\cos(\delta_{w3..6}) = 1$.

Как видно из уравнений, для их решения требуется определить усилия на колесах с учетом углов поворота передних колес. Они могут быть определены, исходя из тяговой динамики автомобиля, описываемой известным дифференциальным уравнением второго порядка [8] (9):

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum_0^6 F_k - F_b - F_g}{m_a \cdot \delta}, \quad (9)$$

где F_k – сила тяги с учетом угла поворота управляемых колес и распределения массы на них;

$F_{xi} = K_1 \cdot F_k \cdot \delta$; для 1-го, 2-го колеса, $F_{yi} = K_2 \cdot F_k$ – для 3-го... 6-го колеса (10):

$$F_k = \frac{M \cdot u_{кп} \cdot u_{вм} \cdot \eta_T}{r_k}, \quad (10)$$

K_1 – коэффициент распределения массы на переднюю ось; K_2 – коэффициент распределения массы на ведомые оси; M – текущий крутящий момент двигателя внутреннего сгорания (ДВС), Н·м, η_T – КПД трансмиссии на соответствующей передаче КП; r_k – радиус качения ведущих колес автомобиля, м; $u_{кп}$ – текущее значение передаточного числа КПП; $u_{вм}$ – передаточное число главной передачи ведущего моста; v_a – текущая скорость движения автомобиля, м/с (11):

$$v_a = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n \cdot r_k}{u_{кп} \cdot u_{вм}}, \quad (11)$$

где n – текущая частота вращения коленчатого вала ДВС, мин^{-1} .

Логика переключения передач КПП может быть реализована двумя способами. Первый – на основе заданного определенного нижнего и верхнего значения оборотов двигателя с учетом ускорений автомобиля/момента двигателя. Второй – инверсированных зависимостей загрузки двигателя, предложенных в работе [8]. И в том, и в другом способе логику переключения целесообразно осуществлять через модуль S-Function Builder. Переход на новую передачу осуществляется с задержкой $t=2$ с через нейтральную, при которой $F_k=0$.

Для реализации моделирования движения, колебаний и управляемости беспилотного автомобиля можно использовать блок-схему, апробированную в работе [2], приведенную на рис. 5. Она позволяет при использовании 6-ти ядерного компьютера и твердотельного накопителя (AMD Ryzen 5 2600, 6-ти ядерный 3,4/4 ГГц, RAM 16 Гб DDR-4 2666 МГц, накопитель M2. SSD 2500 Мб/с, MB ASUS PRIME B450 PLUS, $t=0,0001$ с) с передачей данных в асинхронном режиме по CAN BUS реализовать режим реального времени. На основе данного моделирования можно проводить анализ реагирования системы управления. Но для этого через S-Function Builder, сеть CAN BUS необходимо подключить систему управления беспилотного автомобиля с его датчиками, что возможно только в условиях большого коллектива. Дополнительно следует отметить, что CAN BUS значительно снижает быстродействие моделирования (в 4 раза), хотя она является наиболее быстродействующим (1-3 Мб/с) по сравнению передачами по RS-485 (128 кб/с) и сокетах TCP (256 кб/с). CAN BUS широко используется для передачи данных на стенды [4, 5], а также для управления станками, роботами в промышленности.

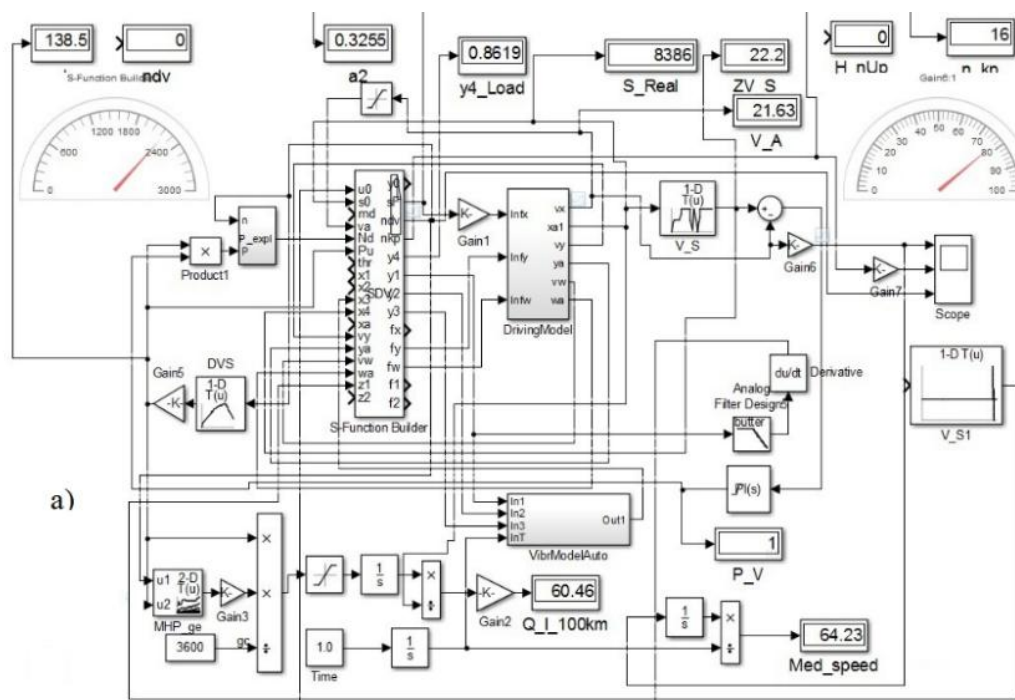


Рис. 5. Блок-схема реализации моделирования движения, колебаний и управляемости беспилотного автомобиля

Выводы

1. Предложен новый способ отладки систем беспилотных автомобилей в лабораторных условиях на основе видеозаписи дорожной обстановки, записей сигналов датчиков беспилотного автомобиля и воспроизведения их через имитаторы, базирующийся на совместном имитационном моделировании движения, колебаний и управляемости автомобиля с использованием проектора, вибростенда и имитаторов сигналов.

2. Представлены модели, методика, схемы реализации имитационного моделирования для отладки систем управления беспилотного автомобиля и блок-схемы реализации модели движения, нагруженности и управляемости автомобиля в пакете Matlab/Simulink с использованием единого массива данных профилей дороги, сигналов датчиков, и модуля S-Function Builder, обменом данными по сети CAN BUS.

Библиографический список

1. Как работает беспилотный автомобиль / <https://bespilot.com/chastye-voprosy/kak-rabotaet-bespilotnyj-avtomobil/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа/Access mode: 28.05.2020.
2. Михайлов, В.Г. Компьютерное и имитационное моделирование автомобиля / В.Г. Михайлов, Издательский дом «Беларуская навука», 2020. – 316 с.
3. Михайлов, В.Г. Совместное моделирование движения и нагруженности автомобиля / В.Г. Михайлов // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 7. – С.1-6.
4. The Mercedes Benz Simulator Driving Center [Электронный ресурс] / <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/the-mercedes-benz-driving-simulation-center/>. – Режим доступа: 24.12.2018.
5. Electric Simulation Table / <https://www.moog.com/products/simulation-tables/electric-simulation-table.html> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 08.09.2019.
6. Использование S-Function Builder в Matlab/Simulink / Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – № 4. – С.57-64.
7. Михайлов, В.Г. Получение и использование единого массива продольного профиля и микропрофиля дороги для моделирования ТС / В.Г. Михайлов // Журнал автомобильных инженеров. – № 2. – 2018. – С.4-7.

8. **Выгонный, А.Г.** Закон переключения передач, оптимальный по тягово-скоростным и топливно-экономическим показателям магистрального автопоезда / А.Г. Выгонный, О.С. Руктешель, Р.Э. Шейбак// Актуальные вопросы машиностроения. – 2015. – Т. 4. – С. 182-188.
9. **Хачатуров, А.А.** Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / под ред. Хачатурова А.А. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
10. **Расејка, Hans В.** Tyre and vehicle dynamics, 3rd Edition / Hans В. Расејка. – Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012.

*Дата поступления
в редакцию: 03.06.2020*

V.G. Mikhailov

USE OF IMITATING MODELING FOR DEBUGGING SELF-DRIVING CARS

JSC «Midivisana» (Minsk)

Purpose: The new way of debugging of systems of self-driving cars in vitro on the basis of video of road situation, records of signals of sensors of the self-driving car which is based on imitating modeling of the movement, fluctuations and controllability of the car with use of projector and the simulator is offered.

Findings: Technique, schemes of implementation of imitating modeling are developed for debugging of control systems of the self-driving car and the flowchart of implementation of model of the movement, loading and controllability of the car in Matlab/Simulink package of use of uniform data array of profiles of the road and the S-Function Builder module, signals of sensors, data exchange on CAN BUS network.

Key words: Self-driving car, model, imitating modeling, simulator, flowchart of implementation of the movement, fluctuations, controllability of the car, long edged profile, microprofile of the road, Matlab/Simulink, S-Function Builder.

Е.В. Степанов, Ю.И. Молев, С.М. Огороднов, А.С. Вашурин

ОЦЕНКА ПЛАВНОСТИ ХОДА АВТОМОБИЛЯ С ГИДРОЭЛАСТОМЕРНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена конструкция подвески, упругий и демпфирующий аппарат которой представлен в виде комбинированного устройства – пакета эластомерных элементов и газо-гидравлического однотрубного амортизатора. Целью исследования является определение критериев плавности хода автомобиля с гидроэластомерной подвеской и сравнение со значениями, полученными для стандартной (базовой) конструкции. Оценка влияния выполнена на основе сравнения результатов имитационного моделирования передней подвески автомобиля ГАЗель NEXT и аналогичной подвески с гидроэластомерным пакетом. В качестве расчетной модели выбрана двухмассовая одноосная модель подвески. Моделирование осуществлено в программном комплексе MATLAB/Simulink. Математическая модель микропрофиля дорожного полотна реализована на основе метода суперпозиции гармонических функций с различной частотой и амплитудой колебаний. В результате аналитической работы установлено, что стандартная подвеска с винтовой цилиндрической пружины и гидравлическим амортизатором на всех исследуемых режимах движения не превосходит конструкцию с гидроэластомерным пакетом по выбранным критериям оценки плавности хода. Результаты исследования позволяют сделать вывод о перспективах применения подобных конструкций в подвесках транспортных средств.

Ключевые слова: автомобиль, подвеска, эластомер, гидравлический амортизатор, плавность хода, упругая характеристика, коэффициент демпфирования, испытания, микропрофиль, моделирование, двухмассовая модель, MATLAB/Simulink.

Обоснование необходимости и цель работы

Неметаллические упругие элементы в подвесках автомобилей используются, в основном, как дополнительные, позволяющие определенным образом корректировать упругую характеристику, например, обеспечивая ее нелинейность и увеличивая энергоемкость. Подобная ограниченность применения связана с установившимся мнением о невозможности обеспечения стабильных характеристик и высокого ресурса у неметаллических изделий.

Современные рецептуры, подходы к технологии получения и обработки эластичных полимеров (эластомеров) подразумевающие применение сверхвысоких давлений при формовке изделия, термоупрочнение поверхностных слоев и использование модификаторов защиты против старения, позволяют получить материал с качественно иными характеристиками. К ним можно отнести:

- стабильные показатели вязкоупругих свойств;
- высокие показатели ресурса;
- стойкость к старению, трещинообразованию и разрастанию разреза;
- стойкость к знакопеременным нагрузкам и воздействию высоких и низких температур (от минус 60 °С до плюс 100 °С);
- стойкость к агрессивным средам.

Эластомер обладает внутренним трением и упругой характеристикой с нелинейным прогрессивным характером [1]. Это определяет ряд преимуществ по сравнению со стандартной конструкцией подвески:

- поглощение энергии при деформации подвески (частично выполняет функции амортизатора);
- совмещает функции основного и дополнительного упругих элементов (нет необходимости установки дополнительного буфера или рессоры);

- прогрессивная упругая характеристика позволяет сохранить величину собственной частоты колебаний поддресоренных масс при различной загрузке транспортного средства).

Применение конструкций гидроэластомерных устройств (рис. 1) при выполнении известных требований к упругой характеристике подвески и плавности хода обеспечивает существенное снижение массы неподресоренных частей автомобиля и расход металла, повышение плавности движения и появление новых возможностей при проектировании конструкции подвески.

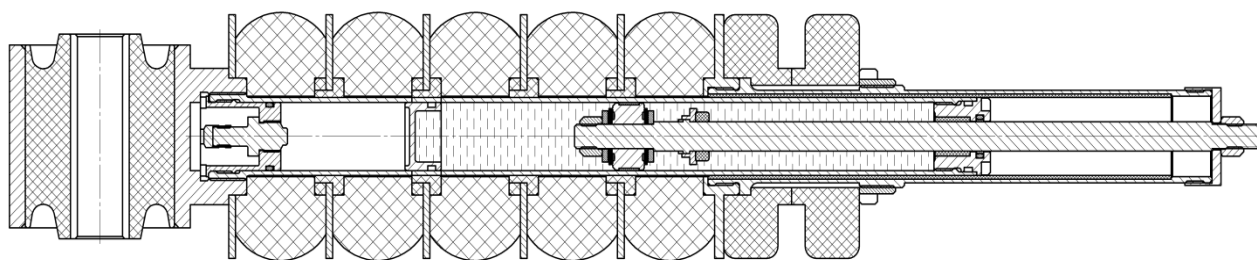


Рис. 1. Схема гидроэластомерного пакета подвески автомобиля

Принимая во внимание перспективы применения подобных материалов, целью настоящего исследования является определение расчетно-экспериментальными методами критериев плавности хода автомобиля с гидроэластомерной подвеской и сравнение со значениями, полученными для стандартной (базовой) конструкции.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

Методика выполнения работы

В качестве объекта исследования выбрана передняя подвеска легкого коммерческого автомобиля ГАЗель NEXT. Данная подвеска является двухрычажной с винтовой цилиндрической пружиной, дополнительным буфером сжатия и гидравлическим двухтрубным амортизатором. В качестве альтернативы для данной подвески спроектирован и изготовлен опытный образец гидроэластомерного пакета. Ключевые параметры для расчетных исследований получены в ходе натурных, стендовых испытаний и предоставлены конструкторами Группы ГАЗ.

