

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

№ 1 (132)

Нижний Новгород 2021

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. №1(132).
– 112 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

<i>Пелиновский Дмитрий Ефимович</i>	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
<i>Палкович Ласло</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Варлаки Петер</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Виджай Кумар Чакка</i>	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
<i>Ялчинер Ахмет</i>	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, 2021

**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

№ 1 (132)

Nizhny Novgorod 2021

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
Аристов А.О. Анастомоз в квазиклеточных сетях и проблема адекватности преобразования моделей	7
Елисеев М.Е., Галкина Е.Д., Мазунова Л.Н. Критерий для выявления мест концентрации аварий при разработке интеллектуальной информационной транспортной системы ..	14
Тимофеева О.П., Гордеев М.М., Кобляков Д.А. Обработка и генерация изображений ЭКГ	24
Мухин А.В. Применение нечетких моделей TAKAGI-SUGENO для стабилизации ротора в электромагнитном подвесе	30
Халайджи А.К., Мучник И.Б. Методы классификации нарушений сердечного ритма на основе кодирования последовательностей RR-интервалов сигнала ЭКГ	38
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	54
Чесноков А.А., Коновалов И.А., Баринов А.А., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Бородин С.С., Макаров М.А. К вопросу о влиянии переноса трассера за счет молекулярной диффузии при исследовании турбулентных внутриреакторных потоков с применением кондуктометрической измерительной системы	54
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	62
Беляков В.В., Тумасов А.В., Бутин Д.А., Вашурин А.С. Адекватность управляемости имитационной модели легкого коммерческого автомобиля	62
Ненашев П.Н., Абдулов С.В., Тараторкин А.И. Экспериментальное исследование динамической нагруженности привода водометных движителей быстроходной гусеничной амфибийной машины	70
Сергиевский С.А., Герасин А.В. Анализ влияния конструкции рамы легкого коммерческого автомобиля на ее динамическую жесткость	78
Сулегин Д.А., Зузов В.Н. Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе	86
Умирзоков А.М., Мамбеталин К.Т., Сайдуллозода С.С., Бердиев А.Л. Оценка эффективности эксплуатации автомобильной дороги в горных карьерах	98
НАШИ АВТОРЫ	106

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
Aristov A.O. Anastomosis of quasi-cellular nets and adequacy problems of model conversion	7
Eliseev M.E., Galkina E.D., Mazunova L.N. Criterion for identifying crash hotspots of road accidents in the development of an intelligent information transport system	14
Timofeeva O.P., Gordeev M.M., Koblyakov D.A. ECG image processing and generating	24
Mukhin A.V. Application of TAKAGI-SUGENO fuzzy models for rotor stabilization in an electromagnetic suspension	30
Khalaydzhi A.K., Muchnik I.B. Methods of classification of arrhythmias based on encoding sequences of RR-intervals of ECG signal	38
 ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	 54
Chesnokov A.A., Konovalov I.A. Barinov A.A., Khrobostov A.E., Legchanov M.A., Borodin S.S., Makarov M.A. On the estimation of the influence of transfer of tracer due to molecular diffusion in investigations of turbulent intra-reactor flows with the application of a conductometric measuring system	54
 MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 62
Belyakov V.V., Tumasov A.V., Butin D.A., Vashurin A.S. Adequacy simulation model of a light commercial car	62
Nenashev P.N., Abdulov S.V., Taratorkin A.I. Experimental study of the dynamic loading of a water jet propulsion drive of a high-speed tracked amphibious vehicle	70
Sergievskiy S.A., Gerasin A.V. Evaluation of influence of light commercial vehicle frame to its dynamic stiffness	78
Sulegin D.A., Zuzov V.N. An investigation of the effect of a car door reinforcements on passive safety in a side impact	86
Umirzokov A.M., Mambetalin K.T., Saydulozoda S.S., Berdiev A.L. Efficiency assessment of road operation in the mountain quarries	98
 AUTHORS	 106

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 519.179.2:004.94

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_7

А.О. Аристов

АНАСТОМОЗ В КВАЗИКЛЕТОЧНЫХ СЕТЯХ И ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Москва, Россия

Рассмотрены вопросы преобразования теоретико-графовых моделей потоковых систем в различных предметных интерпретациях в модели на основе квазиклеточных сетей. Указанное преобразование предполагает переход от макромоделей на микроуровень. В ходе преобразования обозначено явление, нарушающее адекватность преобразования – анастомоз. Он предполагает соседство областей пространства, относящихся к структурам макромоделей, не имеющим фактического соседства. Для решения указанной проблемы применяется выявление дополнительных координат областей пространства на основе реберной раскраски исходных теоретико-графовых моделей. Приведены примеры практического применения решения проблемы анастомоза на основе моделей транспортных систем.

Ключевые слова: сеть, поток, моделирование, микромодель, макромодель, квазиклеточная сеть, анастомоз, раскраска графа.

В работах [1-3] рассматривается особый тип дискретных структур – квазиклеточные сети. Они предназначены для моделирования распространения потоков в различных предметных интерпретациях, где поток рассматривается как направленное распространение некоторых объектов (потокообразующих) в пространстве. Квазиклеточная сеть – динамическая дискретная структура, состоящая из областей пространства (клеток), в каждой из которых находится единица потока, переходящая в соседние клетки с течением времени. Такие сети рассматриваются как один из подходов к переходу между макро- и микроуровнем моделирования [2]. На макроуровне, как правило, анализируют потоковые системы, пространство распространения потока в которых представляется в виде графа [4-6]. Таким образом, одним из наиболее интуитивно понятных способов синтеза квазиклеточной сети является метод базового графа [1], где на основе принципов визуализации графа берутся пространственные координаты вершин, а клетки строятся вдоль ребер графа. Каждая клетка синтезирована на элементе графа – ребре или вершине (рис. 1). Соответственно, ребро и вершину по отношению к клетке назовем базовым элементом графа.

Если клетки синтезированы на одном базовом ребре или на вершине, инцидентной базовому ребру между вершинами, рассматривается выполнение условия соседства. Вместе с тем, в ряде случаев соседними оказываются клетки, синтезированные на ребрах инцидентных одной вершине (вблизи этой вершины) и синтезированные на ребрах, пересекающихся не в вершинах. Подобные случаи обладают некоторой аналогией с биологическим термином «анастомоз», обозначающим соединение (соустье), особенно между сосудами, полыми органами и полостями, которые обычно отделены друг от друга или разветвляются [3, 7]. Таким образом, анастомоз в квазиклеточных сетях рассматривается как бионический термин. Само это явление представляет проблему с точки зрения синтеза моделей, нарушающую в частности ее адекватность при переходе от макро- к микроуровню [3]. В настоящей работе рассматривается проблема анастомоза в квазиклеточных сетях и ее решение.

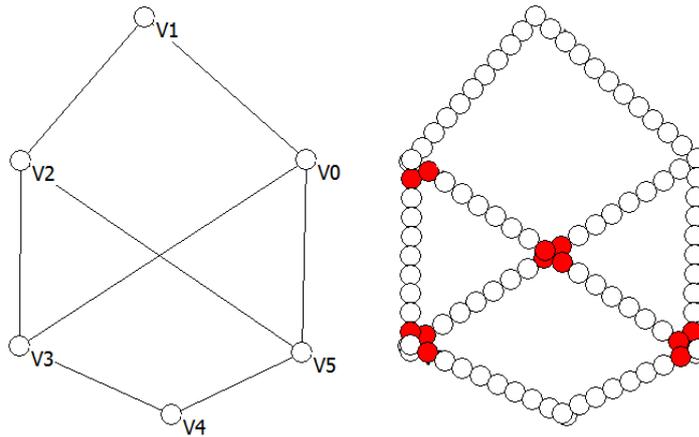


Рис. 1. Метод базового графа. Анастомоз в квазиклеточных сетях

Рассматривая типичные ситуации, приведенные на рис. 1, нетрудно видеть, что анастомоз возникает вблизи вершин базового графа, а также в местах пересечения ребер. Учитывая, что реберный анастомоз приводит к нарушению циркуляции в соответствии со структурой базового графа, следует ввести соответствующие ограничения, предполагающие, что передача состояния происходит только между клетками, которым соответствует одно и то же базовое ребро базового графа. Также следует отметить, что переход состояния к клеткам, построенным на основе другого ребра базового графа, осуществляется при передаче состояния из клеток, для которых базовым элементом является вершина графа, т.е., фактически базовой для такой клетки считаем вершину базового графа, в которой сходятся ребра (1):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \equiv \begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{ic}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{id}) \\ \dots \end{cases} \\ Q_u \in V_{ia} \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, для ограничения циркуляции в квазиклеточных сетях с анастомозом следует ввести дополнительные условия передачи состояния между соседними клетками $Q_u \rightarrow Q_v$ (2):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \\ Q_v = (x_v, y_v, S_v) \\ \left[\begin{cases} Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_v \in (V_{ic}, V_{id}) \end{cases} \right. \\ \left. \begin{cases} Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_v \in V_{ia} \end{cases} \right] \end{cases} \quad (2)$$

Следует отметить, что машинная реализация проверки условий (2) требует организации полного перебора множеств и установления базовых элементов для всех клеток. Также серьезной проблемой является значительный объем памяти, требуемой для кодирования базовых элементов, которые будут содержаться в качестве компонентов клетки (3):

$$Q_i = (B_i, C_i, S_i), \quad (3)$$

где B_i – набор неизменных параметров клетки (координат), C_i – переменные параметры клетки, изменяемые в ходе прохождения потока, S_i – набор параметров потокообразующего микрообъекта, находящегося в клетке.

Информационный объем (в битах) компоненты, отвечающий за базовый элемент вычисляется как (4):

$$I_B = \lceil \log_2 N \rceil \quad (4)$$

где N – количество элементов в базовом графе $G = \langle V, U \rangle$, $\lceil \dots \rceil$ – округление в сторону большего целого. Тогда (5):

$$N = |V| + |U| \quad (5)$$

Для циркуляции, согласно условиям (2), фактически не имеет значения, какой элемент является базовым для конкретной клетки, но необходимы сведения о том, нарушает ли переход состояния между клетками структуру базового графа. По условиям (2) допустимы переходы между клетками, синтезированными на основе различных базовых элементов, а также между клеткой, синтезированной на основе вершины базового графа и клеткой, синтезированной на прилегающем ребре. Приведенные условия представим в виде графа G' , каждой вершине которого взаимно однозначно соответствует ребро базового графа, а ребро моделирует запрет на переход состояния между клетками, синтезированными на базе ребер исходного базового графа. Тогда проверку условия перехода состояния между клетками сведем к раскраске рассматриваемого графа (рис. 2).

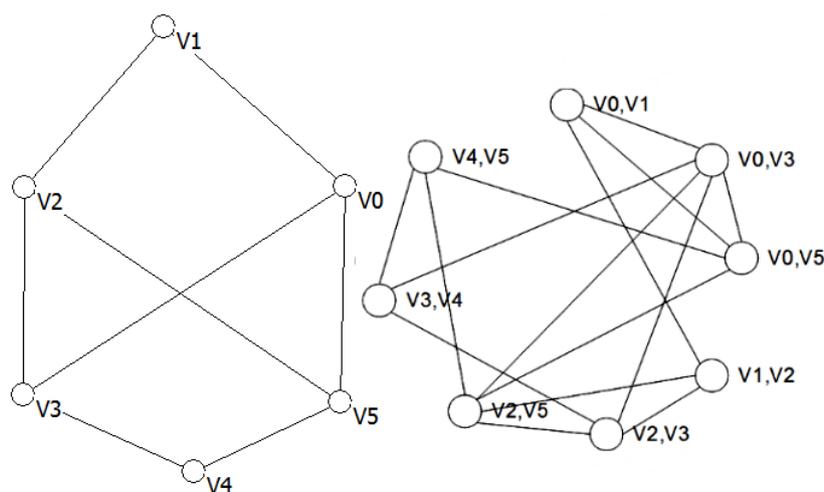


Рис. 2. Базовый граф и граф G'

Необходимо отметить, что ребра, между которыми наблюдается пересечение не в вершинах, также отображаются в рассматриваемом графе (рис. 2). Таким образом, ограничение циркуляции сводится к раскраске ребер базового графа. Дополнительным условием считается то, что ребра, пересекающиеся не в вершинах, не должны быть соцветными. Пусть вершины $V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}, V_{id}$, образующие ребра (V_{ia}, V_{ib}) и (V_{ic}, V_{id}) , имеют соответственно координаты $(x_{ia}, y_{ia}), (x_{ib}, y_{ib}), (x_{ic}, y_{ic}), (x_{id}, y_{id})$. Тогда прямые, на которых отложены указанные ребра, задаются уравнениями [1] (6):

$$\begin{cases} y = \frac{y_{ib} - y_{ia}}{x_{ib} - x_{ia}} \cdot x + \frac{x_{ib}y_{ia} - x_{ia}y_{ib}}{x_{ib} - x_{ia}} \\ y = \frac{y_{id} - y_{ic}}{x_{id} - x_{ic}} \cdot x + \frac{x_{id}y_{ic} - x_{ic}y_{id}}{x_{id} - x_{ic}} \end{cases} \quad (6)$$

Предполагается, что в графе G' вводится ребро между вершинами, соответствующими (V_{ia}, V_{ib}) и (V_{ic}, V_{id}) , в том случае, если система (6) имеет решение в точке (x, y) , попадающей в полигон, ограниченный $(x_{ia}, y_{ia}), (x_{ib}, y_{ib}), (x_{ic}, y_{ic}), (x_{id}, y_{id})$, т.е., решение удовлетворяет (7):

$$\begin{cases} \min(x_{ia}, x_{ib}) \leq x \leq \max(x_{ia}, x_{ib}) \\ \min(y_{ia}, y_{ib}) \leq y \leq \max(y_{ia}, y_{ib}) \\ \min(x_{ic}, x_{id}) \leq x \leq \max(x_{ic}, x_{id}) \\ \min(y_{ic}, y_{id}) \leq y \leq \max(y_{ic}, y_{id}) \end{cases} \quad (7)$$

Кроме того, следует обратить внимание, что каждая клетка приобретает определенный цвет в соответствии с цветом базового элемента. При этом вершины базового графа позволяют синтезировать клетки, переход из которых возможен в нескольких направлениях без каких-либо ограничений. Тогда считаем, что все такие вершины могут быть окрашены в один отдельный цвет. Таким образом, раскраска ребер базового графа позволяет решить проблему анастомоза, возникающего вблизи вершин базового графа при синтезе структуры квазиклеточной сети. При этом каждая клетка приобретает цвет (рис. 3), т.е., в состав вектора B_i входит составляющая, определяющая цвет клетки (8):

$$B_i = (x_i, y_i, col_i), \quad (8)$$

где $col_i \in (col^{(0)}, col^{(1)}, col^{(2)}, \dots, col^{(h)})$, h – хроматический класс базового графа [5], $col^{(0)}$ – цвет клеток, сформированных на основе вершин базового графа.

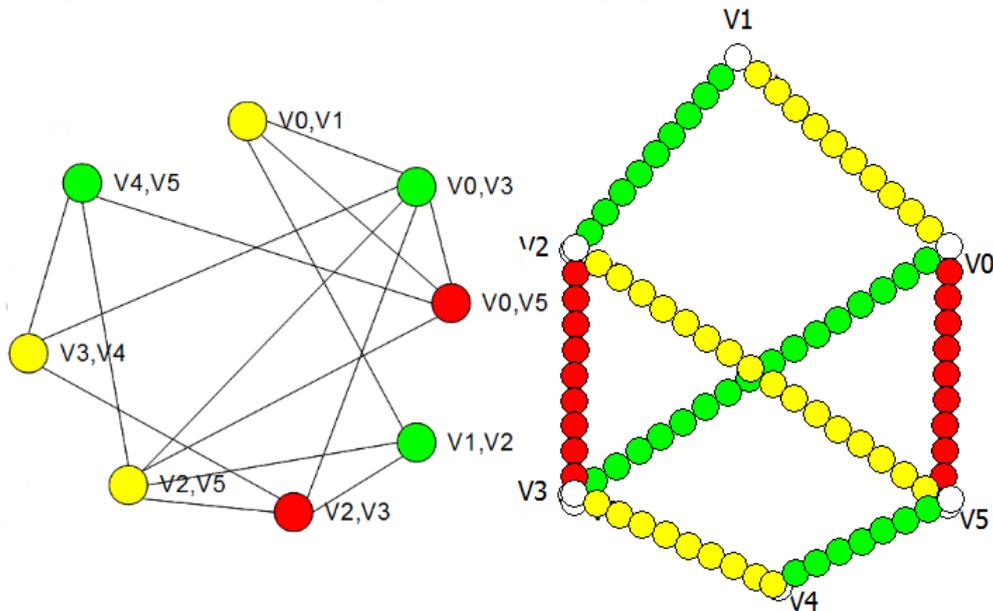


Рис. 3. Назначение красок элементам квазиклеточной сети

Тогда условие (2) примет вид (9):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, col^{(u)}, S_u) \\ Q_v = (x_v, y_v, col^{(v)}, S_v) \\ \begin{cases} col^{(u)} = col^{(v)} \\ col^{(u)} = col^{(0)} \\ col^{(v)} = col^{(0)} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Отдельно следует остановиться на проблеме анастомоза в квазиклеточных сетях при их синтезе методом генерирующей фишки. Выше было отмечено, что анастомоз при генерации достаточно распространен. Чаще всего, при синтезе методом генерирующей фишки требуется сформировать определенное количество клеток. При синтезе квазиклеточной сети без анастомоза достаточно часто возникает тупик генерирующей фишки. Таким образом, следует решить проблему тупика. Фактически тупик предполагает невозможность генерации клеток, для которых выполняется условие на i -й итерации синтеза (10):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_{i-1})^2 + (y_{ci} - y_{i-1})^2} \leq 4R^2. \quad (10)$$

В такой ситуации предполагается, что продолжение синтеза клеток будет осуществляться от другой базовой клетки, т.е., фактически генерирующая фишка вернется в координаты ранее сформированных клеток. Пусть генерирующая фишка сформировала клетку $Q_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, S_{i-1})$. Генерирующая фишка перемещается в координаты (x_{ci}, y_{ci}) , для которых (11):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_{i-1})^2 + (y_{ci} - y_{i-1})^2} = 4R^2. \quad (11)$$

При наличии клеток $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$ при $k \neq i-1$ возникает анастомоз (12):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2} < 4R^2. \quad (12)$$

При невозможности генерации других клеток, не соответствующих условию (12), возникает тупик. Следует обратить внимание, что координаты генератора удовлетворяют соотношениям (13):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_{i-1} + R \cdot \cos \alpha, \\ y_{ci} = y_{i-1} + R \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (13)$$

где α – угол, определяющий направление сдвига генерирующей фишки на каждой итерации синтеза. Тогда тупик генерирующей фишки можно описать как (14):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_{i-1} + R \cdot \cos \alpha \\ y_{ci} = y_{i-1} + R \cdot \sin \alpha \\ \forall \alpha : \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2} < 4R^2 \\ k \neq i-1 \end{cases} \quad (14)$$

Тогда при возникновении тупика (14) следует продолжить синтез квазиклеточной сети от клетки, для которой $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$ для которой выполняется условие (15):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_k \\ y_{ci} = y_k \end{cases} \quad (15)$$

Следует обратить внимание, что при предотвращении анастомоза, в соответствии с условиями (12) и (14), в квазиклеточной сети остается тупик. В зависимости от предметных интерпретаций, устанавливаем критерии выбора конкретной клетки $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$, от которой будет продолжена генерация квазиклеточной сети. В частности, существуют задачи, допускающие анастомоз, однако при необходимости выбора клеток для последующего синтеза методом генерирующей фишки, целесообразно минимизировать или максимизировать пересечение клетки, базовой для которой является тупик, при анастомозе. При минимизации пересечения предполагается, что из всех клеток, отвечающих условию (14), генерация согласно (15) будет продолжена из клетки, для которой (16):

$$\max_{Q_k} \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2}. \quad (16)$$

Максимальное пересечение предполагает сокращение расстояния между клетками (17):

$$\min_{Q_k} \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2}. \quad (17)$$

Поскольку предполагается анастомоз, то до выполнения (15) происходит формирование клетки $Q_k = (x_{ci}, y_{ci}, S_{ci})$.

Таким образом, при синтезе и циркуляции квазиклеточных сетей важную роль играет проблема анастомоза, предполагающая пересечения клеток, нарушающие преобразование дискретных структур в квазиклеточные сети. Также следует отметить, что решение ряда проблем, тесно связанных с анастомозом, существенно влияет на структуру синтезируемой квазиклеточной сети и циркуляцию в ней.

Областью применения рассмотренного подхода к решению проблемы анастомоза в квазиклеточных сетях является моделирование и представление моделей потоковых систем в ряде ситуаций, где при синтезе методом базового графа наблюдается нарушение адекватности модели. В частности, такая ситуация наблюдается при моделировании многоярусных транспортных систем (рис. 4а) двумерными координатными квазиклеточными сетями. При этом не рассматривается третья координата, определяющая высоту, а в качестве дополнительного параметра в состав B_i выбирается «цвет» участка. Кроме того, в транспортных интерпретациях проблема анастомоза актуальна для участков с многополосным движением (рис. 4б) – переход возможен в клетки в поперечном направлении (номер полосы рассматривается как дополнительная координата).