Методика и порядок проведения работ для расчетной оценки плавности хода автомобиля со стандартной подвеской и гидроэластомерной:

- 1) определение упругой характеристики и характеристики амортизатора, приведенных к колесу для стандартной подвески, опираясь на данные из конструкторской документации и натурных испытаний;
- 2) стендовые испытания гидроэластомерного пакета для определения упругой характеристики и собственного коэффициента демпфирования пакета эластомеров;
- 3) определение характеристики однотрубного газо-гидравлического амортизатора, входящего в конструкцию гидроэластомерного пакета;
- 4) приведение упругой и демпфирующей характеристик к колесу для гидроэластомерной подвески графоаналитическим методом;
- 5) создание математических моделей подвесок в программном комплексе MATLAB/Simulink;
- 6) разработка и генерация математической модели микропрофиля в MATLAB / Simulink;
- 7) моделирование движения автомобиля с двумя типами подвесок на различных скоростях в одинаковых виртуальных дорожных условиях;

- 8) расчет и анализ результатов моделирования по выбранным критериям плавности хода автомобиля для двух типов подвесок;
9) формулировка выводов и результатов исследования.

Экспериментальная часть

На рис. 2 представлена экспериментально полученная упругая характеристика реального эластомера, позволяющая определить величину внутреннего трения ($F_{тр}$) и жесткость. Внутреннее трение эластомера по физическому смыслу близко к «сухому». Сложность учета влияния внутреннего трения эластомера на характер динамических процессов подвески заключается в том, что тип трения не определен четкими физическими границами. По сути это «сухое» трение, но его величина не остается постоянной, а зависит от деформации упругого элемента f и действующей на упругий элемент силы F .

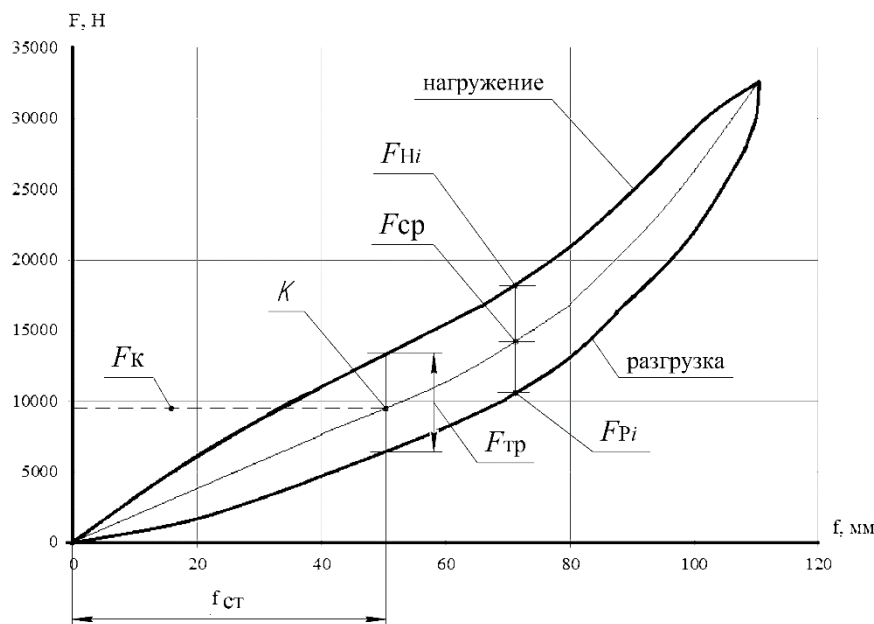


Рис. 2. Характеристика внутреннего трения в эластомере

Кроме того, внутреннее трение эластомера влияет на скорость затухания колебательных процессов в подвеске и может определяться «условным» коэффициентом демпфирования « k_z », подобным коэффициенту демпфирования гидравлического амортизатора. Для определения «условного» коэффициента демпфирования эластомера был поставлен эксперимент, позволяющий рассчитать логарифмический декремент затухания колебательного процесса в эластомере и величину «условного» коэффициента демпфирования.

Схема стенда для определения коэффициента демпфирования показана на рис. 3. Пакет эластомеров 1 крепится к маятниковому копру 2, шарнирно соединенному со стойкой 3. Стойка 3 крепится к основанию стенда, закрепленному на фундаменте. Для создания нагрузки на эластомер к маятнику 2 крепится груз 4, масса « M » которого должна соответствовать приведенной нагрузке, действующей на эластомерный пакет.

Для создания затухающих колебаний маятник стенда поднимается на небольшую высоту и отпускается с помощью устройства «быстрого сброса». Колебания записывают с помощью датчика перемещения 5, 6, регистрирующего затухающий процесс по изменению координаты « z » – перемещения в вертикальном направлении. Сигнал от датчика обрабатывается блоком АЦП 7 и регистрируется с помощью персонального компьютера 8. На рис. 4 показан результат эксперимента – процесс затухания колебаний в эластомерном элементе.

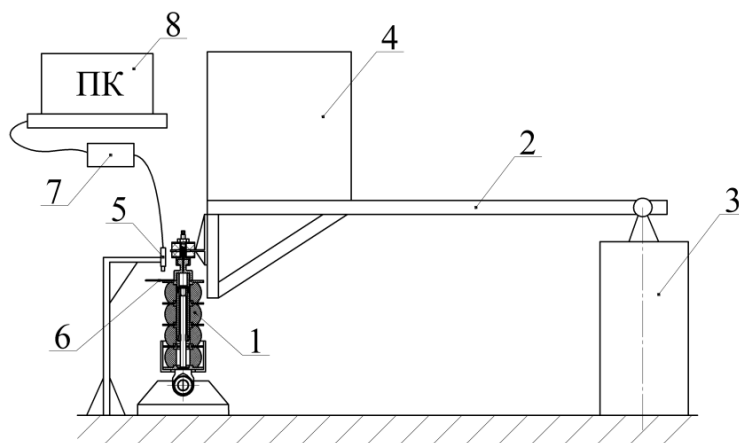


Рис. 3. Стенд для определения коэффициента демпфирования

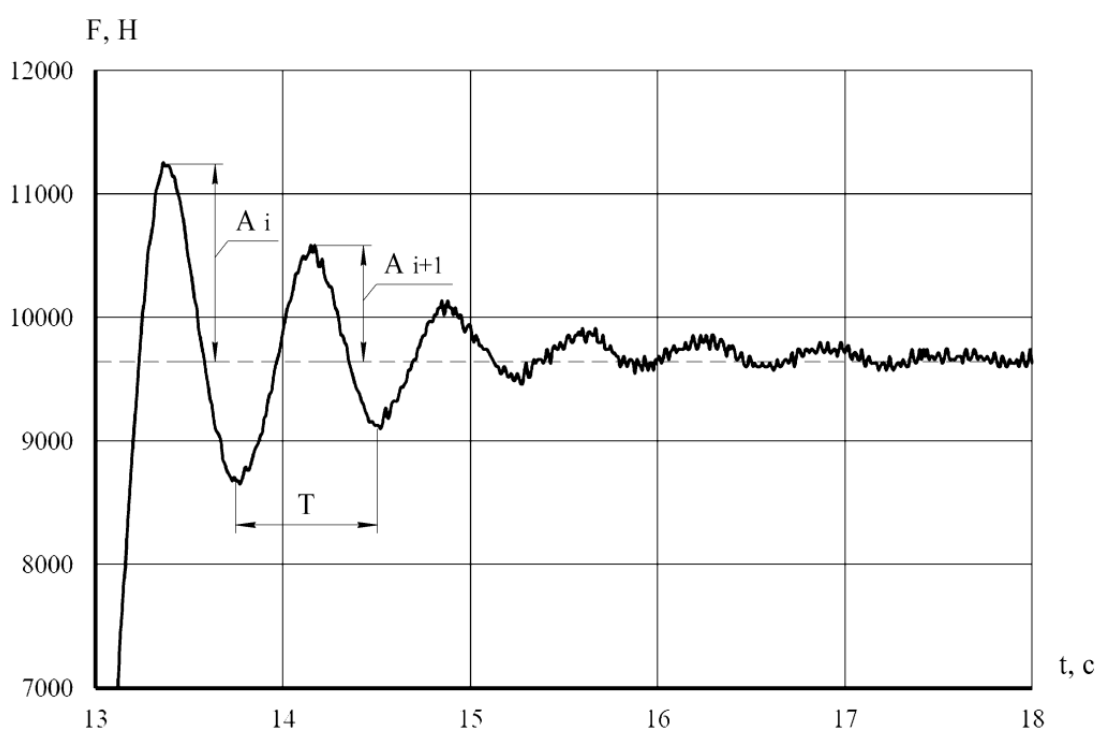


Рис. 4. Процесс затухающих колебаний в эластомерном упругом элементе

Теоретический анализ

При моделировании и расчетах подвески упругая характеристика эластомерного пакета (зависимость упругой силы F от величины деформации f) может определяться как зависимость среднего значения силы F_{cp} от деформации эластомеров f (рис. 2). Упругая характеристика эластомерного пакета нелинейная, поэтому его жесткость может быть определена только в точке или для ограниченного участка, считающегося линейным. Среднее значение жесткости в точке $C_{cp i}$ нелинейной упругой характеристики может быть определено в соответствии с выражением (1):

$$C_{cp i} = \frac{F_{cp i}}{f_i} \quad (1)$$

где $C_{cp i}$ – значение жесткости в точке i нелинейной упругой характеристики;

$F_{cp i}, f_i$ – соответственно среднее значение силы и величина деформации в точке i нелинейной упругой характеристики (2):

$$F_{\text{ср } i} = \frac{F_{\text{н } i} + F_{\text{р } i}}{2} \quad (2)$$

где $F_{\text{н } i}$, $F_{\text{р } i}$ – соответственно значение силы в точке i на участке нагружения и разгрузки упругой характеристики (рис. 2).

Среднее значение жесткости для ограниченного участка нелинейной упругой характеристики определяется в соответствии с выражением (3):

$$C_{\text{нр } i} = \frac{F_{i+1} - F_i}{f_{i+1} - f_i} \quad (3)$$

где $C_{\text{нр } i}$ – приведенная жесткость на i -ом участке упругой характеристики; F_i , F_{i+1} – предыдущее и последующее значения вертикальной силы на упругой характеристике, действующей на эластомерный упругий элемент; f_i , f_{i+1} – предыдущее и последующее значения приведенной вертикальной деформации упругого элемента.

Для обеспечения учета влияния внутреннего трения эластомеров при работе совместно с гидравлическим амортизатором необходимо аналитически привести схожие характеристики этих объектов к одним единицам измерения. Имея результаты стендовых испытаний, произведем расчет коэффициента демпфирования эластомерного пакета, используя процесс затухающих колебаний. Условный коэффициент демпфирования эластомерного элемента равен (4):

$$k_3 = \frac{2 \cdot \ln d}{T} M \quad (4)$$

где M – приведенная к оси упругого элемента масса груза (масса поддрессоренной части автомобиля, приходящаяся на эластомер); d – декремент затухания; T – период колебаний; $\ln d$ – логарифмический декремент затухания.

Декремент затухания позволяет оценить скорость затухания колебаний, а математически определяется как отношение двух последовательных максимальных отклонений процесса затухающих колебаний системы, рис. 3, в одну сторону от положения равновесия. Декремент затухания равен (5):

$$d = \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (5)$$

где A_i , A_{i+1} – два последовательных значения амплитуд колебаний.

Результаты расчетов по определению коэффициента демпфирования эластомерного упругого элемента сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты испытаний эластомерного пакета на маятниковом копре

Наименование параметра	Обозначение, единицы измерения	Значения
Масса груза, соответствующая приведенной нагрузке	M , кг	988
Среднее значение логарифмического декремента затухания по результатам всех испытаний	$\ln d$	0,588
Среднее значение периода затухающих колебаний по результатам всех испытаний	T , с	0,73
Условный коэффициент демпфирования	k_3 , Н*с/м	1592

Характеристики винтовой цилиндрической пружины, дополнительного буфера сжатия, гидравлического двухтрубного и однотрубного (для гидроэластомерного пакета) амортизаторов приняты из конструкторской документации. Полные характеристики упругих и демпфирующих элементов для обоих типов подвесок представлены на рис. 5 и 6. Жесткость (и коэффициент демпфирования) подвески, приведенные к «колесу», для большинства конструктивных схем систем поддрессоривания существенно отличаются от жесткости упругих элементов и коэффициентов сопротивления демпфирующих устройств [3, с. 46].

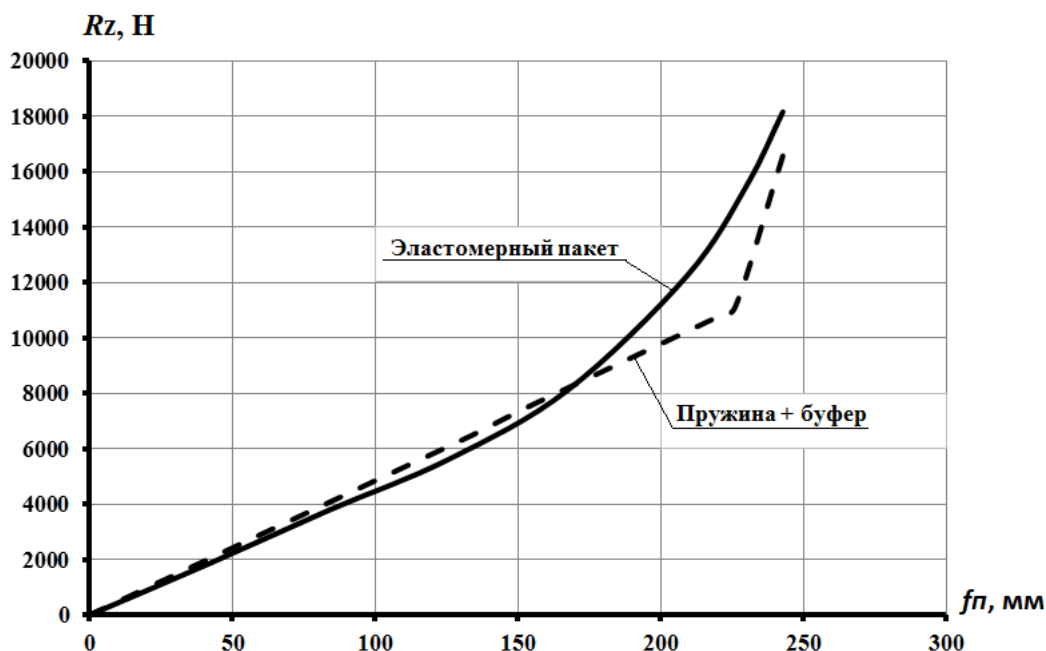


Рис. 5. Упругие характеристики подвесок, приведенные к колесу

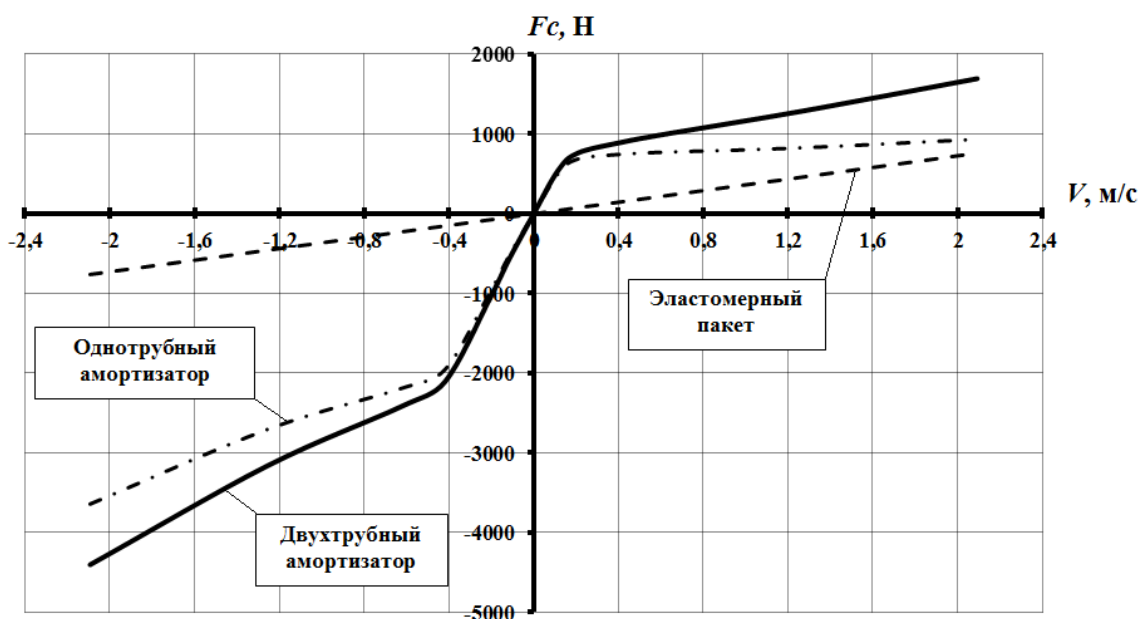


Рис. 6. Демпфирующие характеристики подвесок, приведенные к колесу

Для определения параметров подвески, приведенных «к колесу», необходимо выполнить специальные расчеты. В основном используются графоаналитические методы (рис. 7). Упругая характеристика подвески представляет зависимость величины нормальной реакции R_z от «прогиба» подвески f_n , фактически определяемого как перемещение колеса (его оси) относительно рамы автомобиля, при деформации упруго элемента. Для построения упругой характеристики подвески необходимо построить зависимость $R_z = F(f_n)$, то есть определить величины нормальной силы R_z при различных величинах деформации упругого элемента. Наиболее простым инженерным методом считается графический. Он предполагает использование кинематической схемы подвески. На схеме прорисовывают несколько (6-8) положений рычагов подвески при различной деформации упругого элемента, больших и меньших статической нагрузки.

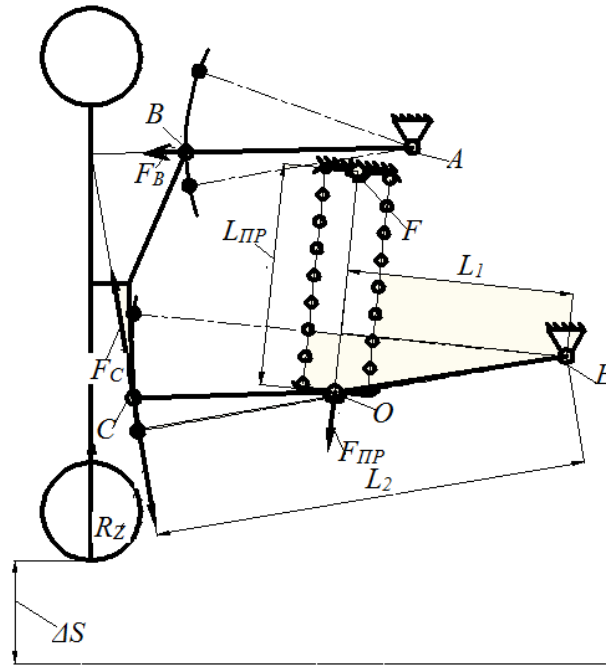


Рис. 7. Схема подвески на поперечных рычагах для приведения параметров к колесу

Приведенное к колесу значение коэффициента демпфирования определяется из условия равенства двух моментов.

Момент силы демпфирования, относительно оси поворота нижнего рычага, создаваемый амортизатором либо эластомером равен (6):

$$T_{k1} = k_1 * V_1 * l_1 \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент демпфирования амортизатора (эластомера); V_1 – скорость деформации амортизатора (эластомера); l_1 – плечо действия силы сопротивления демпфирования.

Момент силы демпфирования, приведенный к колесу равен (7):

$$T_{k2} = k_2 * V_2 * l_2 \quad (7)$$

где k_2 – коэффициент демпфирования, приведенный к «колесу»; V_2 – скорость перемещения колеса; l_2 – плечо действия силы сопротивления демпфирования.

Очевидно, что $V_2 = \frac{V_1 l_1}{l_2}$, исходя из равенства моментов и соотношения скоростей, получаем формулу приведенного к «колесу» коэффициента демпфирования (6):

$$k_2 = \frac{k_1 l_1^2}{l_2^2} \quad (8)$$

Приведенные характеристики подвесок к «колесу» в результате расчетов представлены на рис. 5 и рис. 6. Для оценки плавности хода автомобиля целесообразно аналитически исследовать средние квадратические величины (СКВ) вертикальных ускорений σ_z , передающихся на подрессоренную массу и СКВ силы нормальной реакции σ_F , действующей на колесо в точке контакта с опорной поверхностью [6, 7].

Для предварительной оценки плавности хода стандартной и гидроэластомерной подвесок предлагается использовать двухмассовую одноосную расчетную модель автомобиля [4, с. 108] (рис. 8). Двухмассовая одноосная расчетная модель автомобиля позволяет получить приемлемые результаты при сравнительно простых исходных уравнениях движения. Подрессоренная масса M (рис. 8), рассматривается как твердое тело, в которую включены все упруго связанные с ней массы. Неподрессоренная масса подвески $m_{нп}$ подвески соединяется с подрессоренной частью упругим звеном с жесткостью $C_{п}$ и демпфирующим звеном с коэффициентом демпфирования $K_{п}$. Коэффициент демпфирования $K_{п}$ может принимать значения k_3 или K_a , соответствующее коэффициенту демпфирования гидравлического амортизатора.

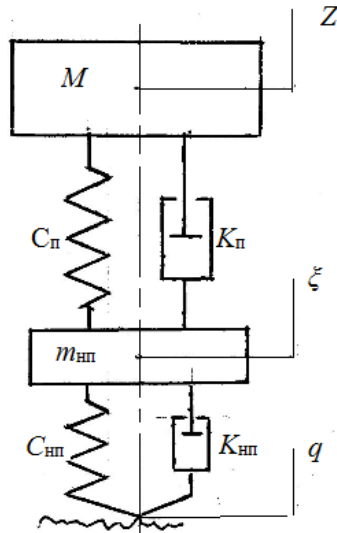


Рис. 8. Двухмассовая расчетная модель подвески

Влияние шины на характер колебательных процессов учитывается с помощью приведенных значений жесткости шины $C_{нп}$ и коэффициента демпфирования шины $K_{нп}$. Системы дифференциальных уравнений, описывающие движение масс расчетных моделей, соответственно, с элементами вязкого трения приведены ниже [4, 5] (9):

$$\begin{cases} M\ddot{z} + K_{п}(\dot{z} - \dot{\xi}) + C_{п}(z - \xi) = 0 \\ m_{нп}\ddot{\xi} - K_{п}(\dot{z} - \dot{\xi}) - C_{п}(z - \xi) + K_{нп}(\dot{\xi} - \dot{q}) + C_{нп}(\xi - q) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

где: z, \dot{z}, \ddot{z} – соответственно перемещение, скорость и ускорение поддрессоренной массы;

$\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – соответственно перемещение, скорость и ускорение неподрессоренной массы;

q, \dot{q} – соответственно ордината и скорость изменения ординаты микропрофиля;

$C_{п}$ – жесткость подвески, равна жесткости эластомера C_3 ;

$K_{п}$ – коэффициент сопротивления амортизатора (при установке гидроэластомерного пакета считается равным сумме условного коэффициента сопротивления, k_3 и коэффициента сопротивления однотрубного амортизатора).

Коэффициент сопротивления амортизатора должен быть рассчитан с учетом кинематической схемы подвески – приведен к колесу. Частоты гармонических составляющих случайного процесса возмущения могут выбираться на линейной шкале с заданной степенью дискретизации или соответствующими центральным частотам октавных или треть октавных диапазонов. Амплитуда гармонической составляющей определяется в соответствии со значением дисперсии для заданного частотного диапазона. В работе используется метод суперпозиции гармонических функций с различной частотой и амплитудой колебаний, составляющих спектр случайного процесса (моделирование полигармонической функцией) [8]. Схема этого способа изображена на рис. 9 и 10.

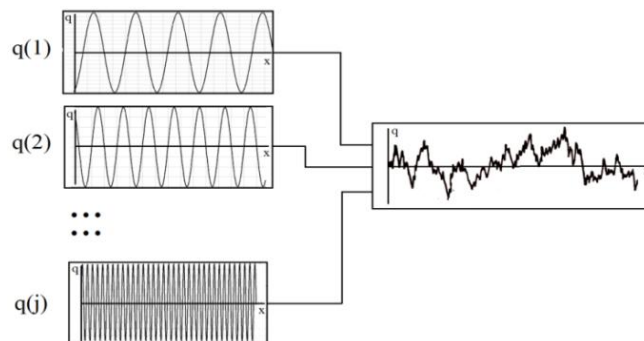


Рис. 9. Математическое представление микропрофиля

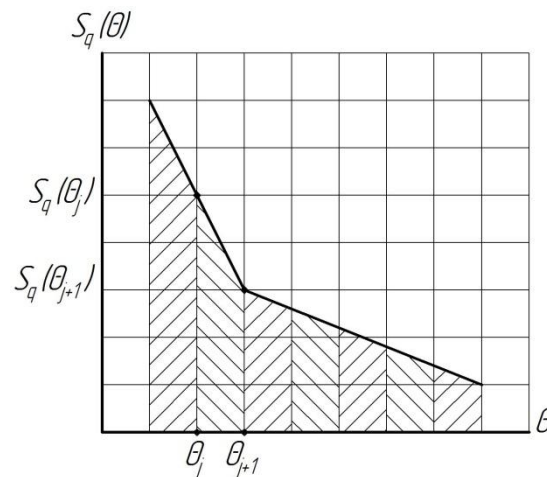


Рис. 10. Дисперсия спектральной плотности микропрофиля

Дисперсия, соответствующая гармоническому процессу со средней частотой интервала $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$ равна площади, ограниченной кривой функции в пределах заданного частотного интервала (10):

$$D_j = \frac{S_q(\theta_{j+1}) + S_q(\theta_j)}{2} (\theta_{j+1} - \theta_j) \quad (10)$$

где: D_j – дисперсия функции спектральной плотности микропрофиля для интервала путевой частоты $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$;

$S_q(\theta_j), S_q(\theta_{j+1})$ – значения, спектральной функции при значениях путевой частоты, равных θ_j, θ_{j+1} .

Среднее значение частоты интервала принимается равным (11):

$$\theta_{j\text{cp}} = \frac{\theta_j + \theta_{j+1}}{2} \quad (11)$$

где: $\theta_{j\text{cp}}$ – средняя частота интервала $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$.

В микропрофиле дороги содержатся неровности различной длины, которые могут вызывать возмущения разной частоты. Указанные параметры связаны соотношениями (12):

$$T_\omega = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{s}{v} \quad (12)$$

где T_ω – время проезда неровности, [с];

$\omega = 2\pi f$ – частота воздействия дорожных неровностей, [рад/с];

f – циклическая частота, $f = \frac{v}{s}$, [с⁻¹];

v – скорость автомобиля, [м/с];

s – длина неровности, м.

Виртуальное моделирование

Решение дифференциальных уравнений выполняется численными методами в программе MATLAB/Simulink. На рис.11 и 12 показана модель микропрофиля, реализованная в соответствии с выражениями (9) – (12). Алгоритм моделирования процессов предусматривает варьирование частоты возмущающего воздействия при различных (постоянных) скоростях движения автомобиля, например (40, 60, 80) км/ч. Процессы изменения вертикального ускорения и нормальной реакции являются функцией времени. Выборочные реализации процессов должны быть стационарными. Учет трения эластомера осуществляется с помощью «условного» коэффициента демпфирования эластомера.