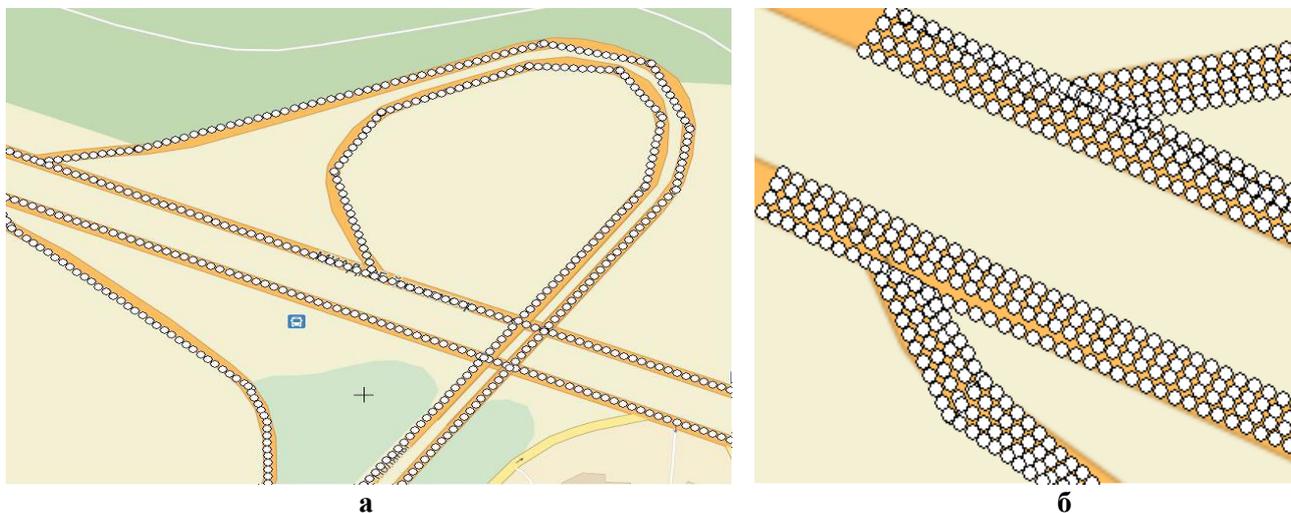


Рис. 4. Модели транспортных на основе квазиклеточных сетей с анастомозом:
а – многоярусная транспортная система; б – многополосное движение

Библиографический список

1. **Аристов, А.О.** Теория квазиклеточных сетей / А.О. Аристов. – М: МИСиС, 2014. – 188 с.
2. **Аристов, А.О.** Квазиклеточные сети. Микро- и макро моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2014. – №12. – С. 228-233.
3. **Аристов, А.О.** Анастомоз в квазиклеточных сетях // Международный журнал. Устойчивое развитие: наука и практика: электронный журнал. – 2014. – №2(13). – С. 164-168.
4. **Форд, Л.Р.** Потоки в сетях / Л.Р. Форд, Д.Р. Фалкерсон. – М.: Мир, 1966. – 277 с.
5. Горбатов, В.А. Фундаментальные основы дискретной математики / В.А. Горбатов. – М.: Физматлит, 1999. – 544 с.
6. **Петров, А.Е.** Тензорный метод двойственных сетей / А.Е. Петров. – М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. – 496 с.
7. Энциклопедический словарь медицинских терминов / под ред. Б.В. Петровского. – М.: Сов. энциклопедия, 1982. – 464 с.

*Дата поступления
в редакцию: 02.12.2020*

A.O. Aristov

**ANASTOMOSIS OF QUASI-CELLULAR NETS
AND ADEQUACY PROBLEMS OF MODEL CONVERSION**

National university of science and technology «MISiS»

Purpose: Conversion problems of theoretical graph models of flow systems (in different subject areas) to quasi-cellular net based models are described.

Design/methodology/approach: This conversion suggests transition from micro to macro level of modeling. Through the conversion it identified phenomenon of anastomosis. Anastomosis suggests neighborhood of areas in quasi-cellular nets based on different structures (without neighborhood) in macro models. It used graph edge coloring for calculation an additional coordinates for cells of quasi-cellular net model.

Findings: Additional coordinates calculation based on graph edge coloring decides an adequacy problems of model conversion associated with anastomosis

limitations/implications: This approach used for 2-dimensional quasi-cellular nets for simulation multi-layers or multi-line flow space. It considered some examples of described approach using for transport systems.

Originality/value: The simulation method based on new type of discrete structures called quasi-cellular nets. This model provides micro- and macromodeling under the same discrete structure. Coloring of basic graph edges and calculation additional cell coordinates provides to make correct conversion of graph model to quasi-cellular net micro model in different subject areas.

Key words: net, flow, simulation, micro model, macro model, quasi-cellular net, anastomosis, graph coloring.

УДК 004.031

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_14

М.Е. Елисеев, Е.Д. Галкина, Л.Н. Мазунова

КРИТЕРИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТ КОНЦЕНТРАЦИИ АВАРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

При разработке интеллектуальной информационной системы повышения безопасности дорожного движения важно определение минимального (критического) значения, начиная с которого, выделяются места концентрации аварий. Рассматривается критерий для его выявления по всем категориям аварий, позволяющий определить места их концентрации для участка улично-дорожной сети или всей транспортной сети города. Приведены примеры применения данного метода для анализа аварийности пешеходов. Критерий апробирован в 2019 г. для анализа аварийности при разработке комплексных схем организации дорожного движения трех городов на территории РФ. Его применение не ограничивается аварийностью пешеходов, распространяясь на все категории аварий. Предложенный критерий используется в интеллектуальной информационной системе повышения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: интерактивная информационная система, интеллектуальная транспортная система, статистический анализ, место концентрации ДТП, очаг ДТП, ДТП, ГИС, географическая информационная система.

Введение

В настоящей статье представлен этап разработки интеллектуальной информационной системы повышения безопасности дорожного движения (ИИТС), одной из основных составляющих которой является подсистема информирования водителя [1,2]. Системы анализа аварийности и информирования участников дорожного процесса разрабатываются рядом авторов [3-5]. На начальном этапе анализа аварийности выявляются очаги аварийности или места концентрации ДТП (*hot-point road accidents*). Для каждой категории аварий, например, «аварии с участием пешеходов», «аварии с сопутствующим фактором «гололедица» или «снежный накат», существуют свои места концентрации. Главный вопрос, стоящий перед исследователем: «Начиная с какого количества аварий данного типа, следует выделять очаг аварийности?»

Целью работы является определение минимального порогового значения числа аварий, начиная с которого, выявляется очаг ДТП. Представленная методика применима для любой категории аварий. Она проверяется на примере аварий с участием пешеходов, поскольку информация о таких ДТП, как правило, достаточно полно отражена в имеющихся базах данных. С другой стороны, анализ именно этой категории аварийности особенно важен, поскольку аварии с участием пешеходов часто имеют серьезные последствия.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались базы данных ГИБДД [6] и ГИС-карты *OSM (Open Street Map)*. Необходимо отметить, что база аварийности РФ содержит информацию не обо всех авариях, а лишь о ДТП с пострадавшими. В данную базу попадают практически все ДТП с участием пешеходов, и ее можно считать полной. Последний факт проверен по базе 2009-2010 гг. для Нижнего Новгорода, содержащей информацию обо всех авариях. При исследовании аварий с участием пешеходов используются следующие подходы и методы. Известно, что чем больше скорость транспортного средства, тем, как правило, тяжелее

последствия аварии. Тем не менее, данный вопрос продолжает изучаться [7,8]. В ряде работ рассматриваются вопросы обучения пешеходов [9]. В качестве причины аварийности, которой не было ранее (в первой половине XX в.), выделяется отвлечение внимания как водителя, так и пешехода сотовым телефоном [10,11]. Безусловно, на аварийность с участием пешеходов влияет наличие регулируемого или нерегулируемого пешеходного перехода. Наибольший интерес представляют работы [12,13], в которых рассматриваются вопросы прогнозирования и предотвращения аварий данного типа. Можно выделить метод конфликтов (конфликтных точек), при котором выделяются места (точки) конфликтов транспортных и пешеходных потоков, и, в зависимости от их количества, а также от величин транспортных и пешеходных потоков дается прогноз аварийности на данном участке дорожной инфраструктуры. Данный метод известен с прошлого века, но ввиду личностных особенностей водителей и пешеходов в различных странах, а также особенностей дорог, он требует дальнейшей проработки [14]. В последнее время исследователи все чаще используют моделирование различных аварийных ситуаций с участием пешеходов [15,16]. Важным является подход, при котором выделяются категории пешеходов, особенно значима категория «Дети» [17-19]. Вопросы выявления мест концентрации ДТП рассматриваются в очень интересном исследовании [20], сравнивающем методы оценки плотности ядра и кригинга. Описание и применение данных методов можно найти в статьях [21-25]. В работе [20] для сравнения эффективности данных методов используется индекс точности прогнозирования [23]. Данное исследование имеет ту же цель, что и [20] – определение очагов аварийности, но в качестве метода выявления очага предлагается теоретико-вероятностный подход, который будет разобран далее.

Одним из основных методов анализа аварийности с участием пешеходов в России является топографический анализ. В настоящий момент действует методика, в соответствии с которой «местом концентрации ДТП в населенном пункте является пересечение, примыкание или участок улицы, протяженность которого не превышает 400 м, на котором в течение года произошло 3 и более ДТП (суммарно с пострадавшими и с материальным ущербом)». Такой подход не совсем правилен как с математической, так и с эмпирической точек зрения [20-25]. В качестве исходных данных используется база аварийности пешеходов в г. Нижнем Новгороде за три года: 2015, 2016, 2017. Аварии с участием пешеходов составляют часть от общего числа ДТП, таким образом, очаг должен выделяться при трех и более авариях. Стандартной практикой в научных экспериментах является их повторяемость. Следовательно, при наличии места концентрации ДТП за некоторый год, в случае сохранения исходной ситуации, на данном участке улично-дорожной сети (УДС) в последующие или предыдущие периоды (годы) также должны были происходить ДТП того же типа, но, возможно, в меньшем количестве.

Данные топографического анализа за 2015, 2016, 2017 гг. в Нижнем Новгороде по авариям с участием пешеходов приведены в табл. 1-3.

Таблица 1.

Места концентрации ДТП по авариям с участием пешеходов в Нижнем Новгороде в 2015 г.

улица	дом	число аварий
ул. Бетанкура	1	5
ул. Ковалихинская	49	3
ул. Большая Печерская	93	3
ул. Родионова	187	3
ул. Коминтерна	172	3
ул. Медицинская	26	3
ш. Московское	9	3
ул. Львовская	10	3
ул. Плотникова	5	3

Продолжение табл. 1.

ул. Дьяконова	25	3
ш. Сормовское	21	3
пр-т Ленина	27	3

Таблица 2.

Места концентрации ДТП по авариям с участием пешеходов в Нижнем Новгороде в 2016 г.

улица	дом	число аварий
Ул. имени Маршала Рокоссовского К.К.	10	3
Пл. Комсомольская	1	3
Ул. Ковалихинская	30	3
Ул. Краснодонцев	4	3
Ш. Южное	41	3
Ш. Сормовское	21	3
Ул. Ванеева	211	3

Таблица 3.

Места концентрации ДТП по авариям с участием пешеходов в Нижнем Новгороде в 2017 г.

улица	дом	число аварий
Пр-т Ленина	30	4
Ул. Полтавская	30	4
Пл. Свободы	1	4
Ул. Родионова	165	3
Пр-т Кирова	6	3
Пр-т Ленина	57	3
Ул. Родионова	17	3
Пр-т Ленина	27	3
Пр-т Ленина	45	3
Ул. Коминтерна	115	3
Пр-т Ленина	38	3
Ул. Коминтерна	172	3
Ул. Красных Зорь	17	3
Ул. Родионова	187	3
Ш. Комсомольское	2А	3
Ул. Героя Рябцева	1	3
Ул. Мончегорская	1	3
Ул. Чаадаева	19	3
Ул. Советская	12	3
Ул. Бетанкура	1	3
Ул. Ванеева	1	3

Сравнительный анализ показывает, что одинаковых очагов за 2015 и 2016 гг. – 1, за 2015 и 2017 гг. – 4, за 2016 и 2017 гг. – 0. Более того, только в 65 % очагов произошло хотя бы одно ДТП за два других года. Таким образом, повторяемость очевидно нарушена и корректно были выделены только некоторые очаги. Из-за чего же могли появиться остальные?

Теоретические расчеты

Решим задачу о выделении очагов статистически. Пусть в городе имеется дорожная сеть (может рассматриваться и отдельно взятая улица), состоящая из k идентичных (схожих) участков, и за рассматриваемый временной период произошло n ДТП. Тогда задача, очевидно, может быть сведена к «урновой схеме» – простейшей теоретико-вероятностной модели, при которой n шаров распределяются по k урнам. Вероятность попадания шара на i -ый участок УДС: $p = \frac{1}{k}$, и для каждого участка имеет место схема испытаний Бернулли. Пусть m – количество ДТП на i -ом участке УДС. Чтобы этот участок «стал» очагом аварийности, в соответствии с указанной выше методикой, необходимо, чтобы m было больше или равно 3.

Формула Бернулли $P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}$ для данной задачи примет вид (1):

$$P_n(m) = C_n^m \left(\frac{1}{k}\right)^m \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-m} \quad (1)$$

где n – общее количество ДТП, m – число ДТП на рассматриваемом участке, $P_n(m)$ – вероятность образования очага аварийности на нем. Тогда математическое ожидание количества образовавшихся очагов можно вычислить по формуле $M(x = m) = k \cdot P_n(m)$, которая примет вид (2):

$$M(x = m) = k C_n^m \left(\frac{1}{k}\right)^m \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-m} \quad (2)$$

Для иллюстрации применения формул рассмотрим несколько простых примеров.

Пример 1. Пусть исследуется аварийность на улице, состоящей из 20 идентичных участков и на ней в течении года (конечно можно рассмотреть любой временной период) произошло 20 ДТП данного типа. Сколько, вероятнее всего, образуется очагов из 3 ДТП?

По формуле (2): $M(x = 3) = 20 C_{20}^3 \left(\frac{1}{20}\right)^3 \left(1 - \frac{1}{20}\right)^{20-3} = 20 \cdot 1140 \cdot (0,05)^3 \cdot (0,95)^{17} \approx 1,19$.

Таким образом, наиболее вероятно, образуется 1 очаг из 3 ДТП.

Могут ли, и насколько вероятно, образовываться очаги с большим количеством аварий? Для ответа на данный вопрос и для проверки формулы, на языке программирования JavaScript, была разработана компьютерная модель, реализующая урновую схему. В результате модельного эксперимента из 100 000 прогонов модели были получены следующие данные:

- количество очагов по 3 ДТП = 114682;
- количество очагов по 4 ДТП = 25638;
- количество очагов по 5 ДТП = 4214;
- количество очагов по 6 ДТП = 602;
- количество очагов по 7 ДТП = 60;
- количество очагов по 8 ДТП = 3.

По данным модельного эксперимента, в среднем образуется примерно по 1,15 очага по 3 ДТП, 0,26 очага по 4 ДТП, 0,04 очага по 5 ДТП, среднее количество очагов с большим числом ДТП мало, но даже для 8 ДТП в очаге не равно 0! Таким образом, если в городе, хотя бы 4 такие улицы, как в разобранный примере, то наиболее вероятно, что случайным образом образуются 4 очага по 3 ДТП в каждом и 1 очаг с 4 ДТП.

Пример 2. Пусть рассматривается небольшой город, вся улично-дородная сеть которого содержит 100 участков и в течение трех лет произошло 10 ДТП с участием пешеходов. По формуле (2) получаем, что математическое ожидание количества очагов по 3 ДТП – примерно 0,001, по 2 ДТП 0,04. Таким образом, вероятность случайного образования очагов по 3 ДТП пренебрежимо мала и даже 2 ДТП на одном участке, скорее всего, говорят о наличии аварийноопасного фактора в данном месте дорожной инфраструктуры. Данные модельного эксперимента (для 100 000 прогонов) следующие результаты:

- количество очагов по 3 ДТП = 1074;

- количество очагов по 4 ДТП = 18;
- количество очагов по 5 ДТП = 0;
- количество очагов по 6 ДТП = 0;
- количество очагов по 7 ДТП = 0;
- количество очагов по 8 ДТП = 0.

Приведем пример с реальными данными.

Пример 3. На пр. Ленина г. Нижнего Новгорода за три года (2015-2017) произошло 107 ДТП с участием пешеходов, т.е., примерно 36 аварий в год. Для улиц Нижнего Новгорода это наибольшее количество. Оно связано, прежде всего, с тем, что пр. Ленина имеет большую протяженность и большие величины транспортных и пешеходных потоков. Общая длина – примерно 8,4 км. Если разбить пр. Ленина на участки по 400 м, то получаем 21 участок. Вычисляя математическое ожидание количества очагов с 3 и более ДТП, аналогично рассмотренному примеру, получаем $M(x = 3) \approx 5,55$, то есть вероятнее всего 5 или 6 очагов по 3 ДТП образуется случайным образом. Для очагов с 4 ДТП: $M(x = 4) \approx 2,29$. Следовательно, в данном случае нельзя выделять очаги даже при наличии 4 ДТП.

Данные модельного эксперимента (100 000 прогонов) следующие:

- количество очагов по 3 ДТП = 312091;
- количество очагов по 4 ДТП = 127701;
- количество очагов по 5 ДТП = 40576;
- количество очагов по 6 ДТП = 10775;
- количество очагов по 7 ДТП = 2300;
- количество очагов по 8 ДТП = 442.

Таким образом, выделение очагов по 3 ДТП (одного типа) может оказаться не совсем корректным и носить случайный характер. С другой стороны, если количество аварий мало, по сравнению с количеством участков УДС, то авторы полагают допустимым выделение очага по 2 ДТП рассматриваемого типа.

Предлагается следующий критерий для определения минимального количества ДТП (одного типа), по которым выделяется очаг:

1) если длина участка изначально не зафиксирована, то коэффициент k в формуле (2) определяется так (3):

$$k = \text{round}\left(\frac{l}{L}\right), \quad (3)$$

где l – протяженность участка дороги (дорожной сети), L – общая протяженность дороги (дорожной сети).

2) задается величина β , которую далее будем называть уровнем надежности, предлагается по умолчанию (стандартно) брать $\beta = 0,05$, как обычно принято в математической статистике;

3) последовательно вычисляются математические ожидания числа образовавшихся очагов (для данных $m = 2, 3, 4 \dots$);

4) если $M(x = m) < \beta$, то наименьшее такое m полагаем критическим значением, по которому возможно выделение очага.

Получаем следующий вид критерия (4):

$$M(x = m) = k C_n^m \left(\frac{1}{k}\right)^m \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-m} < \beta \quad (4)$$

Критерий (4) применялся в 2019 году для определения очагов аварийности с участием пешеходов для ряда городов на территории РФ: Бородино, Полярные Зори, Зеленогорск.

Приведем пример одного из расчетов – анализ аварийности пешеходов для г. Зеленогорска (Красноярский край). На рис. 1 представлены аварии с участием пешеходов за 2017-2019 гг., каждый круг соответствует одному ДТП. Количество ДТП данного типа относительно невелико, ввиду чего методы оценки плотности ядра и кригинга в данном случае неэффективны. Напротив, нахождение порогового значения количества ДТП в очаге имеет

большое значение. Ключевым для анализа является вопрос, можно ли полагать все внутригородские дороги идентичными? На рис. 2 представлена схема дорог г. Зеленогорска, с цветовым выделением полосности дороги. Зеленым цветом выделены 4-полосные дороги, синим – 2-полосные (рис. 2).



Рис. 1. Аварии с участием пешеходов в г. Зеленогорске

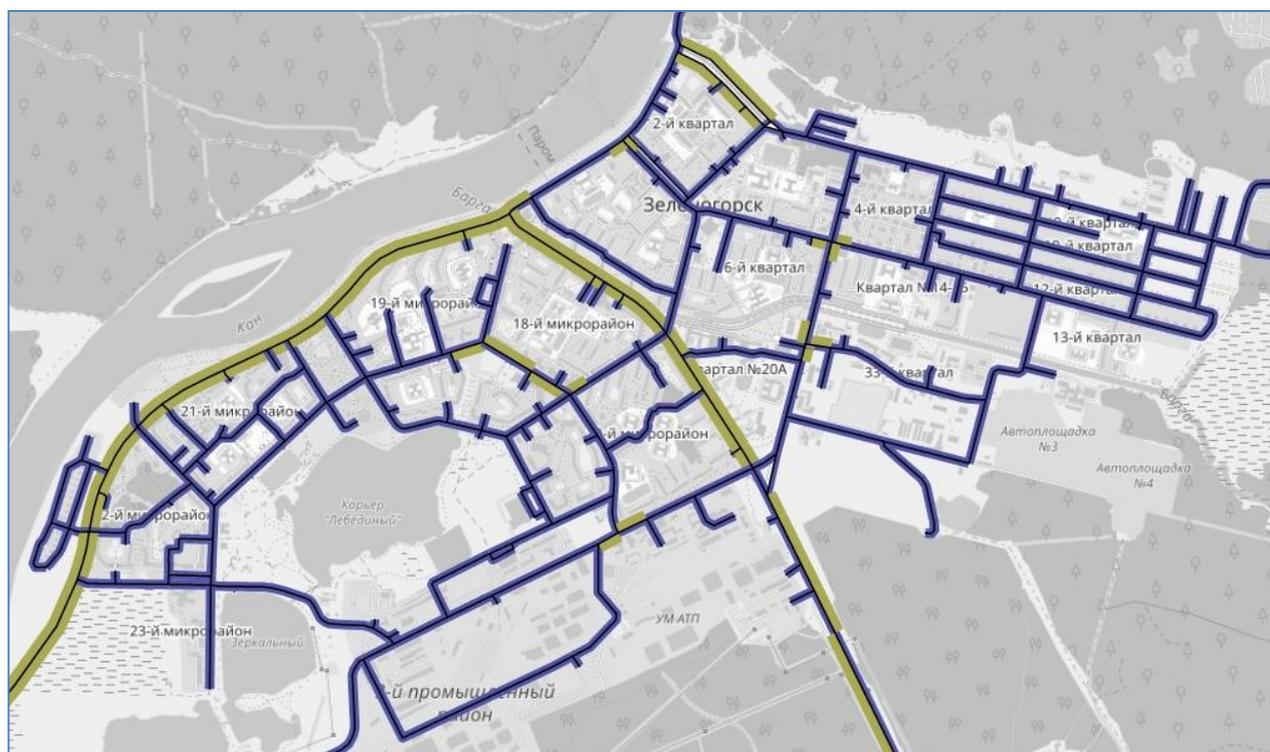


Рис. 2. Полосность дорог г. Зеленогорска

На первый взгляд, представляется необходимым отдельно рассматривать два вида дорог (4-полосные дороги и 2-полосные). В действительности, интенсивности движения, в дан-

ном случае, мало зависят от числа полос (рис. 3), поэтому было принято решение все внутригородские дороги рассматривать как схожие.

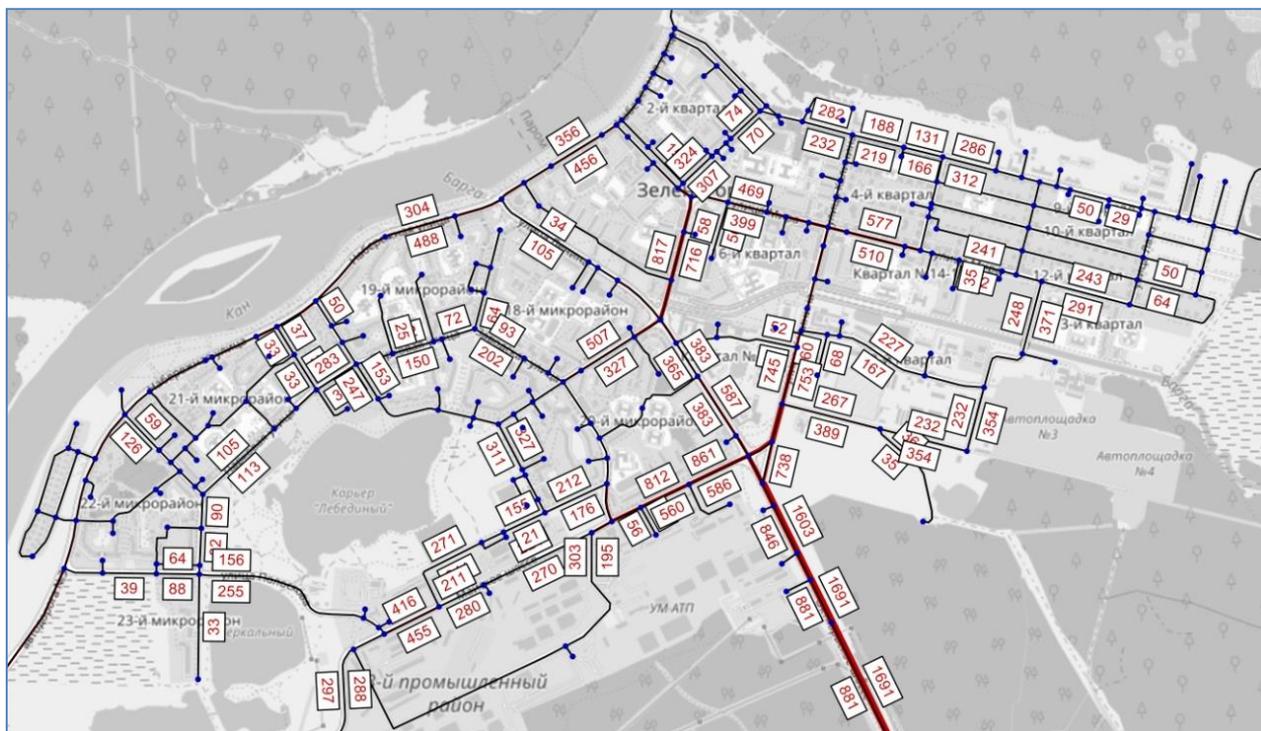


Рис. 3. Интенсивности транспортных потоков г. Зеленогорска (вечерний час пик, машин/час)

Суммарная протяженность сети внутригородских дорог 95,9 км. Расстояния между соседними перекрестками составляют, как правило, не более 200 м, поэтому было принято решение длину участка выбрать равной 200 м. Таким образом, по формуле (3), получаем 480 участков дорог (деля 95,9 км на 0,2 км и округляя до целого), на которых произошло 28 ДТП рассматриваемого типа.

В соответствии с критерием (4): $M(x=2) = 480 \cdot C_{28}^2 \cdot \left(\frac{1}{480}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{480}\right)^{26} \approx 0,0435 < 0,05$, получаем, что места концентрации аварий можно выделять, начиная с 2 ДТП в очаге.

В результате был составлен следующий список очагов ДТП:

- ул. Бортникова, д. 11 (3 ДТП за 3 года);
- ул. Набережная, д. 38, ул. Набережная д. 40 (3 ДТП за 3 года);
- ул. Ленина, д. 5 (2 ДТП за 3 года);
- ул. Парковая, д. 2 (2 ДТП за 3 года).

Детальный анализ аварий подтвердил правильность выделения очагов, поскольку аварии в них имели схожий механизм. Исследование аварийности проводилось в рамках разработки комплексной схемы организации дорожного движения (КСОДД), поэтому авторы имели возможность включить в программу адресные мероприятия, направленные на повышение безопасности дорожного движения на данных участках дорожной инфраструктуры.

Результаты

Предлагается критерий (4), позволяющий определить пороговое значение для выделения очага аварийности для данной категории аварий. Для проверки вычислительных формул разработана компьютерная модель. Результаты модельного эксперимента показывают хорошую точность вычисленного значения. Приведены примеры расчетов по данному критерию

для аварий с участием пешеходов для г. Нижний Новгород и г. Зеленогорск. Полученные данные применены для разработки мероприятий, направленных на повышение безопасности дорожного движения в этих городах.

Обсуждение

Расчеты показывают, что используемый в настоящий момент в РФ критерий дает большую погрешность. В результате некорректного выявления очагов аварийности меры, направленные на их устранение, могут оказаться напрасно растроченными ресурсами. Использование предложенного в работе подхода позволит избежать выявления случайных очагов и сконцентрировать усилия на устранении реально существующих мест концентрации ДТП. Заметим, что для различных типов аварий, даже в одном населенном пункте, пороговые значения m могут отличаться, если различно количество аварий данных типов. Значение m не является статичным, т.е., если характер аварийности в рассматриваемой области будет меняться, то и пороговое значение может стать другим.

Данная работа является необходимым этапом создания интеллектуальной информационной транспортной системы (ИИТС), разрабатываемой авторами. Она выступает не обособленным исследованием, но работой, направленной на создание аналогичных систем помощи водителю и другим участникам дорожного движения, например, пешеходам. При применении формул большое значение имеет правильное определение размера очага. Уровень надежности β определяется, исходя из задачи исследования: чем меньше его значение, тем больше очагов будет удовлетворять критерию. По умолчанию предлагается брать $\beta = 0,05$. Представленный критерий требует дополнительной практической проверки. Он особенно значим, если количество ДТП рассматриваемой категории относительно невелико, как в примере для г. Зеленогорск. Безусловно, получаемый с помощью критерия список очагов не является окончательным, и каждое выделенное место концентрации ДТП требует детального анализа.

Выводы

Представленный критерий для определения порогового значения выделения очага аварийности (для данной категории аварий, для участка УДС или всей транспортной сети населенного пункта) позволяет корректно определить места концентрации аварий каждого из типов. Полученные формулы теоретически позволяют определить пороговое (критическое) значение для любой категории аварий. Данный критерий апробирован для анализа аварийности пешеходов, важной категории ДТП в городских условиях. Он применяется на начальных этапах анализа базы данных ДТП в ИИТС, а именно – на этапе выделения очагов аварийности по всем рассматриваемым категориям аварий.

Библиографический список

1. **Eliseev, M.E.** Virtual reality and navigation subsystems of the interactive sistem for road safety improving / M.E. Eliseev, T.N. Tomchinskaya, E.D. Galkina, Yu. N.Dudakov, R.A. Musarsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – С. 012027.
2. **Eliseev, M.** Using 3D-modeling Technologies to Increase Road Safety. Transportation Research Procedia, Volume 20, Pages 1-756 (2017) / M. Eliseev, T. Tomchinskaya, A. Lipenkov, A. Blinov //12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia.
3. **Daito, Kodama** Real Time Accident Risk Information Provision on a Urban Expressway Network: Prediction Model Analysis and Development of a Provision System / Kodama Daito, Ozawa // Proceedings of the 51st Spring Conference of the Committee of Infrastructure Planning and Management, 2015.

4. **DeLucia, B.H.** E-Crash: The Model Electronic Crash Data Collection System / B.H. DeLucia, R.A.Scopatz // Report DOT HS 811 326, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Washington, DC, 2010.
5. **Khan, G.** Application and Integration of Lattice Data Analysis, Network K-Functions, and Geographic Information System Software to Study Ice-Related Crashes / G. Khan, K. R.Santiago-Chaparro, X. Qin, D.A. Noyce // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2136, 2009. – P. 67-76.
6. Официальный сайт ГИБДД РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://гибдд.рф> (дата обращения 04.02.2021 г.).
7. **Brenac, T.** Influence of Travelling Speed on the Risk of Injury Accident: a Matched Case-Control Study / T. Brenac, C. Perrin, B. Canu, J. Magnin, A. Canu // Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2015, 43(3):129-137.
8. **Cuerden, R.** Pedestrians and Their Survivability at Different Impact Speeds / R. Cuerden, D. Richards, J. Hill // Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (Paper No. 07-0440). Lyon, France, June 18-21, 2007.
9. **Dommes, A.** Age-related differences in street-crossing safety before and after training of older pedestrians / A. Dommes, V. Cavallo, F. Vienne, I. Aillerie // Accident Analysis & Prevention, 2012, 44(1): 42-47.
10. **Nasar, J.L.** Pedestrian injuries due to mobile phone use in public places / J.L. Nasar, D. Troyer // Accident Analysis Prevention, 2013, 57: 91-95.
11. **Starvinos, D.** Effect of cell phone distraction on pediatric pedestrian injury risk / D. Starvinos, K.W. Byington, D.C. Schwebel // Pediatrics, 2009. 123: 179-185.
12. **Haleem, K.** Analyzing Pedestrian Crash Injury Severity at Signalized and Non-Signalized Locations / K. Haleem, P. Alluri, A. Gan // Accident Analysis & Prevention 81, 2015: 14–23.
13. **Zhang, Y.** Safety effects of exclusive and concurrent signal phasing for pedestrian crossing / Y. Zhang, S.A. Mamun, J.N. Ivan, N. Ravishanker, K. Haque // Accident Analysis and Prevention, 2015, 83: 26–36.
14. **Islam, M.S.** Explaining Pedestrian Safety Experience at Urban and Suburban Street Crossings Considering Observed Conflicts and Pedestrian Counts / M.S. Islam, V. Serhiyenko, J.N. Ivan, N. Ravishanker, P.E. Garder // Journal of Transportation Safety & Security, 2014, 6(4): 335-355.
15. **Kadali, B.R.** Modelling pedestrian road crossing behaviour under mixed traffic condition / B.R. Kadali, P. Vedagiri // European Transport, 2013, 55(3): 1-17.
16. **Zheng, J.** Prediction of Road Traffic Accidents Using a Combined Model Based on IOWGA Operator / J. Zheng, X. Wu // Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2015, 43(3): 146-153.
17. **Gitelman, V.** Changes in road-user behaviors following the installation of raised pedestrian crosswalks combined with preceding speed humps, on urban arterials. Transportation / V. Gitelman, R. Carmel, F. Peshahov S. Chen // Research Part F, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2016.07.007>.
18. **Leden, L.** Safe pedestrian crossings for children and elderly / L. Leden, P. Garder, & C. Johansson // Accident Analysis and Prevention, 2006. 38: 289-294.
19. **Morrongiello, B.A.** Child pedestrian safety: Parental supervision, modeling behaviors, and beliefs about child pedestrian competence / B.A. Morrongiello, B.K. Barton // Accident Analysis and Prevention, 2009. 41:1040-1046.
20. **Thakali, L.** Identification of crash hotspots using kernel density estimation and kriging methods: a comparison / L. Thakali, T.J. Kwon, L. Fu // J. Mod. Transport. 23, 93/106 (2015).
21. **Anderson, T.K.** Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots / T.K. Anderson // Accident Analysis and Prevention, 2009, 41(3):359-364.
22. **Blazquez, C.A.** A spatial and temporal analysis of child pedestrian crashes in Santiago / C.A. Blazquez // Chile. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50: 304-311.
23. **Chainey, S.** The utility of hotspot mapping for predicting spatial patterns of crime / S. Chainey, L. Tompson // Secur J, 2008, 21(1):4-28.
24. **Erdogan, S.** Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: city of Afyonkarahisar / S. Erdogan, I. Yilmaz, T. Baybura, M. Gullu // Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(1):174-181.
25. **Oliver, M.A.** Kriging: a method of interpolation for geographical information systems / M.A. Oliver, R. Webster // Int J Geogr Inf Syst, 1990, 3:313-332.

*Дата поступления
в редакцию: 14.01.2021*

M.E. Eliseev, E.D. Galkina, L.N. Mazunova

**CRITERION FOR IDENTIFYING CRASH HOTSPOTS OF ROAD ACCIDENTS
IN THE DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT INFORMATION
TRANSPORT SYSTEM**

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

Purpose: construction of the criterion that allows you to identify the crash hotspots of road accidents for various categories of accidents

Design/methodology/approach: the article uses methods of the theory of probability, in particular, a geometric probabilistic model, as well as mathematical statistics and topographic analysis. Computer modeling was used to assess the correctness of the criterion.

Findings: the criterion has been obtained that allows calculating the minimum number of road accidents necessary for the presence of the crash hotspot of road accidents on the selected section of the road network. The criterion allows you to determine the location of the crash hotspots for the transport network section or the entire transport network of the city.

Research limitations/implications: the criterion was tested in 2019 for the analysis of accidents in the development of integrated traffic management schemes for three cities in the Russian Federation. Of course, its application is not limited to pedestrian accidents, it can be used for any category of accidents. The criterion for identifying crash hotspots is a necessary element when creating an intelligent information system for driver assistance, developed by the authors.

Originality/value: the structural results are new.

Key words: interactive information system, intelligent transport system, statistical analysis, collision-prone locations, crash hotspots, road accident, traffic collision, GIS, geographic information system

УДК 004.932.721

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_24

О.П. Тимофеева, М.М. Гордеев, Д.А. Кобляков

ОБРАБОТКА И ГЕНЕРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭКГ

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассматривается алгоритм, построенный на основе генеративных состязательных сетей и позволяющий генерировать новые синтетические сигналы ЭКГ, чтобы иметь возможность увеличить имеющееся в открытом доступе количество данных для проведения дальнейших исследований. В качестве тренировочного датасета применяется *MIT-BIH* датасет, содержащий несколько получасовых выдержек амбулаторных записей ЭКГ. Исходные сигналы обрабатываются при помощи алгоритмов сегментации на основе заданного шаблона ЭКГ. Приводится описание архитектур моделей генератора и дискриминатора, методов улучшения и стабилизации качества обучения, подробно разобран и изображен на графиках процесс обучения нейронной сети, выполнен сравнительный анализ полученных результатов с другими существующими работами на основе метрик *Frechet Distance* и *Dynamic time warping*, а также представлена визуализация примера созданной ЭКГ.

Ключевые слова: сигналы ЭКГ, генерация ЭКГ, генеративно-состязательные сети, обработка данных, *MIT-BIH* датасет, метрики обучения, метод *historical averaging*, батч-нормализация, модель генератора, модель дискриминатора.

Введение

В настоящее время огромное значение обретает возможность детектировать сердечно-сосудистые заболевания на ранних стадиях, для чего широко используются методы машинного обучения, деревья решений, нейронные сети, способные классифицировать признаки аритмии на записи электрической активности сердца – кардиограмме (ЭКГ). Однако хороших результатов классификации трудно добиться при ограниченном числе тренировочных данных. Современным подходом, помогающим увеличить их количество, является создание алгоритма на базе генеративно-состязательной сети (GAN), которая представляет собой генеративную модель, применяющуюся во многих областях: от создания новых лиц до генерации мелодий.

В рамках работы проведен анализ и выполнена обработка данных ЭКГ, построена архитектура нейронной сети для генерации новых данных, а также проведено сравнение полученных результатов с другими работами в этой области.

Обработка данных

Изображения электрокардиограмм из датасета *MIT-BIH* представляют собой изображения десятисекундных сигналов с частотой 500 Гц для всех двенадцати отведений. Используя алгоритмы сегментации, для каждой ЭКГ определяется начало (P), конец (T) зубцов и все зубцы (QRS) согласно шаблону, представленному на рис. 1. Далее берется шаг на одинаковом расстоянии слева и справа от пика R. Так, извлекая зубцы, мы получаем множество сердечных циклов, каждый из которых имеет длину 400 точек на отведение. Из датасета *MIT-BIH* при помощи обработчика, написанного на основе библиотеки *matplotlib*, были исключены некорректные данные (где невозможно определить пик R). Остальные сигналы были обработаны по принципу, описанному выше.

Архитектура нейронной сети

Генеративно-состязательная сеть состоит из двух конкурирующих друг с другом моделей: дискриминатора и генератора. Задача дискриминатора – классифицировать входные данные, определить категорию, к которой они относятся. Генератор же выполняет функции, обратные функциям дискриминатора – пытается подобрать образцы к этим категориям.

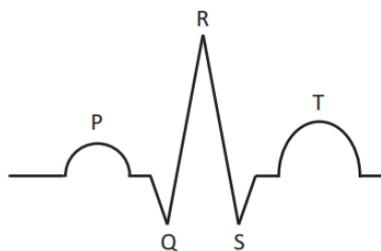


Рис. 1. Шаблон ЭКГ сигнала

В результате ряда экспериментов был создан генератор, принимающий на вход сигнал из случайного шума, представляющего вещественный вектор размерности 100 (рис. 2) и состоящий из двух двунаправленных слоев LSTM, включающих в себя по 100 скрытых блоков.

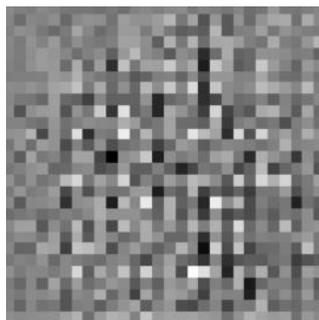


Рис. 2. Случайный шум

Был создан дискриминатор, состоящий из нескольких следующих друг за другом и чередующихся слоев свертки (*Conv1-Conv4*) и пулинга (*MaxPool1-MaxPool4*) (рис. 3). В качестве функции активации была выбрана функция ReLU, способствующая лучшей сходимости. Результат работы дискриминатора – сигмоида для проведения классификации.

Процесс обучения

В процессе обучения задачей дискриминатора является распознавание фальшивых образцов данных, умение отличать их от реальных сигналов ЭКГ; задачей генератора является создание новых данных настолько правдоподобными, чтобы дискриминатор воспринимал их как реально существующие в исходном датасете. Поскольку генератор пытается сгенерировать такой сигнал, который дискриминатор не сможет отличить от настоящего, варианты этого «правдоподобного» сигнала постоянно меняются в процессе противодействия сетей друг другу. Однако данная оптимизация может продолжаться бесконечно и не приведет к успешному результату. Для внесения стабильности в процесс обучения в работе использовался метод *feature matching*, позволяющий оценивать разницу между вектором признаков $f(x)$, который извлекается в каждом слое дискриминатора $D(x)$ (рис. 4), и вектором сгенерированных генератором данных. Эта разница добавляется в функцию минимизации генератора и препятствует переобучению.