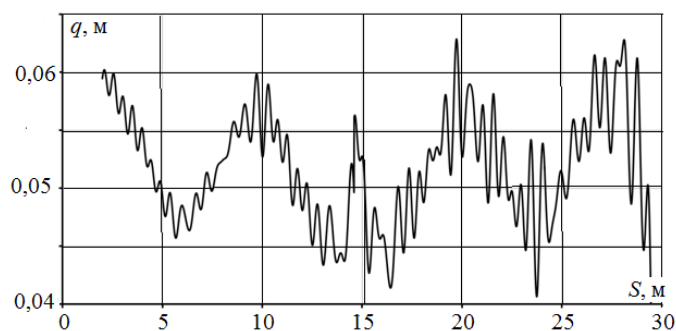


Рис. 11. Модель микропрофиля булыжной дороги ровного замощения

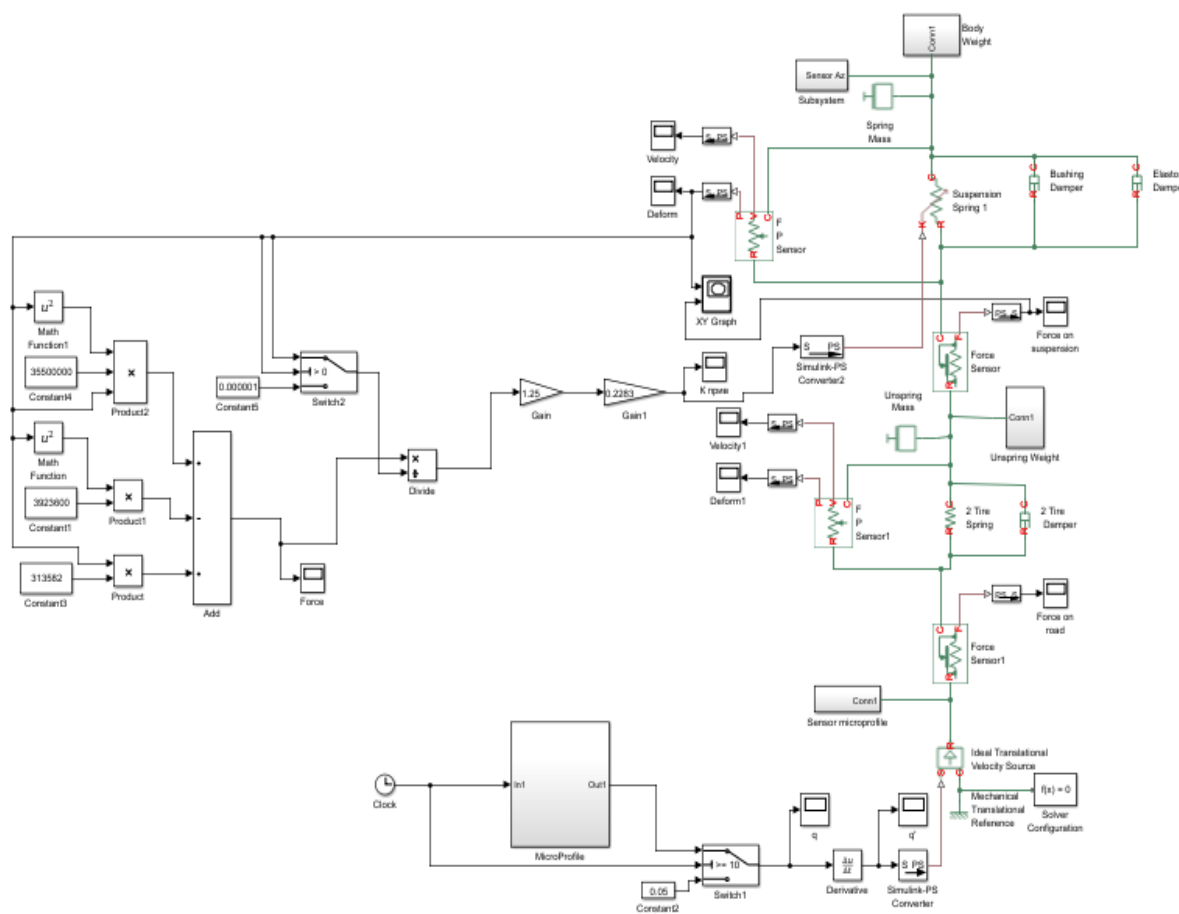


Рис. 12. Двухмассовая математическая модель гидроэластомерной подвески в программном комплексе MATLAB/Simulink

Результаты и выводы

На рис.13 и 14 приведены результаты аналитической работы – зависимости величин СКВ виброускорений $\sigma_{\ddot{z}}$, нормальной реакции в пятне контакта колеса с дорогой σ_F для гидроэластомерной подвески и те же зависимости для стандартной подвески с гидравлическим амортизатором.

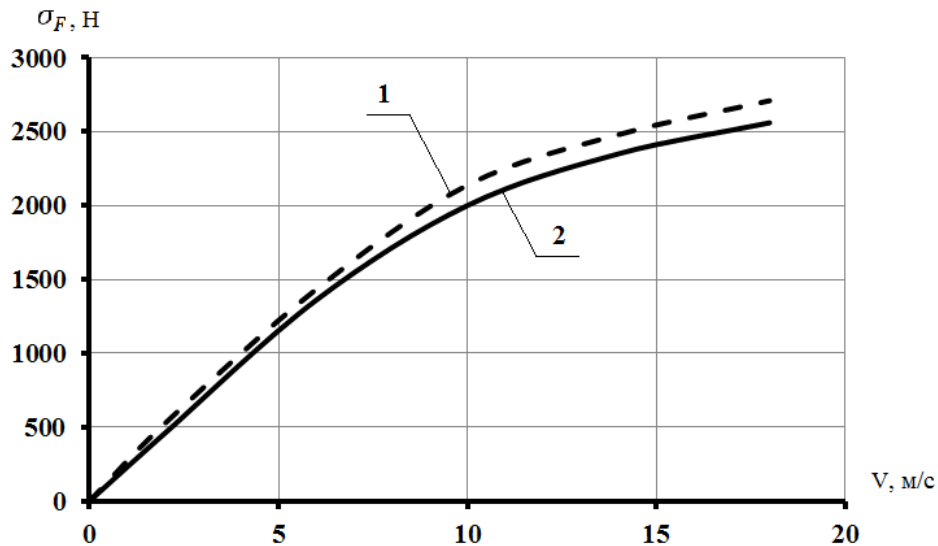


Рис. 13. СКВ нормальной реакции на колесе:

1 – для подвески с гидравлическим амортизатором; 2 – для гидроэластомерной подвески

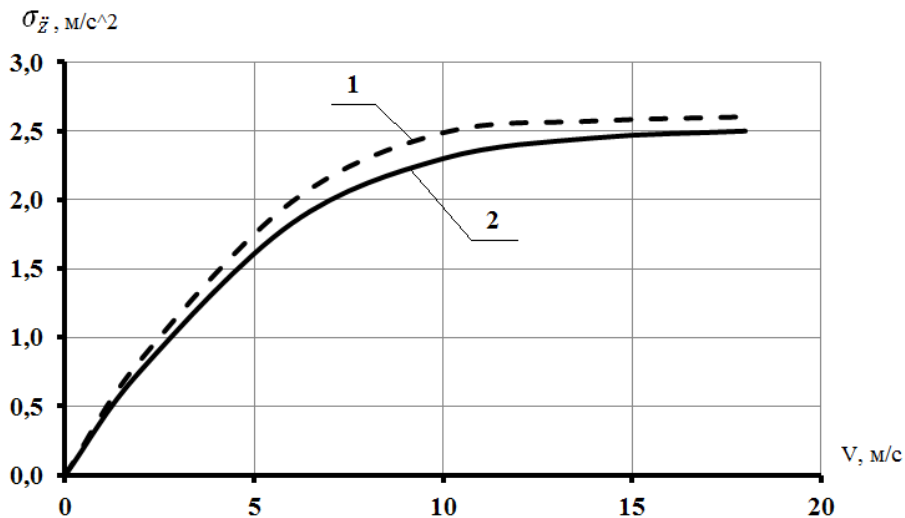


Рис. 14. СКВ виброускорений на раме автомобиля:

1 – для подвески с гидравлическим амортизатором; 2 – для гидроэластомерной подвески

Сравнительный анализ СКВ виброускорений и нормальных реакций для стандартной подвески с гидравлическим амортизатором и гидроэластомерной подвески позволяет сделать вывод о наличии у альтернативной подвески более качественных показателей плавности хода. Величины вертикальных виброускорений ниже в среднем на 5,4 %, величины нормальных реакций – на 4,6 %. Кроме этого, наблюдается уменьшение неподрессоренных масс на 5,1 % по сравнению со стандартной подвеской. В перспективе подобные конструкции должны иметь более существенные преимущества перед рессорными подвесками с точки зрения энергоемкости и нуждаются в дополнительных разработках и исследованиях.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗельNext с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 г. №218).

Библиографический список

1. **Кристенсен, Р.** Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. Мир, 1974. – 339 с.
2. **Яценко, Н.Н.** Плавность хода грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко, О.К. Прутчиков. – М.: Машиностроение, 1968. – 220 с.
3. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
4. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / Под ред. А.А. Хачатурова – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
5. **Мусарский, Р.А.** Математические модели колесных экипажей: учебное пособие. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2008. – 164 с.
6. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования / «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем», 2008. – 46 с.
7. «Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств» / Утвержден постановлением Правительства РФ №720 от 10.09.2009 г.
8. **Малеев С.И.,** Аналитические исследования динамики подвески / С.И. Малеев, С.М. Огороднов, Е.В. Степанов, А.В. Пинчин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 6.– С. 88-95.

*Дата поступления
в редакцию: 26.07.2020*

E.V. Stepanov, Y.I. Molev, S.M. Ogorodnov, A.S. Vashyrin

**EVALUATION OF CAR RIDE COMFORT
WITH HYDROELASTOMER SUSPENSION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: to determine the criteria of car ride comfort with a hydroelastomer suspension and compare with the values obtained for the standard (basic) design of the car Gazelle Next.

Methodology: to estimate the car ride comfort, it is necessary to determine the elastic characteristic and the characteristic of the shock absorber of the standard suspension, based on the data from the design documentation. In addition to conduct bench tests of the hydroelastomer to determine the elastic characteristics and its own damping coefficient. To bring characteristics to the «wheel» by the graphic-analytical method. Based on the data obtained, create mathematical models of suspensions in the MATLAB/Simulink software and formation of a random perturbation of the micro-profile as a sum of harmonic components. Conduct a virtual simulation of the movement of a car with two types of suspensions at different speeds and compare the results according to two criteria for the car ride comfort - RMS of vertical accelerations and RMS of the normal reaction on the wheel.

Findings: 1. The RMS of vertical accelerations of the hydroelastomer suspension is, on average, 5.4 % less than that of the standard suspension. 2. The RMS of the normal reaction on the wheel of the hydroelastomer suspension is, on average, 4.6 % less than that of the standard suspension. 3. The unsprung mass of the hydroelastomer suspension is, on average, 5.1 % less than that of the standard suspension.

Key words: car, suspension, elastomer, hydraulic shock absorber, ride comfort, elastic characteristic, damping coefficient, testing, microprofile, modeling, two-mass model, MATLAB/Simulink.

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_132

А.В. Тумасов, П.О. Береснев, В.И. Филатов, Д.Ю. Тюгин, А.В. Улитин

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ ПРИ ПАРКОВКЕ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено описание разработки системы активной помощи водителю при выполнении маневров парковки. Проведен обзор рынка существующих систем в области помощи водителю при парковке от различных автопроизводителей. По итогам анализа результатов обзора предложен алгоритм функционирования разрабатываемой системы, а также методы расчета положения транспортного средства, поиска парковочного места и генерации траектории для парковки. Проведены виртуальные испытания системы в симуляторе CARLA. Намечены дальнейшие пути по адаптации системы на транспортные средства легкого коммерческого класса.

Ключевые слова: система помощи водителю, автоматическая парковка, легкие коммерческие автомобили, поиск парковочного места, генерация траектории.

Введение

Интеллектуальные системы помощи водителю получили большое распространение в транспортных средствах (ТС), осуществляющих грузопассажирские перевозки. Их развитие определяется необходимостью безопасности совершения транспортных операций и снижением операционных расходов компании. Для грузопассажирских перевозок применяются транспортные средства легкого коммерческого, среднетоннажного и тяжелого классов; все они имеют большие «слепые» зоны при осуществлении маневрирования. Большое значение для снижения вероятности наступления ДТП имеют системы помощи при парковке, предназначенные для упрощения данной операции.

Система помощи при парковке – это система с элементами автономного маневрирования, способная в автоматическом или полуавтоматическом режиме переместить транспортное средство с полосы движения на парковочное место параллельным или перпендикулярным способом [1, 2]. Она предназначена для повышения комфорта и безопасности маневрирования в ограниченных условиях парковки, где для управления автомобилем требуется внимание и опыт водителя. Парковочный маневр выполняется посредством скоординированного управления углом поворота колес и движения транспортного средства (что исключает столкновения в пределах доступного пространства).

Для анализа существующих решений в области помощи водителю при парковке был проведен бенчмаркинг систем от различных автопроизводителей. Характеристики некоторых из них представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Бенчмаркинг систем помощи водителю при парковке

Функции	Mercedes-Benz	Volkswagen	Toyota	Ford
Сенсоры	Ультразвуковые сенсоры 4-2-4 (передний бампер, на борту, задний бампер)	Ультразвуковые сенсоры 4-8-4	Ультразвуковые сенсоры 4-2-4	Ультразвуковые сенсоры 4-0-4

Окончание табл. 1.

Функции	Mercedes-Benz	Volkswagen	Toyota	Ford
Дополнительные сенсоры	Камера заднего вида	Камера заднего вида, радары	Камера заднего вида (обнаружение мест по разметке), радар слепых зон	Камера заднего вида, радар слепых зон
Органы управления системой	Кнопка подтверждения, кнопка отмены, поворотники, рычаг селектора	Кнопка активации, указатели поворота	Кнопка активации, указатели поворота	Кнопка вкл. на приборной панели, поворотники, рычаг селектора
Методы включения системы	Автоматически при скорости 35 км/ч и ниже и движения ТС прямо	Автоматически при скорости ниже 40 км/ч	Кнопка на приборной панели	Кнопка на приборной панели
Управление системой РА тормозной системой ТС	Присутствует на автоматической коробке передач	Отсутствует	Отсутствует, но система экстренного торможения активна	Присутствует

Анализ информации показывает, что все автопроизводители используют ультразвуковые датчики в системах помощи при парковке. Различие между системами заключается в количестве боковых датчиков (от 0 до 2), а также датчиков, установленных в задний бампер (от 2 до 4). Все из рассмотренных систем используют также камеру заднего вида. Дополнительно Volkswagen, Ford [3] используют в своих ТС радары. Также следует отметить, что реализация функций системы помощи при парковке у автомобилей Mercedes-Benz [4], Ford [3] предполагает управление селектора коробки переключения передач и педалью акселератора водителем. Toyota [5] и Volkswagen предлагают более автономный функционал подобной системы, при котором водителю необходимо лишь активировать систему с помощью кнопки или сенсорного дисплея. Все рассмотренные автомобили имеют как визуальные, так и звуковые индикаторы оповещения водителя.

Существенные различия в системах связаны с информацией, запрашиваемой при парковке у электронного блока управления транспортного средства. Системы всех рассмотренных автопроизводителей запрашивают информацию о скорости, положении селектора коробки переключения передач, показаниях ультразвуковых датчиков, положение рулевого колеса. Некоторые системы также запрашивают статус включения указателей поворота (Mercedes Benz, Ford), а другим необходима информация о статусе закрытия дверей (Mercedes Benz) и статусе ремня безопасности (Ford). Mercedes Benz и Volkswagen автоматически активируют систему РА при скорости ниже 35 км/ч и 40 км/ч соответственно. При этом у производителей Toyota и Ford отсутствует пассивный режим системы. Диапазон максимальных скоростей, при котором возможна активация систем, находится в диапазоне от 20 до 40 км/ч. Mercedes Benz обеспечивает полностью автоматический выбор парковочного места, тогда как другие автопроизводители оставляют за водителем выбор варианта параллельной или перпендикулярной парковки, а также выбор стороны поиска парковочного места (слева или справа от ТС). Также можно сделать вывод о недостаточном покрытии ниши легких коммерческих автомобилей (ЛКА) системами помощи при парковке. Увеличение габаритных размеров ТС ведет к усложнению процесса парковки. Ввиду этого актуальным является использование системы, способной помогать водителю коммерческого автомобиля при осуществлении парковки.

Проведенный бенчмаркинг автомобилей с рассматриваемой системой показывает, что существуют три основных типа ассистентов парковки, выполняющих следующие функции:

- 1) помощь в нахождении парковочного места (ПМ) и управление рулевым механизмом при парковке;
- 2) помощь в нахождении ПМ, управление рулевым механизмом и переключении передач при парковке;
- 3) помощь в нахождении ПМ и автоматическая парковка.

В настоящей статье отражена система первого типа, процесс разработки которой представлен далее.

Разработка системы

Ключевой концепцией систем РА является планирование и параметризация основных профилей управления поворота колес и скоростью транспортного средства для достижения желаемой формы траектории движения в пределах доступного пространства. Парковочный маневр выполняется в виде последовательности управляемых движений с использованием данных, полученных при использовании ультразвуковых датчиков. Управление рулевым колесом и скоростью просчитывается в реальном времени. Описанный ниже подход способен генерировать различные формы траектории, необходимые и оптимальные для выполнения парковочных маневров.

Разрабатываемая в рамках проекта система воздействует на рулевое управление, а водителю доступно управление педалями акселератора и тормоза.

Общий алгоритм работы системы заключается в выполнении следующих шагов:

- 1) поиск парковочного места;
- 2) обнаружение свободного парковочного места (для параллельной или перпендикулярной парковки);
- 3) инструктирование водителя о порядке дальнейших действий;
- 4) завершение парковки.

Система разрабатывается с учетом существующих требований стандарта ISO 16787 [6]. Требования стандарта охватывают большой спектр требований: от основных функций системы (п. 5.1) и интерфейса взаимодействия между водителем и системой (п. 5.2) до требований к минимальной производительности системы (п. 5.3) и требований к испытаниям производительности (п. 5.4). Из перечисленных стандартов вытекают следующие параметры системы.

Система помощи при парковке водителю, разрабатываемая в рамках проекта, состоит из следующих компонентов:

- 1) ультразвуковые датчики;
- 2) блок управления РА;
- 3) блок обработки данных ультразвуковых датчиков;
- 4) HMI интерфейс
- 5) зуммер.

Ультразвуковые датчики необходимы для определения расстояния до препятствий при парковке. Данные, получаемые с датчиков, считываются блоком обработки данных ультразвуковых датчиков, а затем направляются в блок управления РА, реализующий функционал системы помощи при парковке. Зуммер используется для подачи звуковых уведомлений пользователю системы.

Система РА обеспечивает следующие функции:

- 1) поиск парковочного места для параллельной и перпендикулярной парковки;
- 2) управление рулевым колесом в момент парковки;
- 3) визуальное и звуковое представление водителю информации о статусе работы системы;

- 4) визуальное и звуковое представление водителю информации об ошибке работы системы;
- 5) вывод инструкции для водителя.
- б) самодиагностика системы.

Блок-схема алгоритма системы помощи водителю при парковке представлена на рис. 1.

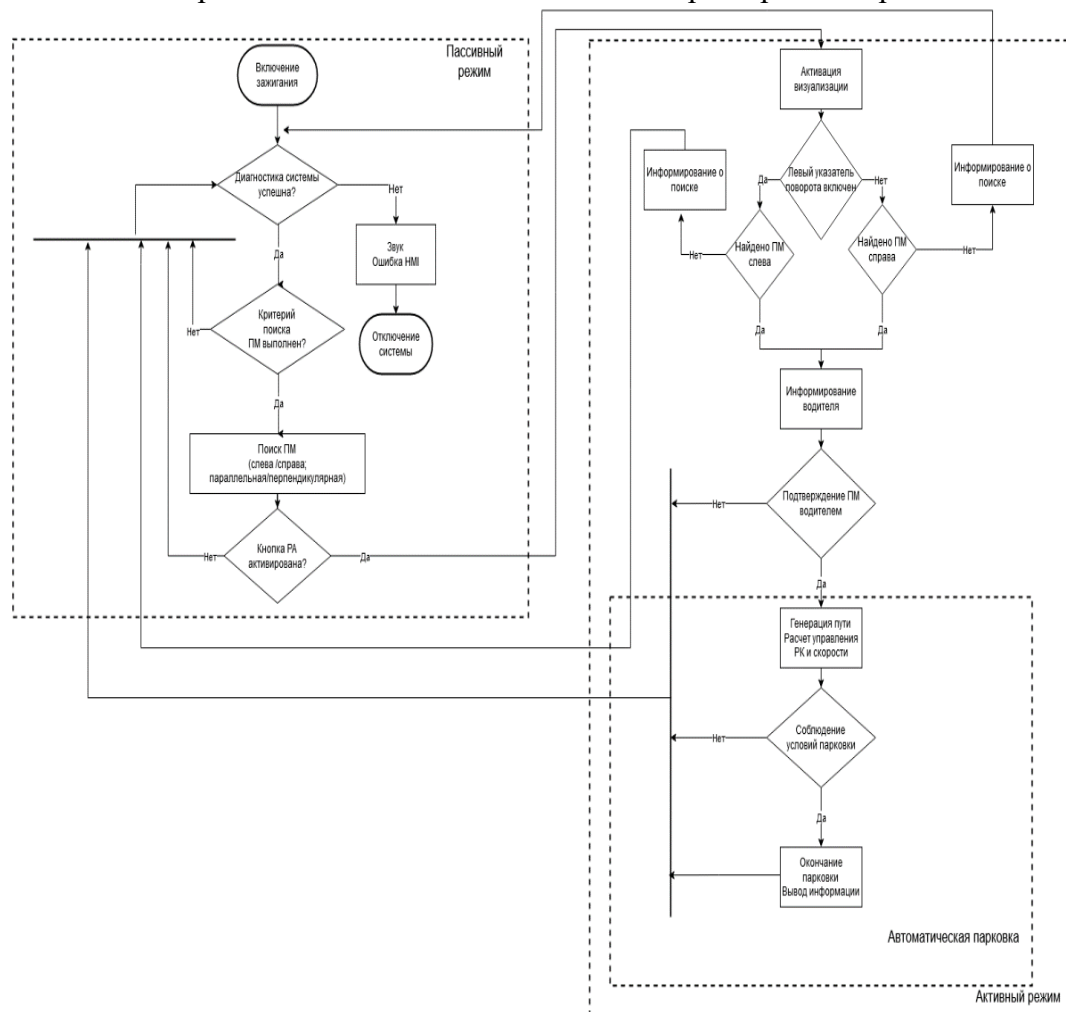


Рис. 1. Схема функционирования системы помощи при парковке

Как видно из рис. 1, система может находиться в трех режимах:

- пассивный режим (Поиск ПМ без уведомлений);
- активный режим (Поиск ПМ с уведомлениями);
- автоматическая парковка.

Основными элементами в системе помощи при парковке является расчет положения транспортного средства, поиск парковочного места и генерация траектории для парковки ТС. Рассмотрим каждый из этих элементов в отдельности. Алгоритм определения положения ТС основан на расчете одометрии, которая представляет собой положение ТС в данный момент времени в двумерной декартовой системе координат OXY . Данные одометрии требуются для работы с ультразвуковыми датчиками, чтобы иметь представление о найденных объектах и их местоположении при движении ТС. Также они необходимы для автоматического управления рулевым механизмом, чтобы информировать систему на каком месте сгенерированной траектории находится ТС.

Для вычисления одометрии используются данные угла поворота колес и скорости машины. С помощью колесной базы и угла поворота колес вычисляется угловая скорость ТС по следующей формуле (1):

$$w = (V * \theta) / L \quad (1)$$

где w – угловая скорость [рад/с], V – скорость ТС [м/с], θ – угол поворота колес [рад]; L – колесная база [м.]

Таким образом, система имеет угловую и линейную скорость ТС в каждый момент времени. Для расчета одометрии представленные измерения усредняются. Усредненные значения угловой скорости v_{Yaw} и вектор скорости Xv по координате X и Yv по координате Y . Таким же образом считаются dt разница по времени между двумя измерениями в секундах. После этого происходят вычисления позиции транспортного средства. Вычисление происходит от точки $(X, Y) = (0, 0)$ с ориентацией машины Yaw равной нулю. При вычислении позиции транспортного средства используются следующие формулы (2-4):

$$X = (vX * \cos(Yaw) - vY * \sin(Yaw)) * dt \quad (2)$$

$$Y = (vX * \sin(Yaw) + vY * \cos(Yaw)) * dt \quad (3)$$

$$Yaw = v_{Yaw} * dt; \quad (4)$$

Для обеспечения работы системы в пассивном режиме данные одометрии вычисляются постоянно после запуска системы. Метод определения парковочного места был разработан путем проведения сравнительных испытаний систем помощи водителю при парковке. Для этого производились тесты с параллельной и перпендикулярной парковкой. По итогам тестирования были выявлены несколько особенностей:

- система не может детектировать объекты, находящиеся на парковочном месте;
- система может обнаружить только те пм, которые находятся между двумя объектами, при этом расстояния между объектами достаточно для парковки;
- система уведомляет о найденном пм, когда передний ультразвуковой датчик увидит объект, за которым нужно припарковаться.

По этим данным был разработан следующий алгоритм нахождения парковочного места. Для него используются данные с передних боковых ультразвуковых датчиков рядом с передними колесами. При поиске ПМ слева от ТС используется левый датчик, а при поиске справа – правый. С помощью этих датчиков система проводит отслеживание объектов с нужной стороны. Если обнаружено два объекта, расстояние между которыми является достаточным по длине для парковки данного ТС, система уведомляет о найденном парковочном месте.

Алгоритм построения траектории разделяется на две части. Первая часть собирает карту препятствий и генерирует точки старта и конца траектории парковки, а вторая генерирует траекторию по имеющейся карте препятствий по требуемым точкам старта и конца.

Сбор карты препятствий происходит во время поиска ПМ с помощью ультразвуковых датчиков. Для этого используются все ультразвуковые датчики на ТС. Сбор карты прекращается после того, как парковочное место было обнаружено. После этого карта ограничивается по размерам для уменьшения области поиска траектории и наносятся ограничения на парковочное место. Ограничения на парковочное место нужны, чтобы исключить генерацию некорректной траектории, по которой ТС способно совершить опасные маневры, например, заехать на бордюр во время парковки. Далее создаются точки старта и конца траектории парковки таким образом, чтобы ТС припарковалась за ближайшим объектом.

Вторая часть алгоритма построения траектории генерирует непосредственно траекторию парковки по поступившей карте препятствий и точкам старта и конца. Для генерации используется алгоритм Hybrid A* [7]. Hybrid A* прокладывает путь из точки старта в точку конца маршрута методом перебора, перемещаясь по сетке препятствий на одну клетку. Из всех найденных траекторий алгоритм выбирает самый оптимальный. Алгоритм Hybrid A* используется во время выполнения маневров автоматической парковки и позволяет строить оптимальные траектории в практически неизвестных и потенциально сложных условиях (рис. 2).