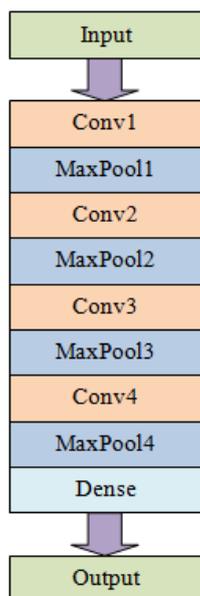


Рис. 3. Архитектура дискриминатора

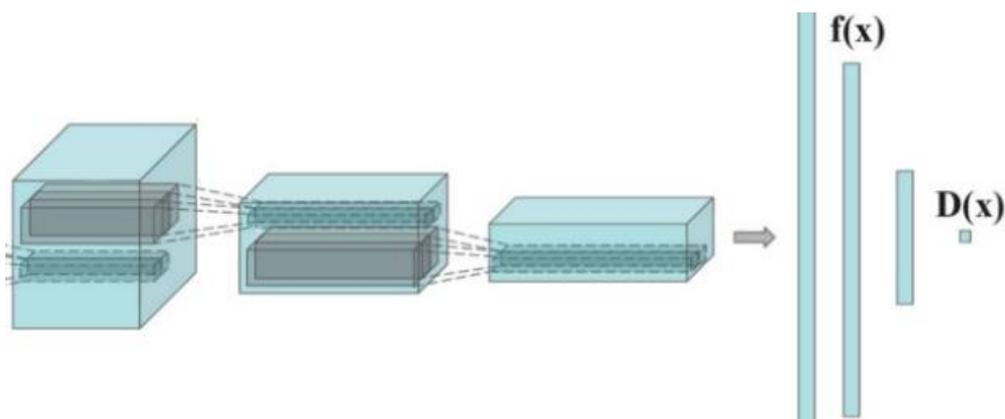


Рис. 4. Принцип работы метода feature matching

Для регулировки параметров модели использовался метод *historical averaging*, который позволяет отслеживать параметры последних t моделей и в случае необходимости вносить коррективы. *Historical averaging* для нашей генеративной сети помогает остановить нахождение модели вокруг точки равновесия и стать демпфирующей силой для сходимости модели [1]. Чтобы контролировать генерируемые данные, была добавлена метка y в качестве дополнительного параметра к генератору (создаваемые данные z) и к дискриминатору (реальные данные x). Таким образом, с помощью метки y мы сможем более эффективно различать и генерировать каждый сигнал (рис. 5). Для нормализации данных в рассмотренных ранее задачах в процессе обучения глубоких нейронных сетей использовалась техника *batchnorm* [2] после каждого сверточного слоя и приносила успех, однако в нашем случае эта техника привела к искажению генерируемых данных, поэтому в конечном итоге было решено не применять ее. Наглядно качество процесса обучения удобно отслеживать при помощи графика метрик ошибок (*losses*) дискриминатора (D) и генератора (G).

Ошибка дискриминатора – это функция, сравнивающая предсказания на реальных данных с массивом единиц, а предсказания на поддельных данных – с массивом нулей.

Ошибка генератора определяет, насколько хорошо он смог превзойти дискриминатор; т.е., если генератор работает хорошо, дискриминатор классифицирует поддельные изображения как реальные (массив единиц).

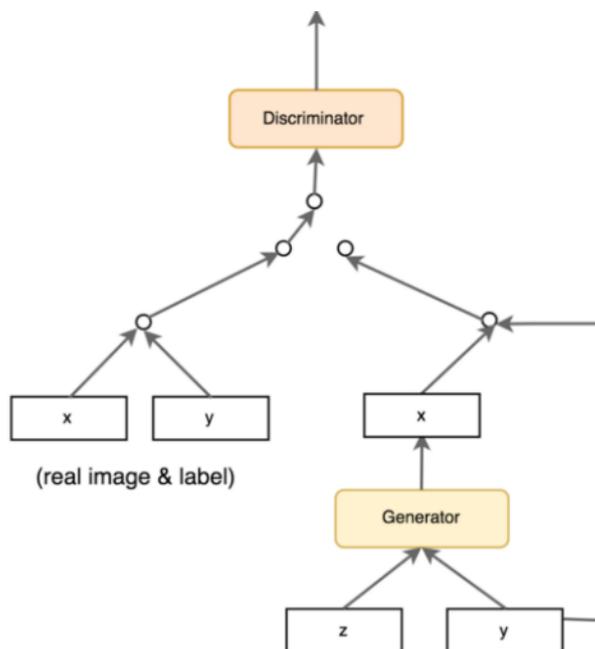


Рис. 5. Метки сети

На рис. 6 изображены графики изменения ошибки (loss) дискриминатора (черным цветом) и генератора (серым цветом) в процессе обучения. Видно, что в результате 2000 итераций обучение происходило успешно, поскольку обе сети (генератора и дискриминатора) вели конкурирующую борьбу, находясь в обратной зависимости и имея противоположные цели (например, там, где loss генератора равна 1,5, -loss дискриминатора равна 0,5).

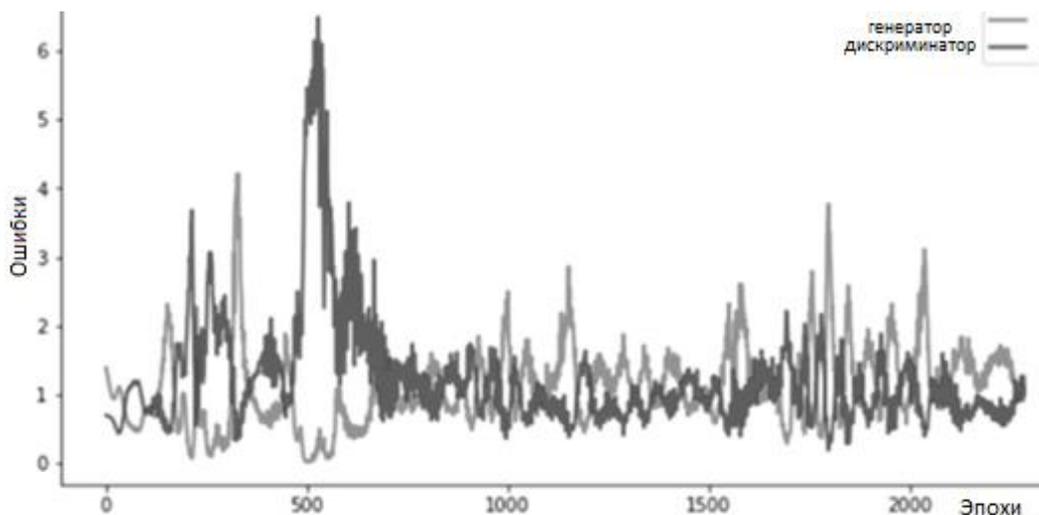


Рис. 6. График обучения

Оценка результатов

Графики ошибок продемонстрировали нам успешный процесс обучения. Оценим качество сгенерированных данных. Для этого используем основную классическую для генеративно-состязательных сетей метрику DTW (*Dynamic time warping*) – способ оценивания схожести двух временных рядов x и y длиной N и M соответственно (1):

$$DTW = f(x_i, y_j) + \min(DTW_{i,j-1}, DTW_{i-1,j}, DTW_{i-1,j-1}), \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$.

В результате было получено значение метрики, которое фактически совпадает с результатом модели из работы [3]. Такое сравнение является корректным, поскольку и в работе [3], и в нашей работе использовался один и тот же набор данных. Помимо этого, из библиотеки глубокого обучения *Tensorflow* была импортирована метрика *FrechetDistance* (FD), также измеряющая расстояние между сгенерированным и истинным распределениями. Слой полученных образцов в пространстве признаков рассматривается, как непрерывный, многомерный, гауссовский, затем среднее значение и ковариация оцениваются для сгенерированных и истинных данных. Расстояние между ними в нашем случае составило 0,963. В табл. 1 представлено сравнение FD-метрики со значениями из работы [4]. Видно, что наша модель показала хорошее значение, уступив только модели *BiLSTM-CNN-GAN*.

Таблица 1.

Результаты сравнения

Метод	FD метрика
BiLSTM-CNN GAN	0,756
RNN-AE GAN	0,969
LSTM-AE GAN	0,996
OUR MODEL	0,963
RNN-VAE GAN	0,982
LSTM-VAE GAN	0,975

Таким образом, сравнение метрик полученных результатов исследования с другими работами из этой области, позволяет говорить о достаточно хорошем уровне сгенерированных в ходе работы данных. Оценим результаты исследования, созданные изображения ЭКГ, визуально [5]. На рис. 7 приведен пример полученной ЭКГ, которая внешне очень похожа на ЭКГ из используемого в работе тренировочного набора, что также свидетельствует о качественной работе модели.

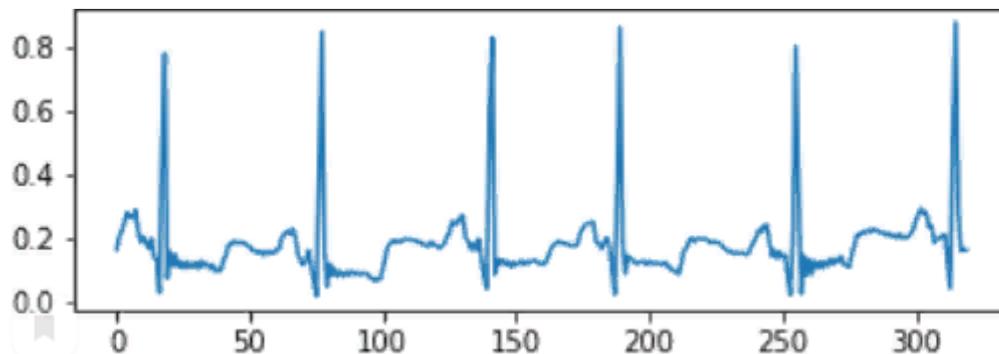


Рис. 7. Изображение сгенерированной ЭКГ

Результаты

Предложена собственная архитектура нейронной сети для генерации ЭКГ, соответствующей одному сердечному циклу. Анализ результатов и их сравнение с другими работами показали, что полученные метрики характеризуют корректно проведенные этапы обработки данных и обучения, а сгенерированные сигналы ЭКГ выглядят внешне вполне естественными. Проведены эксперименты с использованием библиотек компьютерного зрения, показавшие работоспособность таких методов, как *feature matching* и *historical averaging*. Установлено, что некоторые методы стабилизации работы сети (например, *batchnorm*) в данном случае приводят к замедлению качества обучения и ухудшают результат генерации.

Заключение

Создано программное обеспечение, позволяющее из шума сгенерировать новые сигналы ЭКГ, которые планируется использовать для повышения качества автоматической диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Синтетические данные также могут быть применены в клинической практике последующих исследований. Планируется расширение реализованного алгоритма с целью генерации всей ЭКГ, а не только одного сердечного цикла.

Библиографический список

1. **Ian, J.** Goodfellow. Generative Adversarial Nets / J. Ian // Department of informatics. – 2014. – P.1-8.
2. **Ioffe, S.** BatchNormalization: Accelerating Deep Network / S.Ioffe, C.Szegedy // Trainin by Reducing Internal Covariate Shift. – 2015. – P.1-11.
3. **Delaney, A.M.** Synthesis of realistic ECG using Generative Adversarial Networks / A.M. Delaney, 2019. – P.1-12.
4. **Zhu, Fel** Electrocardiogram generation with a bidirectional LSTM-CNN Generative adversarial network / Fel Zhu, Ye Fei // Translational Biomedical Informatics. – 2019. – P.1-9.
5. **Salimans, Tim** Improved Techniquesfor Training GANs / Tim Salimans, W.Zaremba, 2016. – P. 2-10.

*Дата поступления
в редакцию: 02.01.2021*

O.P. Timofeeva, M.M. Gordeev, D.A. Koblyakov

ECG IMAGE PROCESSING AND GENERATING

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

Purpose: The task of detecting cardiovascular diseases is one of the urgent tasks at the present time. The existing approaches have a number of disadvantages, since there is a small amount of data in the free access. The algorithm considered in this article, based on generative adversarial networks, allows generating new synthetic electrocardiogram (ECG) signals in order to be able to increase the amount of data for further research.

Design/methodology/approach: Generative adversarial networks are used for generating new synthetic electrocardiogram (ECG) signals. As a training dataset, the MIT-BIH dataset is used.

Findings: The obtained metrics characterize the correct training process, and the generated signals look similar to the data from the original set.

Research limitations/implications: New synthetic electrocardiogram (ECG) signals are necessary in order to be able to increase the available amount of data for further classification task.

Originality/value: This research can be used in applications requiring increasing small amount of data like as electrocardiogram (ECG) signals.

Key words: ECG signals, generation of ECG, GAN, data processing, MIT-BIH dataset, training metrics, historical averaging method, batchnorm's technique, generator's model, discriminator's model.

А.В. Мухин

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ TAKAGI-SUGENO
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ**

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты решения задачи построения регуляторов по состоянию для системы электромагнитного подвеса на основе применения нечетких моделей *Takagi-Sugeno*. Рассмотрены две задачи: построение стабилизирующих регуляторов и построение оптимальных регуляторов по квадратичному критерию качества. Для вычисления параметров регуляторов использовался аппарат линейных матричных неравенств применительно к нечетким моделям *Takagi-Sugeno*. Для вычисления регуляторов была выведена нечеткая математическая модель объекта, эквивалентная исходной нелинейной модели. Вычисленные регуляторы подставлялись в исходный нелинейный объект. Полученные результаты показали, что с помощью нечетких моделей *Takagi-Sugeno* можно построить как стабилизирующий регулятор, так и оптимальный регулятор по квадратичному критерию качества. Найденные регуляторы обеспечивают стабилизацию ротора в достаточно широком диапазоне начальных отклонений. Сравнительный анализ графиков переходных процессов показал, что регулятор с квадратичным критерием качества обеспечивает более высокое качество стабилизации.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, ротор, нечеткие модели Takagi-Sugeno, нелинейный объект, стабилизация, оптимальное управление, линейные матричные неравенства, переходные процессы.

Введение

Принцип действия электромагнитного подвеса основан на явлении магнитной левитации, благодаря которой осуществляется бесконтактное вывешивание ротора в системе магнитных подшипников. Практическое применение последних охватывает целый спектр самых разных сфер промышленности и техники, а также некоторых областей медицины [1-4]. Вследствие привлекательности электромагнитных подшипников для решения целого ряда задач, управление ротором в электромагнитном подвесе представляет важную и актуальную задачу. Реализация управления осуществляется, как правило, путем изменения величины магнитного поля, создаваемого электромагнитом при подаче на его обмотки переменного напряжения. Решению задачи управления, а также связанных с ней вопросов, посвящено немало работ [5-9]. В большинстве из них рассматриваются линеаризованные системы. Математические методы работы с ними достаточно хорошо изучены, имеют солидную теоретическую и практическую базу. Однако, очевидным недостатком линеаризованных моделей является ограниченная применимость, поскольку они работают только в окрестности положения равновесия при небольших начальных отклонениях. Следовательно, они не могут в полной мере пускаться динамику исследуемого объекта.

В настоящей статье представлены результаты синтеза законов управления для нелинейной системы электромагнитного подвеса на основе непрерывных нечетких моделей *Takagi-Sugeno* [10]. Рассматривались задачи синтеза по состоянию, т.е., предполагалось, что значения всех фазовых переменных системы известны в любой момент времени. В качестве метода построения законов управления использовался аппарат линейных матричных неравенств [11-13]. Вопросы применения нечетких моделей *Takagi-Sugeno* для управления нелинейными объектами с помощью линейных матричных неравенств рассмотрены в [14].

Нечеткая математическая модель

Электромагнитный подвес представляет собой механическую систему, состоящую из вывешиваемого жесткого тела (ротора) и расположенного сверху электромагнита [5]. Ротор находится в поле действия двух сил: силы тяжести и силы магнитного притяжения. Согласно второму закону Ньютона, при равенстве этих сил тело будет находиться в неподвижном состоянии. С математической точки зрения, электромагнитный подвес является нелинейным объектом, описываемым системой дифференциальных уравнений следующего вида [5] (1):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{2} \left[\frac{(1+x_3)^2}{(1-x_1)^2} - 1 \right], \\ \dot{x}_3 &= -\frac{(1+x_3)}{(1-x_1)} x_2 - a(1-x_1)x_3 + (1-x_1)u, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, x_3)^T \in R^{n_x}$ – вектор состояния системы; $u \in R^{n_u}$ – управление; a – постоянная величина ($a = 7,5$).

Безразмерная переменная x_1 соответствует вертикальному перемещению ротора, x_2 соответствует скорости перемещения, а x_3 описывает ток в цепи электромагнита. Неустойчивым положением равновесия системы является точка $x = 0$.

Выведем эквивалентную модель для системы (1) с помощью нечетких моделей *Takagi-Sugeno*. Непрерывные нечеткие модели *Takagi-Sugeno* в общем виде представляют собой матрично-векторные системы следующего вида [14] (2):

$$\dot{x} = F(\sigma)x + B(\sigma)u, \quad x(0) = x_0, \quad (2)$$

где $F(\sigma) \in R^{n_x \times n_x}$; $B(\sigma) \in R^{n_x \times n_u}$; $\sigma = \sigma(x) \in R^{n_\sigma}$.

Элементами матриц $F(\sigma)$ и $B(\sigma)$ должны быть непрерывные функции $\sigma_i(x)$. Для вывода эквивалентной нечеткой модели выполним следующие преобразования. Введем новую фазовую переменную (3):

$$x_4 = \frac{1+x_3}{1-x_1}. \quad (3)$$

Продифференцировав выражение (3), получим следующее линейное уравнение

$$\dot{x}_4 = \frac{x_3 + x_4 x_2}{1-x_1} = -ax_3 + u, \quad (4)$$

Таким образом, после такого преобразования система уравнений, описывающих электромагнитный подвес, примет следующий вид (4):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{2} [x_4^2 - 1], \\ \dot{x}_3 &= -x_4 x_2 - a(1-x_1)x_3 + (1-x_1)u \\ \dot{x}_4 &= -ax_3 + u, \end{aligned} \quad (5)$$

где $x^* = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T \in R^{n_{x^*}}$ – состояние системы; $u \in R^{n_u}$ – управление.

Переход от (1) к (5) означает отображение вида $R^{n_x} \mapsto R^{n_{x^*}}$. Существует и обратное отображение вида $R^{n_{x^*}} \mapsto R^{n_x}$. Теперь приведем систему (5) к виду (2). Матрицы $F(\sigma)$ и $B(\sigma)$ примут вид (6):

$$F(\sigma) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_1 \\ \sigma_2 & \sigma_3 & \sigma_4 & \sigma_5 \\ 0 & 0 & -a & 0 \end{pmatrix}, \quad B(\sigma) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_6 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где $\sigma_1 = \frac{1}{2}(x_4 - \frac{1}{x_4})$; $\sigma_2 = ax_3$; $\sigma_3 = -x_4$; $\sigma_4 = a(x_1 - 1)$; $\sigma_5 = -x_2$; $\sigma_6 = 1 - x_1$.

Функция σ_1 в точке $x_4 = 0$ терпит разрыв. Для того чтобы уйти от этого, можно сделать следующую замену во втором уравнении системы (5):

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{2} [x_4^2 - 1] = \frac{1}{2} (x_4 - 1)(x_4 + 1) = \frac{1}{2} x_4^* (x_4^* + 2). \quad (7)$$

Тогда, опустив звездочку в новой переменной x_4^* , система (5) примет следующий эквивалентный вид (8):

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2, \\
\dot{x}_2 &= \frac{1}{2}x_4(x_4 + 2), \\
\dot{x}_3 &= -(x_4 + 1)x_2 - a(1 - x_1)x_3 + (1 - x_1)u, \\
\dot{x}_4 &= -ax_3 + u.
\end{aligned} \tag{8}$$

Зададим подмножество $\Omega = \{a_{i1} \leq x_i < a_{i2}, i = \overline{1, n_x^*}\} \subseteq R^{n_x^*}$, в котором будем рассматривать нелинейный объект (5). Возможными положениями равновесия системы (8) могут быть точки $x_0^1 = (0,0,0,0)$, $x_0^2 = (0,0,0,-2)$. Однако точка $x_4 = -2$ не принадлежит области значений переменной x_4 , следовательно, остается только x_0^1 .