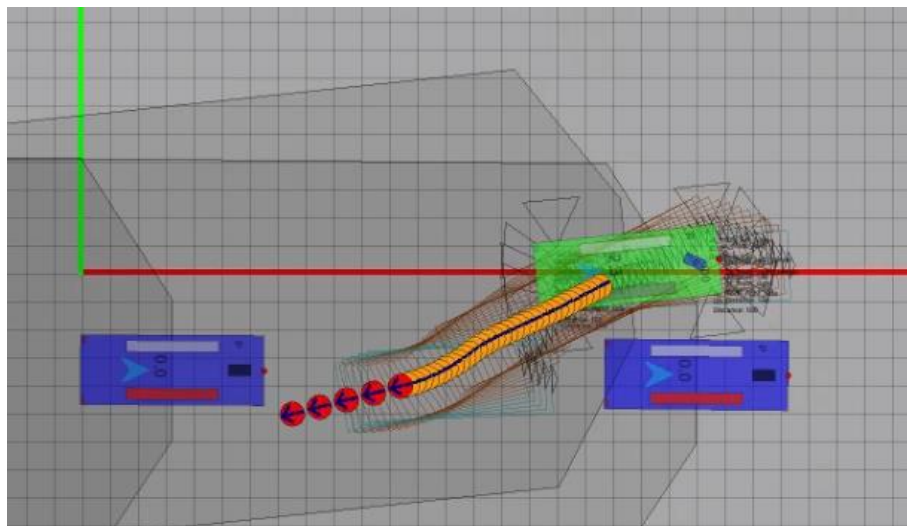


Рис. 2. Построение траектории с использованием алгоритма Hybrid A*

Моделирование испытаний системы

Для проверки достоверности принятых решений в части разработки систем было принято решение использовать виртуальный симулятор CARLA [8]. Использование виртуального симулятора позволяет упростить процесс разработки системы, так как возможно проводить испытания на каждой стадии разработки, что позволяет выявлять недостатки и ошибки разрабатываемой системы. Данный виртуальный симулятор является *open source* продуктом, служащим для разработки автоматических систем вождения. В нем имитируется городская среда со зданиями, пешеходами, автомобилями и другими объектами, а также меняющаяся погода. Для моделирования необходимых кейсов были использованы данные о скорости ТС, положения угла колес и данные с ультразвуковых датчиков, расположенных на автомобиле. Для симулятора был разработан модуль, позволяющий имитировать сигналы с ультразвуковых датчиков системы. Данный модуль был интегрирован в симулятор CARLA.

Испытания представляли собой перпендикулярную и параллельную парковку слева и справа с парковочными местами разного размера. В качестве машины с системой помощью при парковке был использован стандартный автомобиль (схожий с ТС легкого коммерческого класса), используемый в симуляторе по периметру которого располагалась 12 ультразвуковых датчиков. В качестве объектов, между которыми нужно было припарковаться, выступали также транспортные средства (рис 3).

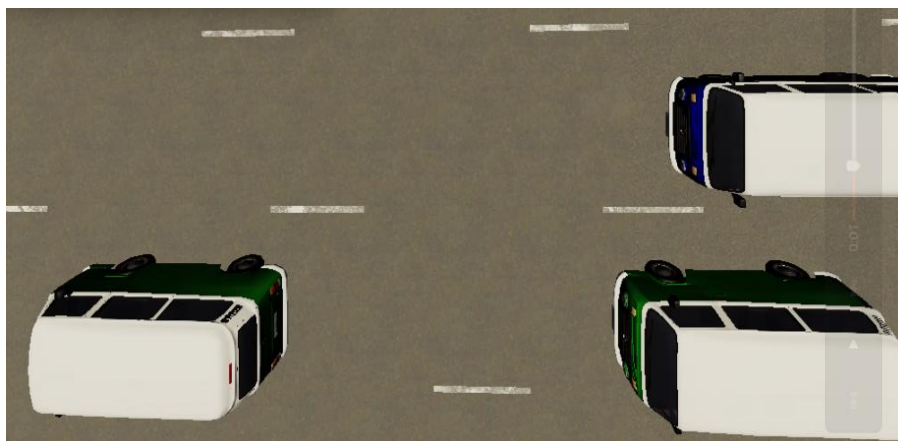


Рис. 3. Начальные условия виртуальных испытаний

Тестирование поиска парковочного места и генерации траектории были проведены успешно. Система находила ПМ достаточные для парковки и пропускала слишком маленькие по размеру парковочные места. Система сгенерировала траектории для парковки ТС слева и справа для обоих видов поддерживаемой парковки. На рис. 4 приведен пример проведения испытаний в компьютерном симуляторе CARLA в режиме автоматической парковки при движении по сгенерированной траектории.



Рис 4. Испытания системы помощи водителю при парковке в симуляторе CARLA

Анализировались следующие параметры:

- 1) расстояние от текущего положения машины до конечной точки;
- 2) режим работы системы помощи при парковке (пассивный режим, поиск пм, генерация траектории, вывод инструкций водителю для парковки, уведомление об ошибке, сброс системы, выключение системы);
- 3) координаты тс (центра задней оси);
- 4) поворот колес и ориентация ТС;
- 5) ошибка ориентации ТС (cross orientation error (coe));
- 6) включение задней передачи;
- 7) скорость;
- 8) ошибка траектории (cross track error (cte)).

В данном режиме производится автоматическое управление рулевым механизмом. Это видно по графикам 3 слева и 1 справа. Так же на рис. 4 (справа график 3), видно, что нет превышения скорости при проведении испытания. Так же система уведомляет водителя о том, что нужно ехать прямо для парковки.

Согласно рис. 4, метод нахождения парковочного места является работоспособным, а алгоритм генерации траектории дает устойчивые результаты.

Выводы

Проведен анализ рынка систем помощи водителю при парковке. В результате был составлен бенчмаркинг систем различных производителей, а также сделаны выводы об общих подходах, применяемых в таких системах.

Предложен алгоритм и разработана собственная система помощи водителю при парковке, которая в дальнейшем может быть установлена на транспортные средства сегмента

ЛКА. Описаны общие подходы, используемые при создании системы помощи водителю при парковке. В частности, был предложен алгоритм генерации траектории (основанный на алгоритме Hybrid A*) при выполнении автоматического маневра парковки. Были представлены методы расчета положения транспортного средства и поиска парковочного места. Проведены тесты в компьютерном симуляторе CARLA, которые показали положительные результаты и доказали работоспособность разработанной системы.

Дальнейшее развитие данных исследований будет связано с реализацией и адаптацией системы помощи водителю при парковке на семействе автомобилей Группы ГАЗ. Также планируется проведение натурных испытаний системы и сравнительного анализа виртуальных и натурных испытаний системы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Mörhed, J.** Automatic Parking and Path Following Control for a Heavy-Duty Vehicle / J. Mörhed, F. Östman. – 2017.
2. **Wada, M.** Development of advanced parking assistance system / M. Wada, K.S. Yoon, H. Hashimoto // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – Т. 50. – №. 1. – С. 4-17.
3. FORD [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.ford.com/technology/driver-assist-technology/enhanced-active-park-assist/>, свободный.
4. MERCEDES-BENZ [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.la.mercedes-benz.com/en/passengercars/mercedes-benz-cars/models/gla/gla-suv/explore.pi.html/mercedes-benz-cars/models/gla/gla-suv/explore/intelligent-technologies/parking-pilot>, свободный
5. TOYOTA [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/safety-technology/parking-aids>, свободный
6. ISO 16787 -2017. Intelligent transport systems – Assisted parking system (APS) – Performance requirements and test procedures.
7. **Petereit, J.** Application of Hybrid A* to an Autonomous Mobile Robot for Path Planning in Unstructured Outdoor Environments / J. Petereit, T. Emter, C.W. Frey, T. Kopfstedt A. Beutel // ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics, Munich, Germany, 2012, pp. 1-6.
8. Виртуальный симулятор CARLA [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://carla.org/>, свободный.

*Дата поступления
в редакцию: 30.07.2020*

A.V. Tumasov, P.O. Beresnev, V.I. Filatov, D.Yu. Tyugin, A.V. Ulitin

**DEVELOPMENT OF ADVANCED DRIVER PARKING ASSISTANCE SYSTEM
FOR COMMERCIAL VEHICLES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The paper is devoted to the description of the development of a system of active driver assistance when performing parking maneuvers.

Design / methodology / approach: A market survey of existing systems in the field of driver assistance with parking from various car manufacturers was carried out.

Findings: Based on the conclusions made after analyzing the results of the review, an algorithm for the functioning of the system being developed is proposed, and methods for calculating the position of a vehicle, finding a parking space and generating a trajectory for parking are described. Virtual tests of the system were carried out in the CARLA simulator.

Research limitations/implications: Limitations of the developed system are described.

Originality/value: The system being developed is specially designed to be used in GAZ Group's light commercial vehicles.

Key words: advanced driver assistance system, automatic parking, light commercial vehicles, parking space search, trajectory generation.

УДК 629.114

DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_141

А.М. Умирзоков¹, К.Т. Мамбеталин², С.С. Сайдуллозода^{1,2}, У.М. Маллабоев^{3,4}

К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫМИ АВТОМОБИЛЯМИ-САМОСВАЛАМИ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими¹Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)²Тюменский индустриальный университет³,Тобольский индустриальный институт⁴

Рассмотрены вопросы оценки эффективности преобразования тепловой энергии в механическую работу при эксплуатации карьерных автомобилей-самосвалов БелАЗ-7540 В, а также стратегия управления автомобилем в горных условиях. Дано определение эффективности управления автомобилем, на основе которого разработаны методика и математические модели оценки эффективности работы водителя. Применительно к условиям эксплуатации большегрузных автомобилей-самосвалов в горной местности наиболее значимыми являются энергетические и экономические показатели, а также показатели надежности. Оценка эффективности работы водителя по энергетическим и экономическим показателям выполнена на основе путевого расхода топлива и сменной производительности автомобиля-самосвала соответственно.

Эффективность управления большегрузным автомобилем-самосвалом по показателю материальных затрат оценена по расходу запасных частей и ремонтно-эксплуатационных материалов. Оценка эффективности функционирования водителя по показателям надежности выполнена на основе удельных затрат времени, труда и финансовых затрат на устранение эксплуатационных и ресурсных отказов.

Ключевые слова: моделирование, большегрузные автомобили, водитель, эффективность, горные условия, производительность автомобиля, ТО и ремонт, надежность, безопасность автомобиля.

Введение

В условиях сложной геометрии дороги в горной местности ключевым фактором эффективности преобразования тепловой энергии в механическую работу, используемую для выполнения транспортной операции, является водитель. Эффективность его функционирования в значительной мере формирует эффективность функционирования самого автомобиля и оказывает решающее влияние на систему «Водитель – автомобиль – дорога – среда» (ВАДС) в целом. Особое значение обретает этот аспект для большегрузных автомобилей, используемых в высокогорных условиях, при профиле с гравийным покрытием в двухсменном режиме, с неизбежно частыми и резкими маневрами.

Постановка задачи

Эффективность работы водителя грузового автомобиля можно определить как отношение достигнутого результата (в его энергетическом, экономическом, экологическом и материальном выражениях) в процессе преобразования тепловой энергии в механическую работу, используемую для транспортирования пассажиров и груза, к израсходованным ресурсам. Смысл понятия «эффективность водителя» вообще гораздо шире, нежели «надежность водителя». Если под надежностью можно понимать способность безошибочного управления транспортным средством при различных дорожных и погодных условиях в течение рабочего времени, то эффективность водителя – это та же надежность, достигнутая с наименьшими энергетическими, экономическими и материальными затратами, а также с наименьшим экологическим ущербом.

Для комплексной оценки эффективности управления автомобилем водителем \mathcal{E}_B на строительстве гидротехнических сооружений в горных условиях будем использовать выражение (1):

$$\mathcal{E}_B = \mathcal{E}_{эн} \cdot \mathcal{E}_{эк} \cdot \mathcal{E}_н \cdot \mathcal{E}_м, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{эн}$, $\mathcal{E}_{эк}$, $\mathcal{E}_н$, $\mathcal{E}_м$ – составляющие эффективности управления автомобилем по энергетическим, экономическим, надежностным показателям соответственно, а также по показателю материальных затрат.

Достигнутый результат эффективности водителя грузового автомобиля складывается из большого количества факторов: энергетического, экономического, надежностного, материального, экологического и эффективности за счет обеспечения безопасности движения. Для грузовых автомобилей в горных и высокогорных условиях эксплуатации существенными являются далеко не все перечисленные факторы [1]. Например, весьма незначителен в условиях строительства гидротехнических сооружений достигнутый экологический результат [2]. Карьерным дорогам свойственны незначительная плотность и интенсивность движения автомобилей, а парк грузовых автомобилей оснащен дизельными двигателями [3, 4]. За все время строительства ГЭС не были зафиксированы ДТП с тяжелыми последствиями. С учетом незначительности влияния экологических аспектов, а также эффективности за счет обеспечения безопасности дорожного движения в названных условиях, в практических расчетах оценки эффективности их можно не принимать во внимание [5, 6].

Энергетическая составляющая эффективности водителя $\mathcal{E}_{эн}$ формируется, в основном, за счет удельного расхода топлива на единицу выполненной работы или на единицу наработки (рис. 1). Для горных и высокогорных условий эксплуатации большегрузного автомобиля-самосвала характерна относительно низкая энергетическая эффективность водителя, зависящая от большого числа факторов. Наиболее важны приобретенные мастерство, знания, умения и навыки управления автомобилем в сложных горных условиях [7, 8]. Эффективность управления большегрузным автомобилем-самосвалом по экономическому показателю $\mathcal{E}_{эк}$ можно косвенно оценить по сменной производительности, которая, в зависимости от стиля вождения, варьирует в широких пределах (рис. 1). В условиях строительства Рогунской ГЭС наилучшие показатели сменной производительности наблюдаются, начиная с трехлетнего по шестнадцатилетний стаж работы водителя, достигая максимума к восьмому году.