Для каждого значения σ_i определим функции принадлежности треугольного вида (9):

$$M_{i1,2} = \frac{\pm\sigma_i \mp \sigma_i^{\min, \max}}{\sigma_i^{\max} - \sigma_i^{\min}}, i = \overline{1, n_\sigma}. \tag{9}$$

Общее количество таких функций равно $2n_\sigma$. Область значений каждой функции принадлежности образует свое нормированное нечеткое множество. Значения функций $\sigma_i(x)$ удобно представить в виде матрицы $\sigma_{imax, min} \in R^{2 \times n_\sigma}$.

Теперь сформируем базу нечетких правил для исследуемого объекта (10):

$$\begin{aligned}
R^i: & \text{IF } \sigma_1 \text{ is } M_{11} \text{ and } \dots \text{ and } \sigma_{n_\sigma} \text{ is } M_{n_\sigma 1} \\
& \text{THEN } \dot{x} = A_i x + B_i u,
\end{aligned} \tag{10}$$

где R^i – нечеткое правило ($i = \overline{1, r}$); $r = 2^{n_\sigma}$ – количество правил; $A_i \in R^{n_x^* \times n_x^*}$, $B_i \in R^{n_x^* \times n_u}$.

Каждому правилу соответствует своя линейная подсистема, определяемая матрицами A_i , B_i . Общее количество таких линейных подсистем равно количеству правил r . Нечеткая модель нелинейной системы (8) представляется как взвешенная сумма всех линейных подсистем (11):

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(\sigma) [A_i x + B_i u], \tag{11}$$

где $h_i(\sigma) = \prod_{j=1}^{n_\sigma} M_{i1,2}^j(\sigma_j)$ – произведение функций принадлежности.

Таким образом, полученная непрерывная нечеткая модель (11) представляет нелинейный объект (8) на рассматриваемом подмножестве $\Omega \in R^{n_x^*}$.

Прежде чем переходить к постановке задачи, несколько упростим модель (8). Наибольшее количество нелинейных функций сосредоточено в третьем уравнении системы (8). Линеаризация этого уравнения позволит существенно сократить количество правил и тем самым, упростить весь дальнейший анализ. После линеаризации этого уравнения в окрестности положения равновесия, система (8) примет вид (12):

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2, \\
\dot{x}_2 &= \frac{1}{2}x_4(x_4 + 2), \\
\dot{x}_3 &= -x_2 - ax_3 + u, \\
\dot{x}_4 &= -ax_3 + u.
\end{aligned} \tag{12}$$

Тогда матрицы $F(\sigma)$ и B запишутся как (13):

$$F(\sigma) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_1 \\ 0 & -1 & -a & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{13}$$

где $\sigma_1 = \frac{1}{2}(x_4 + 2)$.

Очевидно, что работать с системой (12) значительно проще, нежели с системой (8). Окончательная нечеткая модель нелинейной системы (12) запишется в следующем виде (14):

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r M_i A_i x + B u. \tag{14}$$

Постановка задач управления

Сформулируем две задачи управления. Первая из них состоит в вычислении нечеткого стабилизирующего регулятора, обеспечивающего асимптотическую устойчивость нечеткой системы (11). Вторая задача заключается в синтезе нечеткого регулятора по квадратичному критерию качества. Для этого введем в рассмотрение целевой выход $z \in R^{n_z}$ (15):

$$z = Cx + Du, \quad (15)$$

В качестве квадратичный критерия будем рассматривать функционал следующего вида (16):

$$\|z\|^2 = \int_0^\infty (x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + u^2) dt. \quad (16)$$

Соответствующие этому функционалу матрицы C и D имеют следующий вид:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Задача 1. Для каждого правила $i = \overline{1, r}$ найти закон управления следующего вида (17):

$$u(t) = F_i x(t), \quad (17)$$

где $F_i \in R^{n_u \times n_x}$.

Полное управление всей системой запишется в виде взвешенной суммы (18):

$$u(t) = \sum_{i=1}^r M_i F_i x(t). \quad (18)$$

Уравнение замкнутой нечеткой системы с учетом (18) примет вид (19):

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r M_i (A_i + B F_i) x. \quad (19)$$

Задача 2. Найти закон управления вида (17), который минимизирует квадратичный функционал (16).

Таким образом, требуется вычислить два регулятора: регулятор стабилизирующего типа и регулятор, доставляющий минимум функционалу (16).

Синтез законов управления

Для синтеза законов управления использовался аппарат линейных матричных неравенств [11-13]. Воспользуемся результатами, представленными в монографии [11] и распространим эти результаты на случай нечетких систем.

Рассмотрим квадратичную функцию Ляпунова $V(x) = x^T(t) X x(t)$. Производная $V(x)$ в силу системы нечеткой системы (19) равна (20):

$$\dot{V}(x) = \sum_{i=1}^r M_i x^T [(A_i + B F_i)^T X + X (A_i + B F_i)] x. \quad (20)$$

Чтобы замкнутая система (19) была устойчивой, необходимо и достаточно чтобы выполнялись следующие матричные неравенства (21):

$$(A_i + B F_i)^T X + X (A_i + B F_i) < 0, \quad (21)$$

где $X = X^T > 0$.

Раскроем скобки и умножим слева и справа неравенства (21) на $X^{-1} = Y > 0$

$$Y A_i^T + A_i Y + Y F_i^T B^T + B F_i Y < 0. \quad (22)$$

Введем новые матричные переменные $Z_i = F_i Y$. Тогда (22) перепишутся в виде линейных матричных неравенств (23):

$$Y A_i^T + A_i Y + Z_i^T B^T + B Z_i < 0. \quad (23)$$

Чтобы нечеткая система (19) была асимптотически устойчивой, должны существовать общая положительно определенная матрица Y и семейство матриц Z_i , удовлетворяющих линейным матричным неравенствам (23). Если эти матрицы существуют, то матрицы обратной связи находятся из соотношений (24):

$$F_i = Z_i Y^{-1}. \quad (24)$$

где $i = \overline{1, r}$. Выражения (23) представляют собой систему, состоящую из r линейных матричных неравенств с $(r + 1)$ матричными переменными.

Для вычисления управления, доставляющего минимум функционалу (16), воспользуемся конечными результатами, изложенными в [11]. Для нечеткой системы (19), общая матрица Y и семейство матриц Z_i , должны удовлетворять системе линейных матричных неравенств (25):

$$\begin{pmatrix} YA_i^T + A_i Y + Z_i^T B^T + B Z_i & Y C^T + Z_i^T D^T \\ CY + D Z_i & -\gamma I \end{pmatrix} < 0 \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} Y & I \\ I & \gamma I \end{pmatrix} > 0, \quad (26)$$

где $i = \overline{1, r}$. Оптимальное управление по критерию (16) вычисляется путем минимизации параметра γ при ограничениях, заданных в виде системы матричных неравенств (25), (26). Если искомые матрицы существуют и найдены, то матрицы обратной связи вычисляются согласно (24). Полное управление вычисляется по формуле (18).

Численные результаты

Вычисленные регуляторы поочередно подставлялись в исходный нелинейный объект (1). При переходе к (1) учитывалась введенная при выводе нечеткой модели фазовая переменная $x_4 = \frac{x_1 + x_3}{1 - x_1}$ и осуществлялось обратное отображение $R^{n_{x^*}} \mapsto R^{n_x}$. Для решения системы дифференциальных уравнений использовались одношаговые явные методы Рунге-Кутты четвертого и пятого порядков. Графики переходных процессов в исходной системе с регулятором стабилизирующего типа представлены на рис. 1.

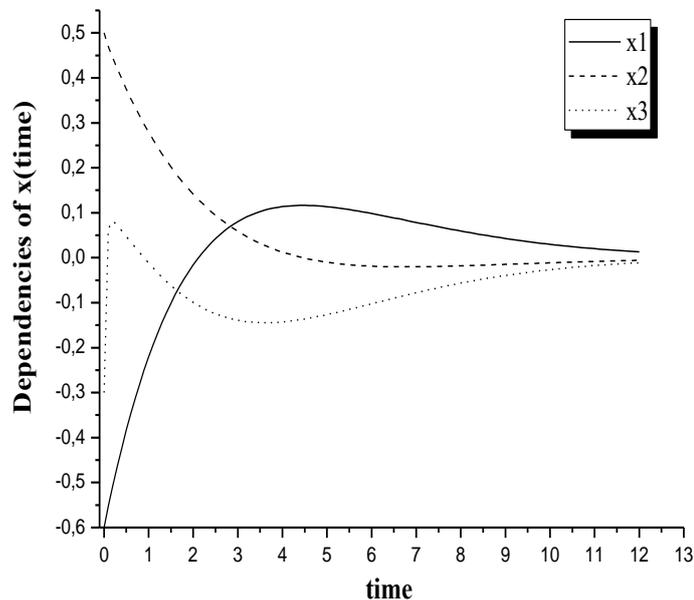


Рис. 1. Переходные процессы в системе с регулятором стабилизирующего типа

Графики переходных процессов в системе с регулятором по квадратичному критерию качества показаны на рис. 2.

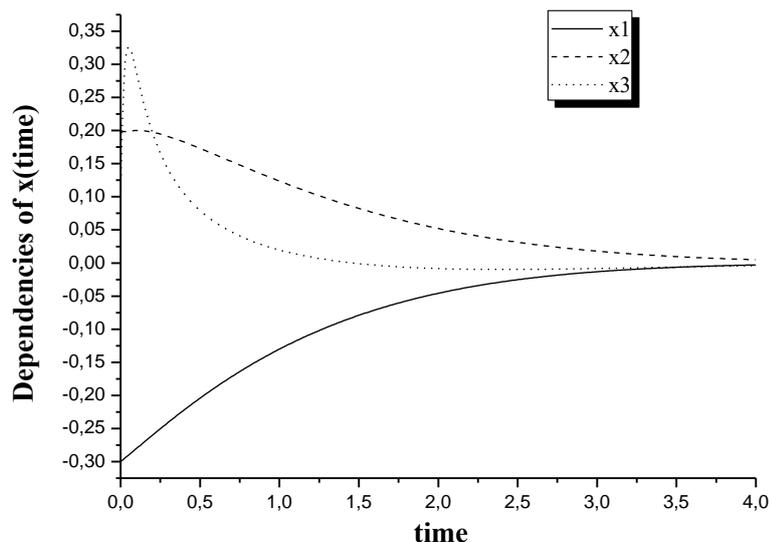


Рис. 2. Переходные процессы в системе с регулятором по квадратичному критерию

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что найденные нечеткие регуляторы стабилизируют исходный нелинейный объект в достаточно широком диапазоне начальных отклонений, несмотря на то, что вычисления выполнялись для упрощенной нелинейной системы. Исходя из сравнительного анализа графиков переходных процессов, можно заключить, что регулятор с квадратичным критерием качества обеспечивает стабилизацию с лучшим качеством переходных процессов.

Заключение

Представлены результаты численных расчетов регуляторов с использованием нечетких моделей *Takagi-Sugeno* для ротора в системе электромагнитного подвеса. Выведена нечеткая модель подвеса и управления. Полученные результаты численных экспериментов показали, что с помощью нечетких моделей *Takagi-Sugeno* можно построить как стабилизирующий регулятор, так и оптимальный регулятор по квадратичному критерию качества. Найденные регуляторы обеспечивают стабилизацию ротора в достаточно широком диапазоне начальных отклонений. Представленная нечеткая модель объекта, в отличие от линейной, позволяет в более широких диапазонах описывать динамику исследуемого объекта.

Перспективной задачей для дальнейших теоретических исследований может быть применение описанного подхода для управления вращающимся ротором в электромагнитных подшипниках.

Автор благодарит профессора кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа ИТММ Д.В. Баландина за консультацию, ценные и полезные замечания, а также проявленный интерес к работе.

Библиографический список

1. **Zhuravlev, Yu.N.** Active Magnetic Bearings. Theory, Calculation, Application / Yu.N. Zhuravlev. SPb.: Politechnica, 2003.
2. **Schweitzer, G.** Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery / G. Schweitzer, E. Maslen. – Berlin: Springer, 2009.
3. **Гринвальд, В.М.** Первый отечественный аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н «СПУТНИК» на основе имплантируемого насоса крови / В.М. Гринвальд, Г.С. Кузьмин, Ю.П. Маслобоев, С.В. Селищев, Д.В. Тельшев // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 5. – С. 516-521.
4. **Masuzawa, T.** Ch. 11: Motor design and impeller suspension / T. Masuzawa, M. Osa, M. Mapley // Mechanical Circulatory and Respiratory Support. Elsevier, 2017. – P. 335-377.
5. **Баландин, Д.В.** Оптимальная стабилизация тела в электромагнитном подвесе без изменения его положения / Д.В. Баландин, Р.С. Бирюков, М.М. Коган, А.А. Федюков // Изв. РАН. ТИСУ. – 2017. – № 3. – С. 12-24.
6. **Gruber, W.** Self-Sensing Active Magnetic Bearing Using 2-Level PWM Current Ripple Demodulation / W. Gruber, M. Pichler, M. Rothbock, W. Amrhein // Proc. 7th Intern. Conf. on Sensing Technology. Wellington, New Zealand, 2013. – P. 591-595.
7. **Gluck, T.** Resistance Estimation Algorithm for Self-Sensing Magnetic Levitation Systems / T. Gluck, W. Kemmetmuller, C. Tump, A. Kugi // Proc. 5th IFAC Symp. on Mechatronic Systems. Boston, USA, 2010. – P. 32-37.
8. **Kumar, V.** LQR Based Optimal Tuning of PID Controller for Trajectory Tracking of Magnetic Levitation System / V. Kumar, J. Jerome // Procedia Engineering. – 2013. – V. 64. – P. 254-264.
9. **Yifei, Yang** Optimal Control and Output Feedback Design Options for Active Magnetic Bearing Spindle Position Regulation / Yifei Yang, Zhu Huangqiu // J. Networks. – 2013. – V. 8. – P. 1624-1631.
10. **Takagi, T.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. Systems Man Cybernet. – 1985. – Vol.15. – № 116. – P. 116-132.
11. **Баландин, Д.В.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007.
12. **Boyd, S.** Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory / S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan. – Philadelphia: SIAM, 1994.
13. **Gahinet, P.** The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab / P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali // User's Guide. - Natick, MA: The MathWorks, Inc., 1995.
14. **Tanaka, K.** Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach / K. Tanaka, H.O. Wang. – N.Y.: Wiley, 2001.

*Дата поступления
в редакцию: 01.02.2021*

A.V. Mukhin

APPLICATION OF TAKAGI-SUGENO FUZZY MODELS FOR ROTOR STABILIZATION IN AN ELECTROMAGNETIC SUSPENSION

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Purpose: The results of solving the problem of constructing state regulators for an electromagnetic suspension system based on the use of fuzzy Takagi-Sugeno models are presented. Two problems are considered: the construction of a stabilizing regulator and the construction of a regulator based on a quadratic quality criterion. To calculate the parameters of the regulators, we used the apparatus of linear matrix inequalities applied to fuzzy Takagi-Sugeno models. A fuzzy mathematical model of the object is derived that is equivalent to the original nonlinear model. The regulators were calculated for a fuzzy model of the object, and then substituted into the original nonlinear object. It was assumed that the values of all phase variables are known at any given time. The results showed that using fuzzy Takagi-Sugeno models, it is possible to control the rotor stabilization in an electromagnetic suspension in a wide range of initial deviations. A comparative analysis of transient graphs shown that a regulator with a quadratic quality criterion provides a higher quality of stabilization.

Design/methodology/approach: The fuzzy mathematical models and methods, linear matrix inequalities techniques and effective convex optimization methods are used. The conditions of tasks are presented in terms of number linear matrix inequalities.

Findings: This work shows that by means of Takagi-Sugeno fuzzy models it possible to design the control for a rotor in electromagnetic suspension system with good quality of transients.

Research limitations/implications: The results of this work are of great interest for further research on the construction of fuzzy models for rigid rotor, rotating in electromagnetic bearings.

Originality/value: In this work, optimal control by means of fuzzy methods for nonlinear objects was realized. To thanks this, it is possible to control the object in a wide range of initial deviations.

Key words: electromagnetic suspension, rotor, Takagi-Sugeno fuzzy models, nonlinear object, stabilization, optimal control, linear matrix inequalities, transients.

А.К. Халайджи¹, И.Б. Мучник²**МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ НАРУШЕНИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА НА ОСНОВЕ КОДИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ RR-ИНТЕРВАЛОВ СИГНАЛА ЭКГ**¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия²Ратгерский государственный университет
Нью-Джерси, США

Проанализирована структура метода Цетлина как представителя семейства интервальных методов, позволяющего в режиме реального времени отслеживать нарушения сердечного ритма на основе априорного кодирования последовательности RR-интервалов с помощью системы решающих правил и анализа получаемого кода. Предложены три схемы апостериорного кодирования на основе алгоритма адаптивной одномерной кластеризации RR-интервалов в локальной окрестности R-пиков. Приведены способы генерации лингвистического признакового описания R-пиков с помощью рассмотренных методов априорного и апостериорного кодирования RR-интервалов, находящихся в их локальной окрестности. Проведен обзор лучших классификаторов нарушений сердечного ритма по R-пикам, не использующих нейросети, анализирующих явно задаваемое признаковое пространство и представивших свои результаты в соответствии с рекомендациями международного стандарта ААМІ и парадигмой разбиения inter-patient для сигналов из MIT-BIH. Показано, что модели, использующие предложенные лингвистические признаки, достигают наилучших значений метрики jk-index по сравнению с моделями на других активно используемых на практике признаках. Получена ансамблевая модель, использующая предложенные лингвистические признаки и достигшая значения jk-index = 0,807, что является лучшим результатом среди известных методов, не использующих нейросети и анализирующих явно задаваемое признаковое описание R-пиков.

Ключевые слова: кодирование RR-интервалов, сигнал ЭКГ, лингвистическое признаковое описание R-пика, метод Цетлина, адаптивная одномерная кластеризация, SVM, ансамбль, inter-patient, MIT-BIH, jk-index.

Введение

Направление автоматического анализа биомедицинских сигналов является крайне актуальным [1]. Одной из главных задач является автоматическое обнаружение и классификация аритмий [2]. Для обучения моделей автоматического обнаружения аритмий, в соответствии со стандартом ААМІ EC57:2012, используются открытые базы данных, например, MIT-BIH, в которых для каждого R-пика приведен его класс, относящийся к одному из кластеров: *N*, *SVEB*, *VEB*, *F* и *Q*. Несмотря на большое количество работ, все еще не существует метода, способного безошибочно обрабатывать сигналы из открытых баз данных типа MIT-BIH. В последнее время появляется все больше методов на основе нейросетевых моделей, которые обрабатывают непосредственно отсчеты сигнала ЭКГ [3-5], однако такие модели все же не обладают достаточной производительностью и интерпретируемостью и требуют больше данных для обучения. Активное использование глубоких нейросетей обусловлено их способностью автоматически извлекать значимые признаки из сигнала в процессе обучения.

В то же время существует большое количество методов, использующих явно задаваемые группы признаков из сигнала ЭКГ [6-20]. Однако в большинстве подобных работ основные признаки имеют морфологическую природу, в то время как нарушения сердечного ритма, прежде всего, обусловлены изменением интервальных характеристик сигнала. Вопрос значимости интервальных признаков был популярен в конце XX в. с появлением первых открытых баз сигналов и, как следствие, работ по автоматическому обнаружению мерцательной аритмии [21-23], однако в современной литературе он практически не освещен. Вместе с тем, такие методы позволяют осуществлять обработку сигнала в режиме реального времени

и получать более интерпретируемые результаты. Более того, одним из результатов подобной обработки может быть код, символами которого являются результаты анализа отдельных RR-интервалов. В ряде исследований отмечена перспективность методов кодирования сигнала ЭКГ, поскольку они позволяют сжать информацию о сигнале, использовать их в качестве уникального кода человека наподобие его подписи [24-27] и не только выявить наличие разных нарушений, но и классифицировать и интерпретировать их [28-30]. Этим и обусловлена актуальность предлагаемого исследования.

Основной целью работы является создание новых способов кодирования RR-интервалов с целью лингвистического описания R-пиков и анализ эффективности такого представления. Для этого будут рассмотрены две схемы кодирования RR-интервала: априорная на основе решающих правил и апостериорная на базе кластеризации длительностей RR-интервалов в окрестности R-пика. Для сравнения с существующими решениями будет взята архитектура модели, на которой достигается лучшее качество на текущий момент, и ее признаковое пространство будет расширено предложенными признаками. В качестве основной метрики качества будет использован jk-index [10].

Анализ структуры метода Цетлина автоматического обнаружения аритмий на базе априорного кодирования RR-интервалов с помощью системы решающих правил

Лингвистический метод Цетлина [30] позволяет автоматически с помощью системы правил обнаруживать аритмии по сигналу ЭКГ, анализируя последовательности RR-интервалов. Для этого непрерывно измеряется длительность последовательных RR-интервалов, оценивается средняя длительность интервала в течение 1-2 мин, а последующие интервалы кодируются символом в зависимости от отклонения их длительности от средней по следующим правилам:

- отклонение $<25\%$ – норма (Н);
- отклонение $>25\%$ в сторону уменьшения – короткий (К);
- отклонение $>25\%$ в сторону увеличения – длинный (Д).

В [30] представлено соответствие между всеми «тройками» символов и видам нарушений сердечного ритма, при их наличии, или нормальным режимом. Практическую ценность метода представляют его простота и работа в режиме реального времени. В [31] проведено исследование качества этого метода на сигналах из *MIT-BIH*, в результате которого было получено, что, несмотря на то, что метод не анализирует отдельные R-пики и работает с «тройками» RR-интервалов, он позволяет с довольно высокой точностью распознавать основные виды ритмических аномалий *SVEB* и *VEB*. Он, однако допускает много ложных срабатываний, связанных с инерционностью метода, и пропускает морфологические аномалии, не приводящие к изменениям длительностей RR-интервалов. В той же работе выявлены и исследованы параметры метода Цетлина:

- длительность интервала для усреднения;
- порог отклонения от «нормы» для отнесения RR-интервала к коротким;
- порог отклонения от «нормы» для отнесения RR-интервала к длинным.

По итогам исследования [31] было выявлено, что изменения этих параметров действительно решают проблему инерционности для некоторых сигналов, однако не существует единой конфигурации, которая бы улучшила качество работы метода одновременно на всех сигналах из *MIT-BIH*. Важными выводами работы [31] являются также предложения по дальнейшим исследованиям с целью решения недостатков метода, которые будут реализованы в этом исследовании:

- использовать признаки метода Цетлина для построения отдельного классификатора классов R-пиков в соответствии с рекомендациями ААМІ, в том числе, с добавлением морфологических признаков в модель;
- исследовать влияние других параметров на качество работы метода Цетлина;

- длины анализируемой последовательности (в оригинальном методе используется длина, равная 3);
- мощности алфавита / числа классов RR-интервалов (в исходной работе использовались только 3 класса и соответствующих им символа: «К», «Д» и «Н»).

Апостериорный подход к кодированию RR-интервалов с использованием кластеризации

Кодирование RR-интервала нацелено на выявление индивидуальных статистических характеристик n -грамм для каждого обследуемого. Так, если у Цетлина символы «К», «Н» и «Д» вводятся фиксированно по величине априорно задаваемого порога, то для конкретного человека эти границы могут определяться с помощью кластерного анализа, основываясь на полученных апостериорных длительностях RR-интервалов. В качестве алгоритма кластеризации достаточно использовать, в том числе, и самый простой, например, *KMeans*. Результатом такой кластеризации будут апостериорные значения порогов, разделяющие кластеры друг от друга. Каждому кластеру достаточно присвоить уникальный символ, и такое разбиение позволяет закодировать все анализируемые RR-интервалы.

Существует большое количество работ, в которых используется кластеризация для анализа сигналов ЭКГ. Например, в [32-34] решается задача подбора признаков для разделения свойств, присущих разным заболеваниям. В [35-37] кластеризация использовалась для бинарной классификации наличия QRS-комплекса в скользящем окне при непрерывном поступлении новых значений сигнала для решения задачи сегментации. В некоторых работах [38-40] применяли кластеризацию для автоматического обнаружения лишь нескольких типов аритмий, а не всех, как рекомендует стандарт *AAMI*. Многие исследования посвящены исследованию структуры метода кластеризации: в [40,41] исследуются новые метрики расстояния, в [41,42] – «мягкая» кластеризация *Fuzzy C-Means*, в [43,44] проработан вопрос ускорения самой процедуры кластеризации. Наконец, в [44, 46] кластеризация использовалась для получения входных признаков для нейросети.

Отдельного внимания заслуживает работа [47], где описан механизм кодирования и лингвистического анализа сигнала ЭКГ с помощью алгоритма кластеризации *Cobweb*. Задачей этого исследования было решение общей проблемы автоматизации клинического анализа, который максимально можно извлечь из сигнала ЭКГ. Это становится особенно ясно из того, что главное внимание уделяется исследованию вариациям формы сегментов QRS-комплексов ЭКГ сигнала. Тем не менее, анализируется не последовательность RR-интервалов, а весь QRS-комплекс в целом. В свою очередь, интерес в текущем исследовании состоит в кластеризации длительностей RR-интервалов, поскольку именно они являются основным критерием наличия большинства видов аритмий.

Поскольку решаемая задача относится к классу одномерных (объекты – это длительности RR-интервалов), то, если представить все анализируемые значения RR-интервалов на одной числовой прямой, задача кластеризации сводится к оптимальному разбиению отрезка между минимальной и максимальной длительностью RR-интервала на заранее известное количество непересекающихся подотрезков, полностью покрывающих изначальный. Существует модификация алгоритма *KMeans*, использующая динамическое программирование для нахождения оптимального разбиения n объектов на k кластеров с вычислительной сложностью $O(kn^2)$ и емкостной – $O(kn)$ [48]. Необходимо также отметить, что теми же авторами достигнуты лучшие асимптотики для некоторых классов задач [49], но для решаемой задачи, в которой n имеет порядок нескольких десятков-сотен интервалов, а k – меньше 10, они не дают выигрыша, однако являются более сложными в реализации.

Основным недостатком этого алгоритма является необходимость задания изначально числа кластеров, на которое необходимо разбить исходные объекты. В общем случае последовательность значений RR-интервалов может быть произвольной: например, они все мо-

гут быть одинаковыми (что свидетельствует о наличии всего одного кластера из одного значения), а могут быть все различными, образуя большее число кластеров. Поскольку необходимо обеспечить функционирование алгоритма в автоматическом режиме, были добавлены критерии остановки, позволяющие адаптивно подбирать количество кластеров в зависимости от анализируемых данных.

Адаптивный подбор основан на последовательном увеличении числа кластеров от 1 до K , где K – число анализируемых RR-интервалов, или до выполнения условия остановки. Использовалось следующее правило – если для хотя бы для одного из кластеров евклидово расстояние (в одномерном случае – просто разность) между крайними длительностями RR-интервалов превышает порог, то кластер объединяет слишком разные RR-интервалы, и необходимо продолжить разбиение, увеличив число кластеров на 1. Подобная процедура эффективна, поскольку с помощью динамического программирования новая кластеризация может быть эффективно пересчитана с учетом текущей, в отличие от классического алгоритма *KMeans*, который необходимо было бы перезапускать заново. По аналогии с методом Цетлина значение допустимого порога является гиперпараметром и задается в процентном соотношении от средней анализируемой длительности RR-интервала.

С помощью описанного алгоритма кластеризации становится возможным закодировать последовательность RR-интервалов. Однако для этого необходимо сопоставить каждому из кластеров тот или иной символ. Поскольку количество кластеров может варьироваться, символы, получаемые для разного количества кластеров, должны быть согласованными. В рамках исследования использовалось разбиение не более чем на 5 кластеров. Это означает, что в результате адаптивной кластеризации последовательности RR-интервалов, она может быть разбита на число кластеров от 1 до 5. Были разработаны следующие схемы кодирования получаемых разбиений.

1. Adaptive5 – схема кодирования на 5 групп числом от 0 до 4:

1 кластер — код 2

2 кластера — коды 1 и 3

3 кластера — коды 1, 2 и 3

4 кластера — коды 0, 1, 3, 4

5 кластеров — коды 0, 1, 2, 3, 4

2. Adaptive3of5 – схема кодирования на 3 группы, считая «нормальной» группой только мало отличающиеся от среднего значения интервалы:

1 кластер — код 1

2 кластер — коды 0, 2

3 кластера — коды 0, 1, 2

4 кластера — коды 0, 0, 2, 2

5 кластеров — коды 0, 0, 1, 2, 2

3. Adaptive3of5wide – схема кодирования на 3 группы, позволяющая «нормальным» интервалам отклоняться больше от среднего значения:

1 кластер — код 1

2 кластер — коды 0, 2

3 кластера — коды 0, 1, 2

4 кластера — коды 0, 1, 1, 2

5 кластеров — коды 0, 1, 1, 1, 2.

Далее будут определены лучшие значения следующих гиперпараметров:

- длина кода;
- временной интервал, в рамках которого осуществляется кластеризация;
- величина эвристики допустимого размаха для остановки кластеризации.

Построение лингвистического признакового описания R-пика с использованием априорного и апостериорного подходов к кодированию RR-интервалов

Для возможности построения классификации, согласно рекомендациям ААМІ, необходимо адаптировать получаемые коды RR-интервалы в качестве признаков R-пиков. Каждый R-пик может быть нормальным или аномальным. Его аномальность может заключаться в изменении его морфологии без изменения интервальных характеристик сигнала, изменении его положения по отношению к предыдущему и последующему R-пикам без изменения морфологии, или в обоих явлениях сразу. В любом случае каждый R-пик ассоциируется с двумя RR-интервалами – preRR и postRR. Метод Цетлина сравнивает только предшествующие RR-интервалы, однако postRR используется часто в других последних исследованиях, начиная с [26]. Поэтому для получения признаков R-пика нужно кодировать postRR и preRR, и, при необходимости, более ранние интервалы (как в методе Цетлина).

Для исследования влияния истории на качество классификации будут рассмотрены коды длиной от 2 до 5 символов в рамках обоих подходов и длительность анализируемого от 0,1 до 5 мин. Величина размаха кластера для апостериорного подхода будет варьироваться в пределах от 10 до 100 % от среднего, а для исследования параметров метода Цетлина далее будут использованы 3 схемы разделения на классы относительно среднего значения нормы:

- 3 класса (стандартный метод Цетлина):
{<-0.25; [-0.25; 0.25]; >0.25};
- 5 широких классов:
{<-0.5; [-0.5; -0.25]; (-0.25; 0.25); [0.25; 0.5]; >0.5},
- 5 узких классов:
{<-0.25; [-0.25; -0.125]; (-0.125; 0.125); [0.125; 0.25]; >0.25}.

Получаемые коды являются последовательностями чисел, каждое из которых носит категориальный характер. Для использования этих кодов в качестве признаков классификатора, к ним применяется преобразование one-hot-encoding, в котором для K классов каждое число представляется характеристическим вектором из K элементов, где элемент, номер которого соответствует числу, равен единице, а все остальные – нулю.

Выбор базового набора признаков и схемы классификации

Ранее было предложено новое пространство лингвистических признаков для классификационного пространства пиков. Для оценки его качества и сравнения с существующими признаковыми пространствами ниже будет проведен обзор современных классификаторов, в рамках которого будет выбран один из них. На его основе будет построено расширенное признаковое пространство и оценен вклад каждого из компонентов такого пространства, а также качество финального классификатора в целом. Отправной точкой для выбора классификатора является обзор 2016 г. [2]. Ценность этой работы заключается в наличии ссылок на исследования, которые используют единую схему оценки результатов, предложенную в [11]. Также ниже проанализированы некоторые работы за последние 5 лет для выявления более современных классификаторов. В качестве ограничений при выборе использовались следующие соображения:

- использование только информации об R-пиках (и, возможно, прилегающей окрестности к ним), т.к. процедура извлечения R-пика наиболее проста;
- использование одного отведения, что проще и чаще используется;
- следование рекомендациям ААМІ и схемы [11] по представлению результатов;
- использование методов, анализирующих явно задаваемые признаки, вместо нейросетевых моделей, использующих значения амплитуд сигнала напрямую.

Последнее ограничение можно было бы обойти, используя в качестве базовых признаков выход промежуточных слоев нейросети, однако последние в любом случае проигры-

вают по интерпретируемости модели по сравнению с явными признаками. В то же время анализ показал, что в большинстве работ после 2016 г. используются нейросети, и существует очень мало работ, в которых осуществляется поиск наиболее информативных признаков.

В [8-18] используется два отведения и морфология T и P-волн, что затрудняет сегментацию. Техника, описанная в [15], имеет в большей мере теоретический интерес, поскольку в реальной практике нет доступа к тестовым данным, также в описанной процедуре происходит утечка знания о тестовой выборке в процесс обучения. В работе [17] используются только пятиминутные интервалы сигналов из тестовой выборки для оценки качества, что не соответствует идее *inter-patient*, поскольку переобучает модели на тестовых данных. В [19] рассчитаны не все показатели качества, рекомендуемые ААМІ, но используются эрмитовы базисные функции и статистики высших порядков (HOS). Работа [20] освещает вопрос анализа значимости признаков, которые были прежде использованы в других работах. В [5] заявлено наилучшее качество среди работ из [2], однако в ней используется нестандартная нейросетевая архитектура *Reservoir Computing*, а также анализируется сигнал напрямую.

Из работ, которые представлены в [2], наибольший интерес представляет [7] – здесь полностью описана вся процедура и мотивация выбора архитектуры модели, однако класс F объединён с классом VEB, что несколько упрощает исходную задачу. Результаты, представленные в этом исследовании, являются одними из лучших, однако структура метода затрудняет расширение признакового пространства. Этим недостатком лишена работа [6], в которой предложены ансамбли SVM-моделей, построенных на наиболее часто используемых в литературе признаках в области R-пика. Более того, в работе представлены лучшие показатели качества среди моделей, не использующих нейронные сети. Идея заключается в инструментальном разделении множеств признаков друг от друга и обучении отдельных классификаторов на каждой из групп с последующим их объединением в составе ансамбля по одному из правил голосования. Такой подход позволяет очень просто осуществить процедуру расширения пространства признаков, и само исследование выполнено со всеми рекомендациями ААМІ, поэтому для дальнейших экспериментов было выбрано именно оно.

Описание схемы экспериментов исследования признаков согласно выбранной архитектуре ансамбля независимых моделей

Согласно [6], все признаки необходимо из окна в 180 отсчетов в центре в R-пике. Таким образом, на основе идеальной сегментации были получены признаковые описания каждого из R-пиков сигналов из обучающей выборки. Каждый R-пик описывался следующими признаками:

- морфологические (180 отсчетов сигнала в центре в R-пике);
- 4 интервальных признака: preRR, postRR, localRR (средняя длительность последних 10 RR-интервалов) и globalRR (средняя длительность за 20 мин);
- 23 коэффициента 3-го уровня декомпозиции вейвлета Хаара (db1)
- 10 статистик 3-го и 4-го порядка для 5 точек с 30-отсчетным окном вокруг них;
- 59 ulbp-признаков (1d uniform local binary patterns с числом соседей 8). Гистограмма из 58 разных бинарных uniform-кодов (в которых соседние биты отличаются не более 2 раз) фрагментов в 8 отсчетов и число не uniform-кодов в качестве 59-го признака;
- 4 mondejar-признака – евклидово расстояние между максимальной по модулю точкой R-пика и 4 характерными точками в окрестности R-пика).

К ним добавлены лингвистические признаки, описанные выше. Сегментация сигнала не осуществлялась – использовались аннотации R-пиков из *MIT-BIH*, поэтому для возможности сравнения результатов она не будет осуществляться в этом исследовании. Поскольку все признаки [6] были отобраны из наиболее успешных ранее работ, а текущее исследование ставит целью исследование лингвистических признаков, в рамках дальнейших эксперимен-

тов не будут применяться специальные техники отбора признаков (например, L_1 -регуляризация). Для каждой группы признаков обучен самостоятельный классификатор, результаты работы которых – объединяются по одной из стратегий. Помимо рекомендованных ААММ метрик, в качестве основной интегральной метрики качества будет использоваться jk -index, предложенный в работе [10] и использовавшийся в [6].

Схема подбора лучших значений параметров лингвистических моделей

Для подбора эффективных значений параметров лингвистических моделей использовалась кросс-валидация. Авторы [6] использовали в своей работе 10fold-cross-validation (10fold-CV), поэтому в исследовании использовалась наиболее близкая к ней схема 11fold-CV. Она заключается в делении исходного множества из 22 сигналов из обучающей выборки на «пары сигналов» (1-й и 2-й, 3-й и 4-й и т.д.), последовательному обучению для каждой комбинации гиперпараметров на 20 сигналах и валидации качества модели на 2 оставшихся. Итоговое качество для каждого набора гиперпараметров определяется путём усреднения показателей качества для всех результатов на валидации.

Всего в каждом сигнале по 2-3 тыс. R-пиков, а записей при обучении – 20, что приводит к размеру выборки в 40-50 тыс. объектов. На таких объемах SVM-модель, (особенно с RBF-ядром) и кросс-валидацией обучалась бы очень долго. Поэтому для подбора эффективных гиперпараметров использовалась упрощенная модель логистической регрессии, поскольку она работает намного быстрее, а результат ее работы также можно использовать в качестве вероятности отнесения объекта к тому или иному классу, что используется для голосования моделей ансамбля в соответствии со схемой [6].

Поскольку признаков довольно много, то для борьбы с переобучением использовалась регуляризация. При обучении логистической регрессии использовалась только L_2 -регуляризация, так как подразумевалось, что отбор признаков, присущий L_1 -регуляризации, выполнять не нужно из-за информативности всех признаков. Использовались те же значения коэффициента регуляризации, что и в [6] – 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000.

Далее, в работе группы признаков по Цетлину и алгоритму кластеризации представлены в следующем формате:

`Cetlin_<duration>_<num_classes>_<left_treshold>_<code_length>`

`Cluster_<duration>_<max_cluster_variance>_<coding_algo>_<code_length>`

В качестве целевой метрики качества использовался jk -индекс, как и в [6]. Для оптимизации в процессе обучения использовался алгоритм *LBFSGS* с 100 итерациями и точностью сходимости 0,001. При этом использовалась multinomial-классификация с балансировкой весов в соответствии с соотношением числа объектов того или иного класса.

В результате анализа влияния параметров метода Цетлина на его качество было выявлено, что при больших длинах кода качество хуже, чем при малых, что свидетельствует о том, что слишком большая история не релевантна для конкретного R-пика. С точки зрения длительности сигналов, лучшее качество было достигнуто для 2-минутных кодов, и худшее – для 5- и 0,5-минутных (из-за инерции и нехватки длины истории соответственно). Наконец, лучшие значения метрик качества показала модель с 3 классами по сравнению с 5 классами. Анализ кластерных моделей показал, что чем больше интервал для анализа, тем результаты хуже, что справедливо для всех трех схем, из-за чего результаты для 5 намного хуже, чем для 2 или 0,5 минут. Для величины размаха – наоборот: при совсем малых значениях (0,1) качество намного хуже, чем для 0,3. В то же время для слишком больших значений (около 1,0) – качество тоже ухудшалось. Наилучшее значение для всех кластерных моделей достигалось в диапазоне 0,3-0,4. Наконец, лучшего качества достигли коды длины 3, а худшего – длины 5. Для коротких интервалов длинное кодирование надежнее и устойчивее, а при увеличении длительности интервалов 3-символьный код работает лучше 5-символьного. Лучшей по оказалась Adaptive3of5wide, после чего adaptive5 и adaptive3of5.

Был проведен анализ моделей для наиболее эффективных значений гиперпараметров согласно кросс-валидации на обучении и на тестовой выборке. Полученные в процессе кросс-валидации и на тестовой выборке результаты были ранжированы по значению *jk-index* с группировкой результатов моделей по одинаковым значениям каждого из гиперпараметров. Для ранжирования использовался показатель *Cumulative-Gain* – сумма позиций в упорядоченном по убыванию значения метрики *jk-index* списке для каждого из значений гиперпараметров. В итоге модели, имеющие высокое качество, обладают меньшей суммой, чем те, которые имели худшее качество. Основным недостатком выбранной метрики является то, что наличие хотя бы одной конфигурации в конце списка сильно влияет на итоговую сумму, даже если все остальные значения были в начале списка, но это контролируется при ручном отборе итоговых конфигураций. Таким оказались:

- Cetlin_2_3_-0.25_2;
- Cluster_0.4_0.3_adaptive5_3;
- Cluster_0.4_0.4_adaptive3of5_3;
- Cluster_0.4_0.3_adaptive3of5wide_3.

Можно сделать вывод, что для метода Цетлина в рамках классификатора оказались наиболее информативными коды только для *preRR* и *postRR* без дополнительной истории, а все остальные параметры – соответствуют стандартной конфигурации метода. Значение размаха 0,3 или 0,4 интерпретируется отклонением на 15 или 20 % от состояния нормы в обе стороны для центрального кластера. При этом видно, что для *adaptive3of5*, где допускается малое отклонение от нормы, размах больше и равен 0,4, а в *adaptive3of5wide*, где допускается большее отклонение – меньше и равен 0,3, т.е., модели согласованы друг с другом.

Результаты исследования ансамблей лингвистических моделей

Помимо поиска наилучших одиночных моделей была осуществлена попытка построения ансамблей из разных моделей в рамках одной группы признаков – например, ансамбля из моделей Цетлина и т.п. Для объединения результатов использовались стратегии из работы [6]: *product*, *sum* и *majority rule*. На одном из первых этапов обучения, когда еще не были обнаружены эффективные значения гиперпараметров, были получены следующие лучшие ансамбли для лингвистических моделей на обучающей выборке (табл. 1):

Таблица 1.