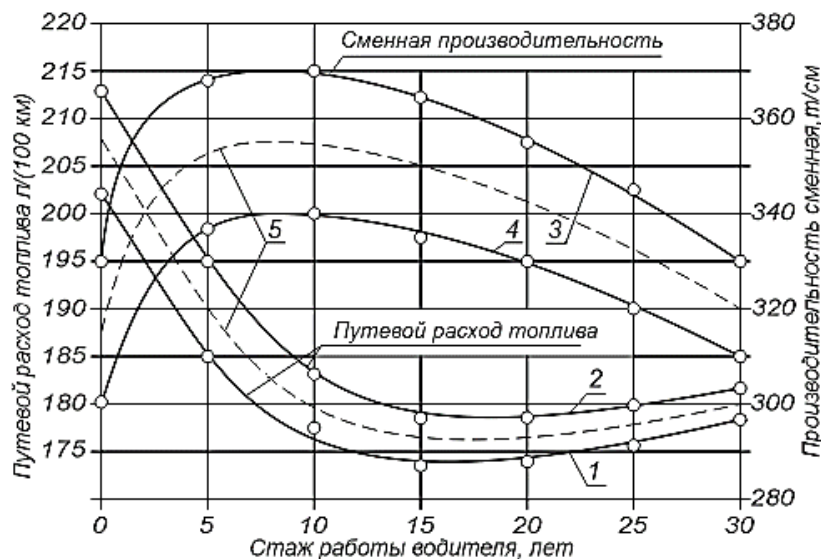


Рис. 1. Зависимость путевого расхода топлива и сменной производительности от стажа работы водителя:

- 1 и 3 – бережливый стиль вождения;
- 2 и 4 – агрессивный стиль вождения;
- 5 – средние значения показателей

Эффективность управления большегрузным автомобилем-самосвалом по показателю материальных затрат \mathcal{E}_m можно оценить по расходу запасных частей и ремонтно-эксплуатационных материалов (рис. 2).

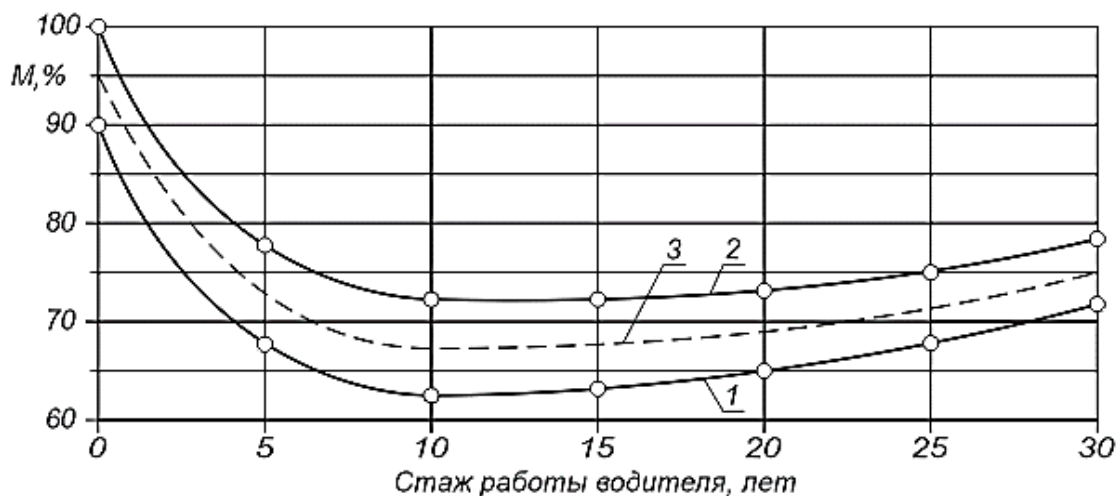


Рис. 2. Зависимость расхода запасных частей и материалов от стажа работы водителя:

- 1 – березливый стиль вождения;
- 2 – агрессивный стиль вождения;
- 3 – среднее значение показателя

В качестве оценочного параметра эффективности управления большегрузным автомобилем-самосвалом по показателю надежности \mathcal{E}_n принимаются экономические критерии безотказности и долговечности автомобиля, в частности, удельные затраты времени, труда и денежных средств на устранение эксплуатационных и ресурсных отказов (рис. 3).

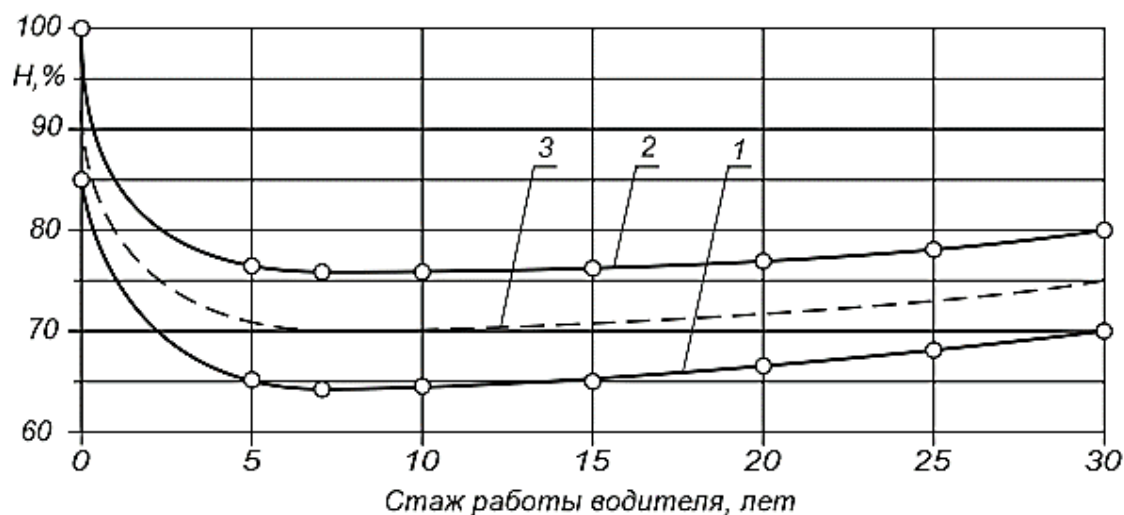


Рис. 3. Зависимость показателей надежности автомобиля от стажа работы водителя:

- 1 – березливый стиль вождения;
- 2 – агрессивный стиль вождения;
- 3 – среднее значение показателя

Энергетическую эффективность управления автомобилем можно определить из отношения (2):

$$\mathcal{E}_{эн} = \frac{Q_{\min}}{Q_i}, \quad (2)$$

где Q_{\min} и Q_i – соответственно, минимальное и текущее значения путевого расхода топлива.

Экономическая эффективность управления автомобилем определяется из отношения (3):

$$\mathcal{E}_{\text{эк}} = \frac{\Pi_{\text{max}}}{\Pi_i}, \quad (3)$$

где Π_{max} и Π_i – максимальное и текущее значения сменной производительности автомобиля соответственно.

Эффективность управления автомобилем по показателям надежности выражается отношением (4):

$$\mathcal{E}_n = \frac{H_{\text{max}}}{H_i}, \quad (4)$$

где H_{max} и H_i – соответственно, максимальное и текущее значения оценочных показателей надежности автомобиля;

Эффективность управления автомобилем по материальным затратам можно определить из отношения (5):

$$\mathcal{E}_m = \frac{M_{\text{min}}}{M_i}, \quad (5)$$

где M_{min} и M_i – соответственно, минимальное и текущее значения материальных затрат.

С учетом выражений (2-5) выражение (1) можно переписывать в виде (6):

$$\mathcal{E}_B = \frac{Q_{\text{min}}}{Q_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{max}}}{\Pi_i} \cdot \frac{H_{\text{max}}}{H_i} \cdot \frac{M_{\text{min}}}{M_i}. \quad (6)$$

На основе многолетних наблюдений для большегрузных карьерных автомобилей-самосвалов БелАЗ-7540В в условиях эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС по выражению (6) выполнены расчеты оценки эффективности управления автомобилем, результаты которых приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета эффективности управления автомобилем

Показатель оценки эффективности	Стаж работы							
	0	5	8	10	15	20	25	30
Путевой расход топлива Q_i , л/(100 км)	208	190	182	179,5	176,5	176,5	178	180
Q_{min} / Q_i	0,8486	0,9289	0,9698	0,9833	1,0	1,0	0,9916	0,9806
Сменная производительность Π_i , т/см	315	353	355	354	350	343	333	320
Π_{max} / Π_i	0,8873	0,9994	1,0	0,9972	0,9859	0,9662	0,9380	0,9014
Материальные затраты, M_i	95,0	80,0	68,0	67,0	68,0	39,0	71,0	75,0
M_{min} / M_i	0,7053	0,8375	0,9853	1,0	0,9853	0,9710	0,9437	0,8933
Показатели надежности автомобиля, H_i	90,0	71,0	70,0	70,0	71,0	72,0	73,0	75,0
H_{max} / H_i	0,7778	0,9859	1,0	1,0	0,9859	0,9722	0,9589	0,9333
Эффективность управления автомобилем, \mathcal{E}_B	0,4131	0,7627	0,9555	0,9805	0,9577	0,9121	0,8417	0,7369

Результаты расчетов по формуле (6) с использованием данных многолетних наблюдений представлены в виде графика зависимости эффективности управления большегрузным карьерным автомобилем-самосвалом от стажа работы водителя (рис. 4).

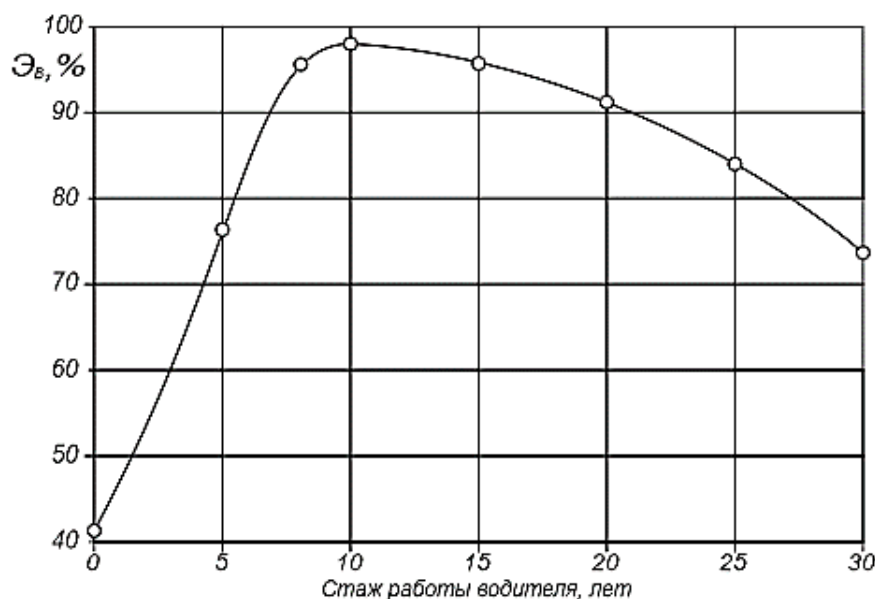


Рис. 4. Зависимость эффективности управления автомобилем-самосвалом БелАЗ-7540В от стажа работы водителя в горных условиях

Для расчета эффективности управления большегрузных карьерных автомобилей-самосвалов БелАЗ-7540В, эксплуатируемых на строительстве Рогунской ГЭС, предлагается эмпирическая формула в виде интерполяционного многочлена Лагранжа [9, 10] (7):

$$\mathcal{E}_B = 0,008857 \cdot t^3 + 0,5824 \cdot t^2 + 10,63 \cdot t + 41,31, \quad (7)$$

где t – стаж работы водителя, лет.

Уровень эффективности управления автомобилем представляет собой относительную характеристику качества грузоперевозки, основанную на сравнении значений показателей качества достигнутых эффективностей при различных стилях вождения. При установлении уровня эффективности управления автомобилем следует сопоставлять отдельные показатели эффективности и их совокупность, достигнутые водителем при бережливом стиле вождения с аналогичными отдельными показателями и их совокупностью, достигнутыми при агрессивном вождении.

Уровень эффективности управления автомобилем с учетом бережливого и агрессивного стилей вождения в общем виде можно выразить отношением (8):

$$\mathcal{E}_B = \frac{R_B}{R_A}, \quad (8)$$

где R_B – результат, достигнутый водителем при бережливом стиле вождения; R_A – результат, достигнутый водителем при агрессивном стиле вождения.

Приведенные графики (рис. 1-3) наглядно показывают эффективность управления автомобилем в зависимости от стиля вождения. Расхождения между эффективностями при бережливом и агрессивном стилях вождения по отдельным показателям эффективности варьирует в достаточно широких пределах в зависимости от стажа работы водителя.

Относительные расхождения между эффективностями при бережливом и агрессивном стилях вождения для i -того стажа работы водителя и n -ного показателя эффективности $P_{\mathcal{E}in}$ определялись из выражения (9):

$$P_{\mathcal{E}in} = \frac{R_{B_{in}} - R_{A_{in}}}{R_{B_{in}}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где R_{Bin} – результат, достигнутый водителем при бережливом стиле вождения для i -того стажа работы водителя и n -ного показателя эффективности; R_{Ain} – результат, достигнутый водителем при агрессивных стилях вождения для i -того стажа работы водителя и n -ного показателя эффективности.

Результаты расчетов, выполненные по выражению (9) для большегрузных карьерных автомобилей – самосвалов БелАЗ-7540В в условиях эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС сведены в табл. 2.

Таблица 2.

**Результаты расчета относительного расхождения
эффективности управления автомобилем при бережливых
и агрессивных стилях вождения по отдельным показателям эффективности $P_{Эin}$**

Относительное расхождение между эффективностями управления автомобилем при бережливом и агрессивном стилях вождения для n -го показателя эффективности, %	Стаж работы, лет						
	0	5	10	15	20	25	30
по путевому расходу топлива	5,2	5,1	3,8	2,8	2,5	2,2	1,1
по производительности	9,1	8,4	8,0	7,9	7,3	6,7	6,1
по материальным затратам	10,0	12,8	13,8	12,9	11,0	9,3	8,2
по надежности	15,0	15,0	15,1	14,5	13,6	12,8	12,5
среднее значение расхождения	9,825	10,325	10,175	9,525	8,600	7,738	6,975

В соответствии с данными табл. 2 представлены графики зависимости относительного расхождения между эффективностями управления большегрузным карьерным автомобилем – самосвалом при бережливом и агрессивном стилях вождения по отдельным показателям эффективности от стажа работы водителя (рис. 5).