Качество одиночных и ансамблей лингвистических моделей

Конфигурация модели	<i>jk-index</i>
Cetlin product rule	0.547
Best Cetlin_2_3_-0.25_2	0.537
Adaptive5 majority rule	0.525
Worst Cetlin_5_5_-0.25_2	0.429
Adaptive3of5wide majority rule	0.255
Adaptive3of5 sum rule	0.237
Best Cluster_0.5_0.3_Adaptive3of5wide_2	0.235
Best Cluster_0.5_0.3_Adaptive5_2	0.232
Best Cluster_0.5_0.3_Adaptive3of5_2	0.214

Когда все базовые модели обладали примерно одинаковым качеством – ансамбли действительно улучшали результат. Однако после того, как были обнаружены более эффективные наборы гиперпараметров, качество одиночных моделей стало лучше качества, достигаемого ансамблем (табл. 2).

Таблица 2.

Плохое качество ансамбля при большом разбросе базовых моделей

Конфигурация модели	jk-index
Best Cetlin_2_3_-0.25_2	0.463
Cetlin product rule	0.450
Worst Cetlin_5_5_-0.5_4	0.370

Плохие одиночные модели сильно ухудшают итоговое предсказание модели, поэтому было решено образовывать ансамбли только из лучших одиночных моделей. Промежуточные модели могут давать ненормированные вероятности для всех классов (например, после объединения всех Цетлиновских моделей в ансамбль), и использование таких вероятностей (сумма которых может не равняться 1) на следующих уровнях приводит к ошибкам вычислений и неправильным результатам. Аналогично, для SVM-моделей, где вероятности формируются на основе суммы значений сигмoids единичных *One-Vs-One* бинарных классификаторов, необходимо нормализовать итоговые величины, чтобы их можно было использовать в качестве вероятности, а также для уравнивания вклада от разных моделей при объединении их результатов на уровне ансамбля.

С другой стороны, из табл. 1 видно, что нет единого правила объединения результатов ансамблей, которое давало бы во всех случаях наилучшее качество. Для итогового ансамбля можно получить sum-, product- и majority-значение, однако: какое из них необходимо выбрать в автоматическом режиме при распознавании очередного пика – однозначный ответ дать нельзя. Поэтому предложена еще одна схема голосования – voted.

Назначение voted-способа объединения заключается в получении единого результата на основе трех предсказаний, получаемых правилами sum, product и majority. Для каждой из моделей выбирается класс, которому модель даёт наибольшую вероятность, и затем осуществляется голосование между тремя результатами. В результате выбирается тот класс, за который было набрано больше всего голосов (от 2 до 3). Если все три модели проголосовали за разные классы, то приоритет отдаётся product rule, которое достигает наилучших значений в соответствии с результатами текущего исследования и [6]. Voted стратегия отличается от majority, поскольку в majority после суммирования приоритет может отдаться необязательно product rule при прочих равных, причем тому кандидату, где наименьшая «неудачная» вероятность от другой модели была лучше.

Анализ качества итогового ансамбля с использованием логистической регрессии

Для признаков из работы [6] перед использованием логистической регрессии было применено z-нормирование. В табл. 3 отражены полученные результаты. Видно, что на обучении лучшей моделью был ансамбль, состоящий из признаков лучшей модели из [6], а также Cetlin и Adaptive3of5. Те же лингвистические признаки вошли в состав лучшего ансамбля на тестовой выборке. С другой стороны, видно, что качество лучшей модели только на основе лингвистических признаков меньше, чем качество лучшей модели только на морфологических признаках, однако вместе они работают лучше.

Сравнивая результаты (табл. 3) с [6], видно, что полученный лучший результат меньше лучшего результата, представленного в статье. Это связано, в первую очередь, с тем, что используется логистическая регрессия, а не SVM с RBF-ядром. Поэтому далее проведено полноценное обучение SVM-моделей с кросс-валидацией для подбора лучших значений коэффициента L_2 -регуляризации на найденных наилучших конфигурациях лингвистических моделей и других признаках из [6].

Таблица 3.

Качество моделей логистической регрессии для тестовой выборки

Признаки и правила агрегации результатов одиночных моделей	jk-index
Best Product Morphological Interval Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive3of5	0.7195
Best (Without Linguistic) Product Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar	0.6559
Best Train Voted Morphological Interval Wavelet Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive3of5	0.6297
Best (Linguistic Only) Majority Adaptive3of5wide Cetlin	0.5246
Adaptive3of5wide	0.4860
Interval	0.4663
Cetlin	0.4627
Adaptive3of5	0.4514
Adaptive5	0.3643
Mondejar	0.3379
Hos	0.2701
Morphological	0.1845
Wavelet	0.1723
Ulbp	0.1422

Итоговое качество ансамбля с применением SVM-классификаторов

По умолчанию SVM-классификаторы не позволяют определять вероятность, однако для получения степени отнесения к тому или иному классу можно использовать схему, предложенную в [6], через использование *decision function*. В ней предлагается использовать *One-Vs-One* (OVO)-схему обучения в силу несбалансированности выборки, и далее предсказание одной SVM-модели выражать через предсказания бинарных OVO-классификаторов. Для этого в каждого из бинарных OVO-SVM-классификаторов рассчитываются значения сигмоиды на основе предсказания модели и реального класса R-пика, которые суммируются по всем бинарным моделям в рамках исходной SVM-модели и нормализуются, чтобы затем использоваться в том или ином правиле агрегации на уровне ансамбля. Итоговые результаты при использовании такой схемы показаны в табл. 4.

Лучший ансамбль использует adaptive3of5wide-кодирование и имеет лучшее значение jk-index, чем лучший результат, представленный в работе [6]. При анализе ТОП-10-моделей (табл. 5) видно, что все они используют модели на лингвистических признаках, что говорит о том, что добавленные признаки действительно улучшают качество итогового ансамбля. Наконец, можно сделать вывод, что согласно значению jk-index группы признаков Adaptive3of5wide, Cetlin и Adaptive3of5 лучше всех остальных, которые используются в большинстве работ, метод Adaptive3of5wide – лучший из них, а признаки метода Цетлина обладают наивысшей точностью и положительной прогностичностью для SVEB-аномалий.

Лучший полученный ансамбль использует все признаки лучшего ансамбля из работы [6], использует adaptive3of5wide-схему кодирования, а также voted-схему объединения результатов на уровне ансамбля. Из табл. 5 видно, что voted-стратегия используется во многих моделях, достигающих высокого значения jk-index. Также видно, что все эти модели обладают качеством лучше, чем заявлено в работе [6] по значению jk-index. Новый ансамбль лучше предложенного в работе [6] ансамбля на 4.4 %, если брать в расчет представленное значение в статье [6], и на 14,5 % лучше такой конфигурации согласно проведенным экспериментам. Наконец, в табл. 6-8 представлены обобщенные результаты для возможности сравнения с другими работами в соответствии с рекомендациями ААМІ.

Таблица 4.

Сравнительная таблица качества итоговых моделей на тесте

Группа признаков	N		SVEB		VEB		F		Acc	j-index	k-index	jk-index
	Se	P ⁺										
Voted Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5wide	97,1	98,5	83,2	58,1	95,4	90,0	1,29	10	95,7	3,267	0,797	0,807
[6] Best Product Interval Wavelet Hos	93,4	98,4	78,1	40,8	94,9	78,2	16,2	24,3	92,3	2,920	0,679	0,705
Best (Linguistic Only) Majority Adaptive3of5 Adaptive3of5wide Cetlin	86,3	98,0	57,3	31,4	80,4	56,9	0,8	0,1	84,2	2,260	0,460	0,512
Adaptive3of5wide	82,3	98,4	57,6	26,3	83,9	53,5	4,1	0,4	80,9	2,214	0,415	0,484
Cetlin	89,7	96,4	57,9	38,8	52,5	48,8	0,5	0,1	85,4	1,980	0,430	0,463
Adaptive3of5	82,0	98,1	56,1	21,0	81,6	50,7	0,8	0,1	80,4	2,094	0,399	0,461
Interval	76,0	99,3	73,4	23,2	67,1	50,2	76,3	5,2	75,3	2,139	0,355	0,445
Adaptive5	77,7	98,6	51,1	19,9	86,2	48,7	4,4	0,4	76,7	2,059	0,359	0,437
Mondejar	42,2	96,9	78,6	11,6	74,8	58,2	3,6	0,1	45,5	2,232	0,143	0,351
Wavelet	77,7	95,2	9,5	4,1	94,1	35,5	1,5	0,7	75,7	1,432	0,282	0,320
Morphological	72,2	94,7	11,5	3,5	91,9	42,5	0,8	0,1	70,7	1,494	0,231	0,302
Ulbp	90,8	93,2	0,1	1,1	67,2	34,0	0,3	0,8	85,2	1,023	0,324	0,290
Hos	56,9	95,2	65,4	9,3	39,7	38,3	80,2	4,4	56,3	1,527	0,144	0,263

Таблица 5.

10 лучших ансамблей на тестовой выборке

Признаки и правила агрегации результатов одиночных моделей	jk-index
Voted Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5wide	0.80702
Voted Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5	0.80638
Sum Interval Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5wide	0.80571
Sum Wavelet Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive3of5wide	0.80538
Voted Wavelet Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive3of5wide	0.80480
Product Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5wide	0.80349
Voted Wavelet Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive5	0.80333
Sum Wavelet Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive5	0.80314
Voted Interval Wavelet Hos Ulbp Mondejar Cetlin Adaptive3of5wide	0.80263
Voted Interval Hos Ulbp Mondejar Adaptive3of5wide	0.80249

Таблица 6.

Матрица ошибок лучшего ансамбля

Expected\Predicted	N	SVEB	VEB	F	Sum
N	42842	1045	207	43	44137
SVEB	247	1524	60	0	1831
VEB	97	50	3065	2	3214
F	306	2	75	5	388
Total	43492	2621	3407	50	49570

Таблица 7.

Интегральные метрики качества

Метрика\Класс	N	SVEB	VEB	F
Se	97,1	83,2	95,4	1,3
P ⁺	98,5	58,1	90,0	0,1
FPR	12,0	2,3	0,7	0,1

Из табл. 8 видно, что полученный результат лучше всех представленных работ, которые не используют нейросети. Значения «?» поставлены для тех работ, которые не представили матрицу ошибок, из-за чего невозможно посчитать определенные значения метрик. Знак «-» же означает, что авторы намеренно не анализировали соответствующий класс пиков. В первой строке показана работа, основанная на нейросетях, которая незначительно обходит полученную модель – прежде всего, за счет лучшего распознавания пиков типа F. В то же время, видно, что полученная модель лучше RC-модели для работы с классом SVEB по обоим метрикам (Se и P⁺) и опережает ее по кумулятивной метрике j-index.

Таблица 8.

Сравнение с другими работами

Классификатор	N		SVEB		VEB		F		Acc	j-index	k-index	jk-index
	Se	P ⁺										
Escalona-Moran et al [5] (нейросеть RC)	96,8	99,0	79,4	49,8	96,1	99,5	92,3	96,2	96,1	3,247	0,821	0,816
Текущее исследование	97,1	98,5	83,2	58,1	95,4	90,0	1,3	10,0	95,7	3,267	0,797	0,807
Mondejar et al [6]	94,7	99,6	91,1	42,2	94,0	92,4	-	-	94,5	3,196	0,759	0,779
Huang et al [7]	95,9	98,2	78,1	49,8	94,8	93,8	12,4	23,6	94,5	3,164	0,755	0,773
Zhang and Luo [8]	88,6	98,5	74,2	59,8	88,1	82,3	73,5	6,96	87,9	3,043	0,577	0,669
Zhang et al [9]	88,9	99,0	79,1	36,0	85,5	92,7	93,8	13,7	88,3	2,933	0,593	0,663
Mar et al [10]	88,3	99,0	83,2	33,5	86,8	75,9	61,1	16,6	87,8	2,794	0,594	0,646
Chazal et al [11]	87,1	99,2	76,0	38,5	80,3	81,7	89,4	8,6	86,2	2,765	0,532	0,612
Chen et al [12]	98,4	96,2	29,5	38,4	70,8	85,9	-	-	93,9	2,247	0,651	0,606
Liamedo and Martinez [13]	95,0	98,0	77,0	39,0	81,0	87,0	?	?	93,0	?	?	?
Lin and Yang [14]	91,0	99,0	81,0	31,0	86,0	73,0	?	?	93,0	?	?	?
Bazi et al [15]	?	?	?	?	?	?	?	?	92,0	?	?	?
Soria and Martinez [16]	92,0	85,0	88,0	93,0	90,0	92,0	?	?	90,0	?	?	?
Ye et al [17]	88,0	97,0	60,0	53,0	81,0	63,0	?	?	86,4	?	?	?
de Lannoy et al [18]	?	?	?	?	?	?	?	?	85,0	?	?	?
Park et al [19]	86,0	?	82,0	?	80,0	?	?	?	85,0	?	?	?
de Lannoy et al [20]	80,0	?	88,0	?	78,0	?	?	?	83,0	?	?	?

Заключение

Предложенные лингвистические признаки плохо распознают нарушения типа F, которое не приводит к изменениям длительностей RR-интервала. Подобный результат для остальных моделей (табл. 4 и 8) можно объяснить тем, что пики этого типа меньше всех остальных представлены в MIT-BIH. Отчасти поэтому многие работы не рассматривают этот класс отдельно, а добавляют его к VEB-пикам (например, в [7]).

Предложенные признаки улучшают качество классификации как одиночных моделей, так и итогового ансамбля, достигая лучшего качества среди моделей, не использующих нейросети. Полученный результат свидетельствует, что использования одного отведения достаточно для получения лучшего качества, а для обнаружения основных видов аритмий более существенны свойства RR-интервалов, а не морфология сигнала.

Библиографический список

1. **Buldakova, T.I.** Hierarchy of Human Operator Models for Digital Twin / T.I. Buldakova, S.I. Suyatinov // In: 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, Sochi, Russia, 2019. – P. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867602.
2. **Luz, E.J.S.** ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey / E.J.S. Luz, W.R. Schwartz, G. Camara-Chavez, D. Menotti // Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2016. – V. 127 – P. 144-164
3. **Warrick, P.** Cardiac Arrhythmia Detection from ECG Combining Convolutional and Long Short-Term Memory Networks / P. Warrick, M.N. Homsy // In: Computing in Cardiology (CinC).– IEEE, 2017. – P. 1–4. DOI: 10.22489/CINC.2017.161-460
4. **Hou, B.** LSTM Based Auto-Encoder Model for ECG Arrhythmias Classification / B. Hou, J. Yang, P. Wang, R. Yan // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – V. 69. – № 4. – 2019. – P. 1232-1230. DOI: 10.1109/TIM.2019.2910342
5. **Escalona-Moran, M. A.** Electrocardiogram Classification Using Reservoir Computing With Logistic Regression / M.A. Escalona-Moran, M. C. Soriano, I. Fischer, C.R. Mirasso // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. – 2015. – V. 19. – № 3. – P. 892-898. DOI: 10.1109/jbhi.2014.2332001
6. **Mondéjar-Guerra V.** Heartbeat classification fusing temporal and morphological information of ECGs via ensemble of classifiers / V. Mondejar-Guerra, J. Novo, J. Rouco, M.G. Penedo, M. Ortega. // Biomedical Signal Processing and Control. – 2019. – V. 47. – P. 41-48. ISSN 1746-8094, DOI: 10.1016/j.bspc.2018.08.007.
7. **Huang, H.** A new hierarchical method for inter-patient heartbeat classification using random projections and RR intervals / H. Huang, J. Liu, Q. Zhu, R. Wang, G.Hu // BioMedical Engineering OnLine. – 2014. – V. 13. – № 1/90. – P. 26. DOI:10.1186/1475-925x-13-90.
8. **Zhang, Z.** Heartbeat classification using decision level fusion / Z. Zhang, X. Luo // Biomedical Engineering Letters. – 2014. – V. 4. – № 4. – P. 388-395. DOI:10.1007/s13534-014-0158-7.
9. **Zhang, Z.**, Heartbeat classification using disease-specific feature selection / Z. Zhang, J. Dong, X. Luo, K.-S. Choi, X. Wu. // Computers in Biology and Medicine. – 2014. – V. 46. – P. 79–89. DOI: 10.1016/j.compbimed.2013.11.019.
10. **Mar, T.** Optimization of ECG Classification by Means of Feature Selection / T. Mar, S. Zauneder, J.P. Martinez, M. Llamedo, R. Poll // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2011. – V. 58. – № 8. – P. 2168-2177. DOI:10.1109/tbme.2011.2113395.
11. **de Chazal, P.** Automatic classification of heartbeats using ECG morphology and heartbeat interval features / P. de Chazal, M. O'Dwyer, R.B. Reilly // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2004. – V. 51. – № 7. – P. 1196-1206.
12. **Chen, S.** Heartbeat classification using projected and dynamic features of ECG signal / S. Chen, W. Hua, Z. Li, J. Li, X. Gao // Biomedical Signal Processing and Control. – 2017. – Vol. 31. – P. 165-173. DOI:10.1016/j.bspc.2016.07.010.
13. **Llamedo, M.** Heartbeat Classification Using Feature Selection Driven by Database Generalization Criteria / M. Llamedo, J.P. Martínez // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2011. – V. 58. – № 3. – P. 616–625. DOI: 10.1109/tbme.2010.2068048.
14. **Lin, C.-C.** Heartbeat Classification Using Normalized RR Intervals and Morphological Features / C.-C. Lin, C.-M. Yang // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – P. 1-11. DOI: 10.1155/2014/712474.
15. **Bazi, Y.** Domain adaptation methods for ECG classification / Y. Bazi, N. Alajlan, H. AlHichri, S. Malek // 2013 International Conference on Computer Medical Applications (ICCM). – 2013. DOI: 10.1109/iccma.2013.6506156.
16. **Llamedo, M.** Analysis of Multidomain Features for ECG Classification / M. Llamedo, J.P. Martinez // Computers in Cardiology. – 2009. – V. 36. – P. 561-564.
17. **Can Ye, B.V.K.** Combining General Multi-class and Specific Two-class Classifiers for Improved Customized ECG Heartbeat Classification / B.V.K. Can Ye, V. Kumar, M. Travates Coimbra // 21st international Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), November 11-15. – 2012.
18. **de Lannoy, G.** Weighted Conditional Random Fields for Supervised Interpatient Heartbeat Classification / G. de Lannoy, D. Francois, J. Delbeke, M. Verleysen // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2012. – V. 59. – № 1. – P. 241-247. DOI: 10.1109/tbme.2011.2171037.

19. **Park, K.S.** Hierarchical support vector machine based heartbeat classification using higher order statistics and hermite basis function / K.S. Park, B. H. Cho, D.H. Lee, S.H. Song, J.S. Lee, Y.J. Chee, S.I. Kim // 2008 Computers in Cardiology. – 2008. DOI: 10.1109/cic.2008.4749019.
20. **de Lannoy, G.** Weighted SVMs and Feature Relevance Assessment in Supervised Heart Beat Classification / G. de Lannoy, D. François, J. Delbeke, M. Verleysen // Communications in Computer and Information Science – 2011. – P. 212-223. DOI: 10.1007/978-3-642-18472-7_17.
21. **Gersch, W.** Cardiac arrhythmia classification: A heart-beat interval-Markov chain approach / W. Gersch, D.M. Eddy, E. Dong // Computers and Biomedical Research. – 1970. – V. 3. – № 4. – P. 385-392. DOI: 10.1016/0010-4809(70)90043-1.
22. **Moody, G.B.** A new method for detecting atrial fibrillation using R-R-intervals / G.B. Moody, G. Mark Roger // Computers in cardiology. – 1983.
23. **Tateno, K.** Automatic detection of atrial fibrillation using the coefficient of variation and density histograms of RR and delta RR intervals / K. Tateno, L. Glass // Med. Biol. Eng. Comput. – 2001. – V. 39. – P. 664-671.
24. **Файнзилберг, Л.С.** Технология построения телемедицинской системы на основе генеративной модели порождения искусственной ЭКГ реалистической формы / Л.С. Файнзилберг // Клиническая информатика и телемедицина. – 2012. – Т. 8. – вып. 9. – С. 89-98.
25. **Cai, H.** Patient Identity Verification Based on Physiological Signal Fusion / H. Cai, K.K. Venkatasubramanian // In: 2017 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE). – IEEE, Philadelphia, PA. – 2017. – P. 90–95. DOI: 10.1109/CHASE.2017.65.
26. **Buldakova, T.I.** Data Protection During Remote Monitoring of Person's State / T.I. Buldakova, D.A. Krivosheeva // In: Dolinina O., Brovko A., Pechenkin V., Lvov A., Zhmud V., Kreinovich V. (eds) ICIT 2019: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer, Saratov, Russia. – 2019. – P. 3-14. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_1.
27. **Пермяков, С.А.** Информационная модель амплитудно-фазового сопряжения ЭКГ на основе статистического подхода / С.А. Пермяков, А.А. Кузнецов, Л.Т. Сушкова, В.В. Чепенко // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т.15. – No3. – С. 261-268.
28. **Barro, S.** Grammatic representation of beat sequences for fuzzy arrhythmia diagnosis / S. Barro, R. Ruiz, J. Presedo, J. Mira // International Journal of Bio-Medical Computing. – 1991. – V. 27. – №3–4. – P. 245-259. DOI:10.1016/0020-7101(91)90066-n.
29. **Uspenskiy, V.** Diagnostic System Based on the Information Analysis of Electrocardiogram. / V. Uspenskiy // In: Proceedings of MECO 2012. Advances and Challenges in Embedded Computing. Bar. – Montenegrin Association for New Technologies, Montenegro. – 2012. – P. 74-76.
30. **Цетлин, М.Л.** Прибор для регистрации и диагностики нарушения ритмической деятельности сердца / М.Л. Цетлин, С. Горохов, А.П. Матусова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, Горький. – 1961. – Т. 4. – № 1. – С. 165-172.
31. **Khalaydzhii, A.** Quality Research of the Interval Cetlin Method as a Component of the Cyber-Physical System of Continuous Monitoring of the Human-Operator State by ECG Signals / A. Khalaydzhii // In: Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M. (eds) Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham. – 2021. – V. 333. – P. 14. DOI: 10.1007/978-3-030-63563-3_20.
32. **Lin, Z.** A study on clustering analysis of arrhythmias / Z. Lin, Y. Ge, G. Tao. // Journal of biomedical engineering. – 2006. – V. 23. – № 5. – P. 999-1002.
33. **Bhoi, A.K.** Arrhythmia and ischemia classification and clustering using QRS-ST-T (QT) analysis of electrocardiogram / A.K. Bhoi, K.S. Sherpa, B. Khandelwal // Cluster Computing. – 2017. – V. 21. – № 1. – P. 1033-1044. DOI: 10.1007/s10586-017-0957-6.
34. **Зими́на, Е.Ю.** Кластерный анализ кардиологических данных / Е.Ю. Зими́на // Социальная статистика. – 2018. – Т. 15. – № 2.
35. **Merino, M.** Envelopment filter and K-means for the detection of QRS waveforms in electrocardiogram / M. Merino, I. M. Gómez, A. J. Molina // Medical Engineering & Physics. – 2015. – V. 37. – № 6. – P. 605-609. DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.03.019.
36. **Acar, B.** Automatic ectopic beat elimination in short-term heart rate variability measurement / B. Acar, I. Savelieva, H. Hemingway, M. Malik // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2000. – V. 63. – № 2. – P. 123-131. DOI: 10.1016/s0169-2607(00)00081-x.