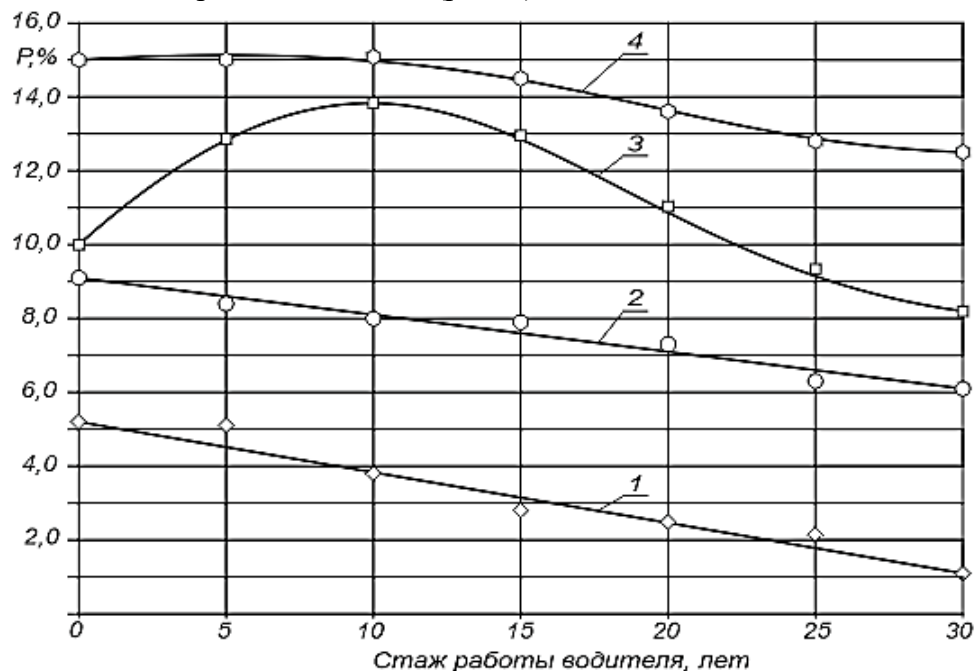


Рис. 5. График зависимости относительного расхождения между эффективностями управления большегрузным карьерным автомобилем – самосвалом при бережливом и агрессивном стилях вождения по отдельным показателям эффективности от стажа работы водителя:

1 – по путевому расходу топлива; 2 – по сменной производительности;
3 – по материальным затратам; 4 – по надежности

Среднее значение относительного расхождения между бережливым и агрессивным стилями вождения эффективности управления большегрузным карьерным автомобилем-самосвалом по суммарным показателям эффективности от стажа работы водителя показано на рис. 6.



Рис. 6. График зависимости среднего значения относительного расхождения эффективности управления большегрузным карьерным автомобилем-самосвалом при бережливом и агрессивном стилях вождения от стажа работы водителя

Выводы

1. Предложена методика оценки эффективности управления автомобилем. Экспериментально установлены зависимости эффективности управления автомобилем от стажа работы водителя, а также пределы изменения показателей эффективности при бережливом и агрессивном стилях вождения.
2. Разработана математическая модель зависимости эффективности управления автомобилем от стажа работы водителя, хорошо согласуемая с результатами экспериментальных исследований для горных условий Республики Таджикистан.
3. Показана оценка эффективности водителя в зависимости от психофизиологического состояния водителя.
4. Представлена оценка относительного расхождения между эффективностями управления при бережливом и агрессивном стилях вождения по отдельным показателям эффективности от стажа работы водителя.

Библиографический список

1. **Вахламов, В.К.** /Автомобили; Эксплуатационные свойства / В.К. Вахламов. – М.: Академия, 2005. – 240 с.
2. **Исмонзода, С.М.** Проблемы обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Таджикистан. **Турсунов, А.А.** Надежность водителя автомобиля в горных условиях. / А.А. Турсунов, Я. Юсупов // Труды ТТУ, Серия: Транспорт и дорожное хозяйство. – Вып. 2. – 1999. – С. 28-30.
4. **Patorniti, Nicholas P.** A systems approach to city design: Exploring the compatibility of sociotechnical systems. / Nicholas P. Patorniti, Nicholas J. Stevens, Paul M. Salmon. // Habitat International. Volume 66, August 2017. – P. 42-48.
5. **Рябчинский, А.И.** Экологическая безопасность автомобиля / А.И. Рябчинский, Ю.В. Трофименко, С.В. Шелмаков / Под ред. Член-корр. РАН Луканина В.Н./ МАДИТУ. – М., 2000. – 95 с.
6. **Графкина, М.В.** Экология и экологическая безопасность автомобиля: учебник / М.В. Графкина, В.А. Михайлов, К.С. Иванов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2016. – 320 с.

7. **Умирзоков, А.М.** Концептуальная модель оценки эффективности системы «Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда» / А.М. Умирзоков, К.Т. Мамбеталин, С.С. Сайдуллозода., А.А. Саибов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – № 1. – С. 37-46.
8. **Umirzokov, A.M.** Classification of factors influencing the reliability of the driver-vehicle-road-environment (DVRE) system in the conditions of mountain quarries. / A.M. Umirzokov, U.M. Mallaboev, S S Saidullozoda, Kh Kh Khabibullozoda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 817, 1 March 2020. – P 1-8.
9. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн // М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1977, – 832 с.
10. **Гнеденко, Б.В.** Математические методы в теории надежности. / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 2010, – 524 с.

*Дата поступления
в редакцию: 30.04.2020*

A.M. Umirzokov¹, K.T. Mambetalin², S.S. Saydulozoda^{1,2}, U.M. Mallaboev³.

TO THE ASSESSMENT OF MANAGEMENT HEAVY-DUTY DUMP TRUCKS EFFICIENCY IN MOUNTAIN CONDITIONS

Tajik Technical University named after M.S. Osimi¹
South Ural State University (national research university)²
Tyumen Industrial University³
Tobolsk Industrial (branch)⁴

Purpose: Justification and evaluation of the effectiveness of the management of heavy vehicles - dump trucks in mountain conditions.

Design / Methodology / Approach: The work is based on the fundamental laws of nature and is based on the results of many years of research in the field of improving the efficiency of the DVRE system in the construction of hydraulic structures in the mountainous regions of the Republic of Tajikistan, and in particular, evaluating the performance of drivers in order to improve the determination of the effectiveness of driving a heavy-duty dump truck using methods and methods of mathematical statistics and modeling.

Conclusions: A technique for assessing the effectiveness of driving a vehicle is proposed. The efficiency dependences of driving a vehicle on the length of driver service, as well as the limits of the change in performance indicators with lean and aggressive driving styles, were experimentally established. A mathematical model has been developed for the dependence of driving efficiency on driver experience, which is in good agreement with the results of experimental studies for the mountain conditions of the Republic of Tajikistan. An assessment of driver efficiency is shown depending on the psychophysiological state of the driver. An assessment of the relative discrepancy between the management performance in a lean and aggressive driving styles by individual performance indicators from the length of service of the driver is presented.

Limitations/implications research: Limitations related to this study are as follows: the work was carried out according to the results of many years of research, which may lead to some distortions of the research results. The studies were performed under the conditions of transport operations during the construction of the Rogun Hydroelectric Power Plant, under various climatic conditions, speed and load conditions, as well as at different altitudes. In the course of many years of testing, there has been some turnover of driver personnel, as well as with the use of dump trucks with various operating time and reliability levels.

Originality/value: The definition of driving efficiency as a ratio of the achieved result (in its energy, reliability, economic, environmental and material terms) to the consumed resources is proposed. In addition, the efficiency of the driver of a heavy-duty dump truck was evaluated as the product of the components of the efficiency of driving a vehicle by energy, economic, reliability indicators, as well as by the indicator of material costs.

Key words: modeling, heavy vehicles, driver, efficiency, mountain conditions, vehicle performance, maintenance and repair, reliability, vehicle safety.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Арабаджи Мария Ильинична – специалист 3 категории АО «Инжиниринговая компания «АСЭ»;
semikovamar@gmail.com

Балашова Татьяна Ивановна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
tibalashova@mail.ru

Баринов Роман Олегович – студент Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева;
barinovR@list.ru

Гай Василий Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
iamuser@inbox.ru

Голованов Владимир Иванович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
golovanov.vladimir.ivanovich@gmail.com

Грошев Андрей Владленович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, инженер-математик ПАО АНПП «Темп-авиа»;
groshv_andrew@mail.ru

Епифанова Анастасия Сергеевна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
epifanova.anastasia.s@gmail.com

Каленюк Илья Владимирович – старший преподаватель МИРЭА – Российского технологического университета;
qverti@list.ru

Капранов Сергей Николаевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
serg.kapranov@gmail.com

Куркин Андрей Александрович – проректор по научной работе, главный научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р физ.-мат. наук;
aakurkin@gmail.com

Куркина Оксана Евгеньевна – ведущий научный сотрудник, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
oksana.kurkina@mail.ru

Кокоулина Мария Владимировна – инженер Научно-исследовательской лаборатории МПиТК Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
kokoulinamaria97@gmail.com

Колпаков Андрей Борисович – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. физ.-мат. наук;
andrey04.60@mail.ru

Кузнецов Георгий Дмитриевич – студент Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева;
gd.smith@ya.ru

Назаров Вениамин Евгеньевич – ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН, д-р физ.-мат. наук;
v.e.nazarov@appl.sci-nnov.ru

Обыденнова Светлана Юрьевна – проректор по экономике Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
obydennova@nttu.ru

Пелиновский Ефим Наумович – главный научный сотрудник Института прикладной физики РАН, ведущий научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, профессор;
pelinovsky@appl.sci-nnov.ru

Пильщиков Георгий Дмитриевич – магистр Российского университета дружбы народов;
pe4enka8146@yandex.ru

Рувинская Екатерина Александровна – научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории МПнТК, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
e.rouvinskaya@gmail.com

Санников Алексей Николаевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
lexsannikov@yandex.ru

Степаненко Мария Анатольевна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
stepanenkoma@mail.ru

Сясиков Дмитрий Валерьевич – магистр Российского университета дружбы народов;
dmitry.syasikov@yandex.ru

Шарутин Константин Николаевич – студент Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева;
ksharutin@gmail.com

Шмелева Анна Геннадьевна – доцент МИРЭА – Российского технологического университета, канд. физ.-мат наук;
ann_shmeleva@mail.ru

Шилков Сергей Сергеевич – аспирант МИРЭА – Российского технологического университета;
Sergey_s96@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Бишлетов Александр Владимирович – ведущий специалист ООО «Электро Лэнд»;
Bisav@ya.ru

Кожевников Сергей Васильевич – инженер-конструктор 3 категории Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»;
Sergei.v.kozhevnikov@rambler.ru

Пименов Станислав Александрович – старший научный сотрудник, доцент Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», канд. техн. наук;
Spimenov_m_fem@mail.ru

Попов Сергей Васильевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, канд. техн. наук;
Popovsev3@ya.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Береснев Павел Олегович – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
pavel.beresnev@nntu.ru

Вашурин Андрей Сергеевич – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
Vashurin@nntu.ru

Клубничкин Владислав Евгеньевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук; **vklubnichkin@mgul.ac.ru**

Клубничкин Евгений Евгеньевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
klubnichkin@mgul.ac.ru

Карташов Александр Борисович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
kartashov@bmstu.ru

Маллабоев Умарджон Маллабоевич – профессор Тюменского индустриального университета, Тобольского индустриального института, д-р физ.-мат. наук;
umallaboev@rambler.ru

Мамбеталин Кахим Токушевич – профессор Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск), д-р техн. наук;
kahim2010@mail.ru

Манянин Сергей Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
ttsnn@yandex.ru

Медведев Юрий Владимирович – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова;
megapalestiner@gmail.com

Михайлов Владимир Георгиевич – ведущий инженер ОАО «Мидивисана» (г. Минск, Беларусь), канд. техн. наук;
sapr7@mail.ru

Молев Юрий Игоревич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
moleff@yandex.ru

Огороднов Сергей Михайлович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
boris.reutov@gmail.com

Сайдуллозда Сайвали Сайдулло – аспирант Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (г. Челябинск);
saivali.saidullo@mail.ru

Степанов Евгений Владимирович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
evgeniystepanov1991@yandex.ru

Тумасов Антон Владимирович – директор Института транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
anton.tumasov@nntu.ru

Тюгин Дмитрий Юрьевич – ведущий научный сотрудник Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
dmitry.tyugin@nntu.ru

Улитин Александр Владимирович – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
lexaulitin@yandex.ru

Умирзоков Ахмад Маллабоевич – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими (г. Душанбе), канд. техн. наук;
ahmad.umirzokov@mail.ru

Филатов Валерий Игоревич – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
valera.filatov@nntu.ru

Черевастов Максим Геннадьевич – аспирант Нижегородского государственного педагогического университета им. К. Минина;
chermaxim_1978@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ РЕФЕРАТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания представленной к публикации статьи, отражающее предмет, цели и задачи работы, актуальность, постановку проблемы, вариант ее решения, сферу применения. Объем: не менее 10 строк (100-250 слов ~ 850 знаков). Реферат статьи может также включать краткое описание концептуальных основ и методологии работы, перспектив дальнейших исследований.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны воспроизводиться повторно в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся «калькой» русскоязычных слов. Рекомендуется использование слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Образец: авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The title of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3

Телефон: 8(920)00-37-877

E-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются **два печатных экземпляра** статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию (не менее 150 слов), ключевые слова (не менее 10).
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематическая направленность** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. Рекомендуется **ограничить самоцитирование** тремя пунктами.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, e-mail.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (**только в черно-белом изображении**) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

Образец оформления статьи:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 3 (130)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**
Технические редакторы: **М.В. Прохорова, А.В. Крылова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 15.09.2020. Дата выхода в свет 29.09.2020. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 9,00. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013