37. **Mordehay, A.** Patient specific QRS complex classification for arrhythmia detection / A. Mordehay // Patent US9241650B2. – 2013.
38. **Yeh, Y.-C.** Analyzing ECG for cardiac arrhythmia using cluster analysis / Y.-C. Yeh, C. W. Chiou, H.-J. Lin // Expert Systems with Applications. – 2012. – V. 39. – № 1. – P. 1000-1010. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.07.101.
39. **Моторина, С.В.** Выбор метода кластеризации для алгоритма выявления мерцательной аритмии / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко, А.П. Немирко // Обработка и анализ биомедицинской информации. – 2015. – Т. 40. – №4.
40. **Yeh, Y.-C.** Analyzing ECG for cardiac arrhythmia using cluster analysis / Y.-C. Yeh, C. W. Chiou, H.-J. Lin // Expert Systems with Applications. – 2012. – V. 39. – № 1. – P. 1000-1010. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.07.101.
41. **Haldar, N. A. H.** Arrhythmia classification using Mahalanobis distance based improved Fuzzy C-Means clustering for mobile health monitoring systems / N.A.H. Haldar, F.A. Khan, A. Ali, H. Abbas // Neurocomputing. – 2017. – V. 220. – P. 221-235. DOI: 10.1016/j.neucom.2016.08.042.
42. **Ceylan, R.** A novel approach for classification of ECG arrhythmias: Type-2 fuzzy clustering neural network / R. Ceylan, Y. Özbay, B. Karlik // Expert Systems with Applications. – 2009. – V. 36. – № 3. – P. 6721-6726. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.08.028
43. **Korürek, M.** A new arrhythmia clustering technique based on Ant Colony Optimization / M. Korurek, A. Nizam // Journal of Biomedical Informatics. – 2008. – V. 41. – № 6. – P. 874-881. DOI: 10.1016/j.jbi.2008.01.014
44. **Zhu, B.** A Novel Automatic Detection System for ECG Arrhythmias Using Maximum Margin Clustering with Immune Evolutionary Algorithm / B. Zhu, Y. Ding, K. Hao // Computational and Mathematical Methods in Medicine. – 2013. – V. 1. – № 8. DOI: 10.1155/2013/453402
45. **Lagerholm, M.** Clustering ECG complexes using Hermite functions and self-organizing maps / M. Lagerholm, C. Peterson, G. Braccini, L. Edenbrandt, L. Sornmo // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2000. – V. 47. – № 7. – P. 838-848. DOI: 10.1109/10.846677.
46. **Özbay, Y.** Integration of type-2 fuzzy clustering and wavelet transform in a neural network based ECG classifier / Y. Ozbay, R. Ceylan, B. Karlik // Expert Systems with Applications. – 2011. – V. 38. – № 1. – P. 1004-1010. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.07.118.
47. **Менлитдинов, А.С.** Алгоритм анализа сердечных аритмий с использованием лингвистического и секвенционального анализа и алгоритма кластеризации COBWEB / А.С. Менлитдинов, М.А. Барков, А.В. Коробейников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013 – Т. 21. – № 1
48. **Wang, H.** Optimal k-means Clustering in One Dimension by Dynamic Programming Ckmeans.1d.dp / H. Wang, M. Song. // The R Journal. – 2011. – V. 3. – № 2. – P. 29-33. DOI: 10.32614/RJ-2011-015.
49. **Grönlund, A.** Fast Exact k-Means, k-Medians and Bregman Divergence Clustering in 1D / A. Grönlund, K.G. Larsen, A. Mathiasen, J.S. Nielsen, S. Schneider, M. Song // Computer Science, Mathematics. – ArXiv. – 2017. – V. abs/1701.07204. – P. 16.

*Дата поступления
в редакцию: 17.12.2020*

A.K. Khalaydzh¹, I.B. Muchnik²

METHODS OF CLASSIFICATION OF ARRHYTHMIAS BASED ON ENCODING SEQUENCES OF RR-INTERVALS OF ECG SIGNAL

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow

²Rutgers, The State University of New Jersey, New Jersey

Purpose: The paper proposes new method of classification of arrhythmias based on linguistic representation of the only feature from ECG signal – durations of RR-intervals

Design / methodology / approach: The paper analyzes the Cetlin method structure as the representative interval methods, that allows to encode RR-intervals in real-time mode and analyze them via rule-based system to classify arrhythmias. Also adaptive 1D clustering is used to posterior encode sequences of RR-intervals. Both of approaches are used to create linguistic feature representation of R-peak, that is further used to extend existing input feature space of the state-of-the-art classifier, based on the architecture of the ensemble of models on independent features sets.

Findings: The results show that models, which use proposed linguistic features, reach better jk-index values as for individuals models, as for a final ensemble classifier. The best ensemble received value jk-index equals to 0.807, that is the best achieved result compared to existing state-of-the-art methods, which are not based on neural networks but using explicit R-peak features and follow AAMI recommendations and inter-patient paradigm of division MIT-BIH records for representation of the results.

Research limitations/implications: The proposed method, as well as the obtained results, such as a state-of-the-art model and the methods of RR-intervals encoding, can be actively used in telemedicine monitoring and arrhythmia detection systems.

Originality/value: The value of the methods is the new approach of classifying main arrhythmias types based on AAMI classification, as well the interpretable set of features of R-peak and ECG signal for specialists, and the state-of-the-art ensemble model performance, comparing to known approaches, which don't use neural networks that use raw signal as an input in favor to explicit R-peaks features.

Key words: RR-intervals encoding, ECG signal, linguistic feature representation of R-peak, adaptive 1D clustering, SVM, ensemble, inter-patient, MIT-BIH, jk-index.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_54

А.А. Чесноков, И.А. Коновалов, А.А. Баринов, А.Е. Хробостов,
М.А. Легчанов, С.С. Бородин, М.А. Макаров

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПЕРЕНОСА ТРАССЕРА ЗА СЧЕТ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИФфуЗИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты серии экспериментов с целью определения влияния переноса трассера в потоке за счет молекулярной диффузии при исследованиях гидродинамики турбулентных потоков. Опыты проводились в модели квадратного сечения при использовании солевого трассера и кондуктометрической измерительной системы: пространственных кондуктометров сетчатой конструкции. Обработка экспериментальных данных позволила получить осредненные профили проводимости в измерительных плоскостях датчиков, построить картограммы распределения относительной концентрации трассера, а также получить относительные значения потока трассера через границу раздела двух спутных потоков. Данная методика позволяет получить соотношения переноса трассера в потоке за счет молекулярной и турбулентной диффузии.

Ключевые слова: гидродинамика, диффузия, пространственная кондуктометрия, процессы смешения потоков в ЯЭУ.

Введение

В атомной энергетике широко известны проблемы, возникающие в результате смешения потоков жидкости с различными плотностями. В качестве примера могут быть приведены термоциклические и вибрационные нагрузки конструкционных материалов, возникающие в трубопроводах первого контура реакторных установок (РУ) с водяным теплоносителем, а также при подаче борного раствора в теплоноситель первого контура [1]. При этом характеристики турбулентности, возникающей в результате смешения потоков, играют определяющую роль при формировании термоциклических нагрузок в элементах РУ.

На современном этапе развития атомного машиностроения для прогнозирования явлений турбулентности при проектировании РУ широко применяется вычислительная гидродинамика (Computational fluid dynamics, CFD). В то же время результаты численного эксперимента могут иметь значительный разброс, возникающий вследствие растущей сложности используемых моделей, очень чувствительных к неопределенным граничным условиям [2]. Таким образом, являясь современным инструментом для обоснования надежности энергетического оборудования, CFD-коды требуют валидации используемых физических моделей на широком спектре бенчмарков [3,4], что подчеркивает актуальность исследований, проводимых в НГТУ с использованием кондуктометрической измерительной системы [5].

В основе кондуктометрического метода, применяемого для исследования гидродинамики внутриреакторных потоков, лежит использование трассера, создающего градиент проводимости среды, в качестве которого используется незначительная концентрация раствора соли (NaCl или Na₂SO₄). Распространение трассера в потоке осуществляется за счет турбулентной и молекулярной диффузии, при этом влиянием последней обычно пренебрегают.

Таким образом, целью данной работы является экспериментальная оценка влияния переноса трассера за счет молекулярной диффузии на результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальный стенд

Общая схема стенда (рис. 1) предполагает организацию экспериментального режима с изотермическим смешением в разомкнутом контуре циркуляции (для исследований с использованием потоков с различной концентрацией примесей) и неизотермическим смешением при использовании потоков с различными температурами [6].

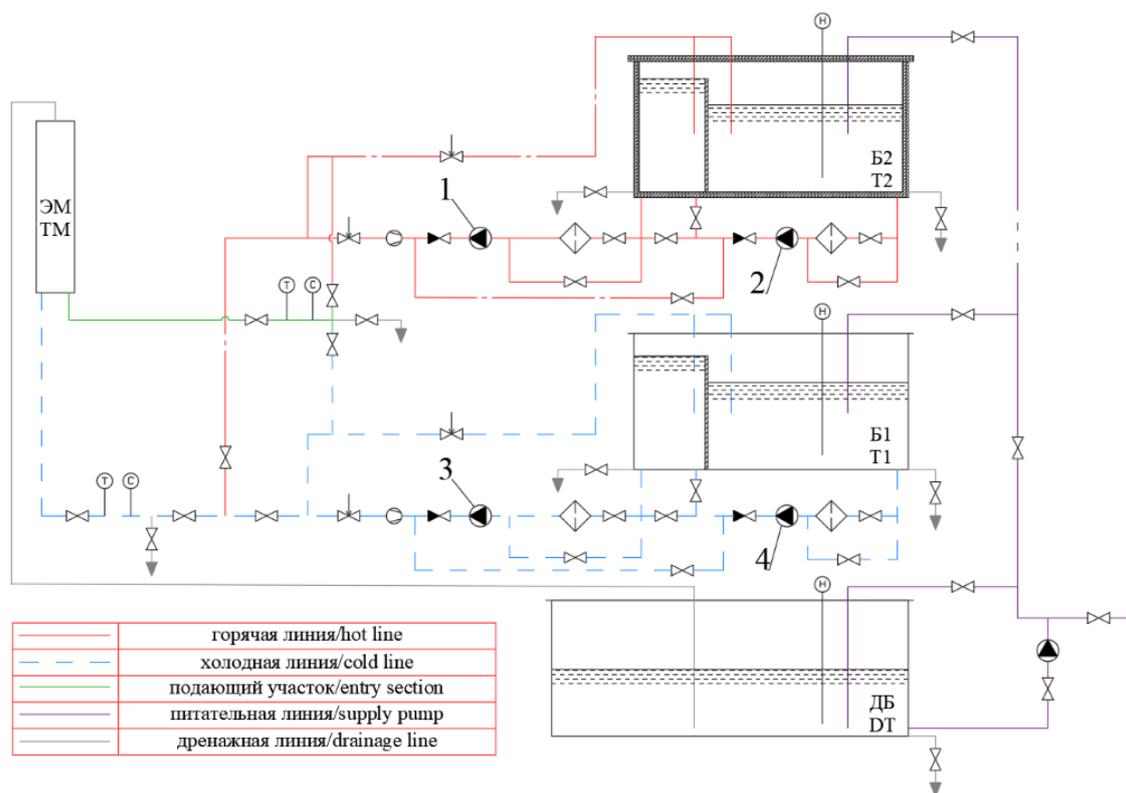


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда:

- 1 – циркуляционный насос горячей линии; 2 – подпиточный насос горячей линии;
 3 – циркуляционный насос холодной линии; 4 – подпиточный насос холодной линии;
 Б1 – холодный питательный бак; Б2 – горячий питательный бак; ДБ – дренажный бак;
 ЭМ – экспериментальная модель

Рабочая среда смешиваемых потоков подается подпиточными насосами (2 и 4) в зоны с постоянным уровнем, оттуда поступает на всас циркуляционных насосов (1 и 3). Данное решение позволяет обеспечить постоянное гидростатическое давление на входе в основные насосы, что служит одним из основных критериев поддержания стационарности процесса смешения. Далее среда прокачивается по подводящей трассе через экспериментальный участок и поступает в дренажный бак. Арматура подводящей трассы предполагает возможность поступления среды каждого бака как в верхний, так и в нижний патрубки модели, либо поступление среды из одного бака в оба патрубка.

Оборудование стенда позволяет создать как ламинарные, так и турбулентные режимы (при числах Re до $20 \cdot 10^3$) течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Основные характеристики стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Мощность нагревателей (суммарная), кВт	12
Расход через экспериментальную модель, м ³ /час	до 2,9
Температура смешиваемых потоков, °С	10-60

Измерительная система

Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, и исследовательской части, при помощи которой выполняются замеры физических характеристик в области турбулентного смешения потоков, разработанной совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ЛАД-36) [7]. Измерения проводились при помощи метода кондуктометрии с использованием двух последовательно установленных сетчатых кондуктометрических датчиков (СД) с разрешением 8×8 ячеек и шагом между центрами соседних ячеек 5 мм. Общий вид датчика представлен на рис. 2.

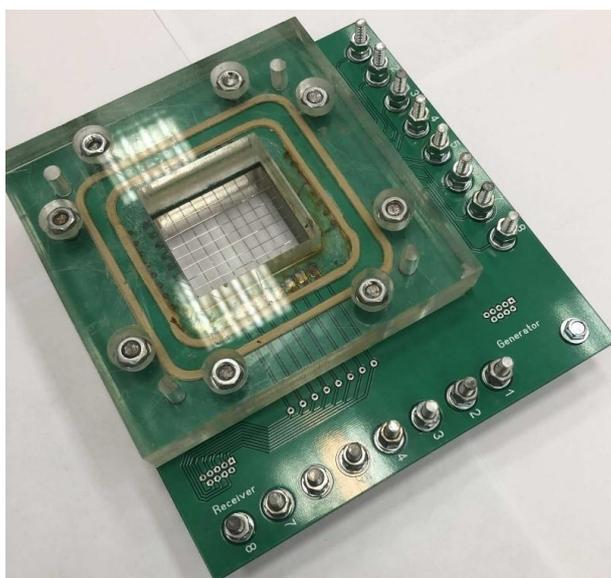


Рис. 2. Сетчатый кондуктометрический датчик

Выходной токовый сигнал измерительной системы пропорционален удельной электропроводности (УЭП), которая, в свою очередь, зависит от содержания в измерительных ячейках СД. Для исключения общих и систематических погрешностей при измерении УЭП перед проведением измерений проводилась тарировка ячеек СД. В качестве пассивной примеси, создающей градиент проводимости среды, регистрируемый измерительной системой, используется незначительная концентрация раствора соли.

Описание проводимых экспериментов

Для проведения исследований и изучения процессов смешения была использована экспериментальная модель квадратного сечения 50х50 мм (рис. 3). На входных участках установлены хонейкомбы, предназначенные для получения ровного профиля скорости на входе в модель без крупных вихрей. Раздельное движение потоков во входных участках осуществляется при помощи разделительной перегородки, за которой начинается зона сме-

шения спутных потоков. Геометрия экспериментальной модели выполнена аналогично использованной в международном эксперименте GEMIX [3].

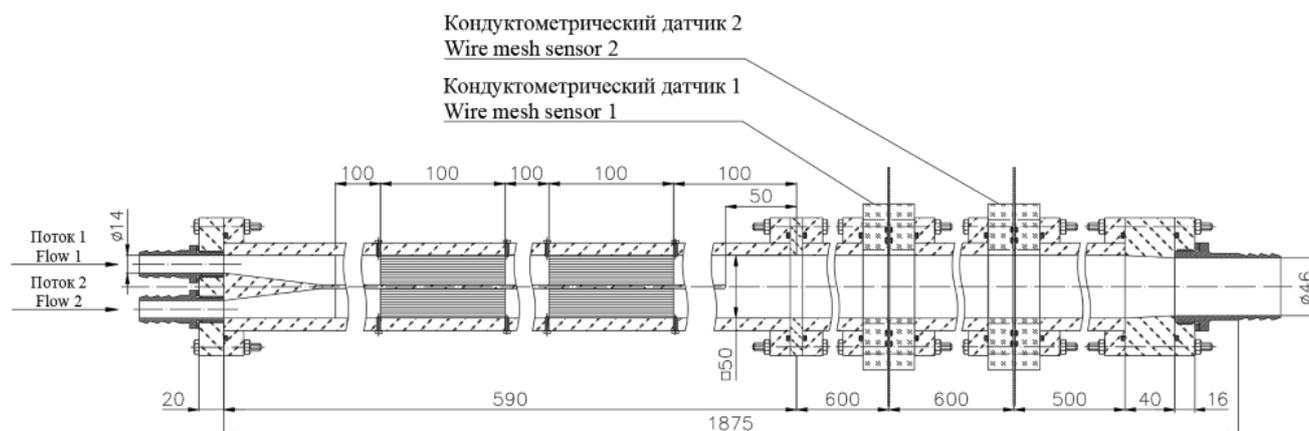


Рис. 3. Экспериментальная модель

Организация стратифицированных потоков в экспериментальной модели проводилась за счет использования расходомеров повышенной точности, для каждого из которых была проведена индивидуальная градуировка [8]. Для оценки величины потока трассера за счет молекулярной диффузии был организован ламинарный режим течения среды через экспериментальную модель ($Re \approx 10^3$), при котором отсутствует перенос трассера за счет турбулентных пульсаций (турбулентная диффузия). При этом сетчатые датчики устанавливались следующим образом: СД 1 на расстоянии 70 мм от входной кромки; СД 2 на расстоянии 640 мм от СД 1. Такая конфигурация (удаление от входной кромки) позволила избежать возникновения возмущений на СД 1 при отрыве потока от входной кромки. Измерения в случае ламинарного режима производились при параллельно работающих СД с задействованием лишь центральных ячеек. Турбулентный режим ($Re \approx 20 \cdot 10^3$) был использован для оценки вклада молекулярной диффузии трассера в показания СД при исследованиях гидродинамики турбулентных потоков. В этом случае регистрация показаний осуществлялась только первым датчиком (установленным на расстоянии 570 мм от входной кромки) с задействованием всех доступных ячеек.

Экспериментальные данные включают в себя режимные параметры и реализации УЭП кондуктометрического датчика. Параметры экспериментальных режимов приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры экспериментальных режимов

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Расход через экспериментальную модель, л/мин	УЭП, мкСм/см потоков		Длительность реализации, с
		Пресный поток	Соленый поток	
1	2,46	480,0	943,0	120
3	4,23	789,6	1005,0	120
20	32,88	814,0	1065,0	120

Методика обработки экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных принималось направление оси x вдоль потока. Начало отсчета ($x = 0$ мм) принималось для ламинарного режима на измерительной плоскости СД 1, для турбулентного режима – на входной кромке (рис. 4).

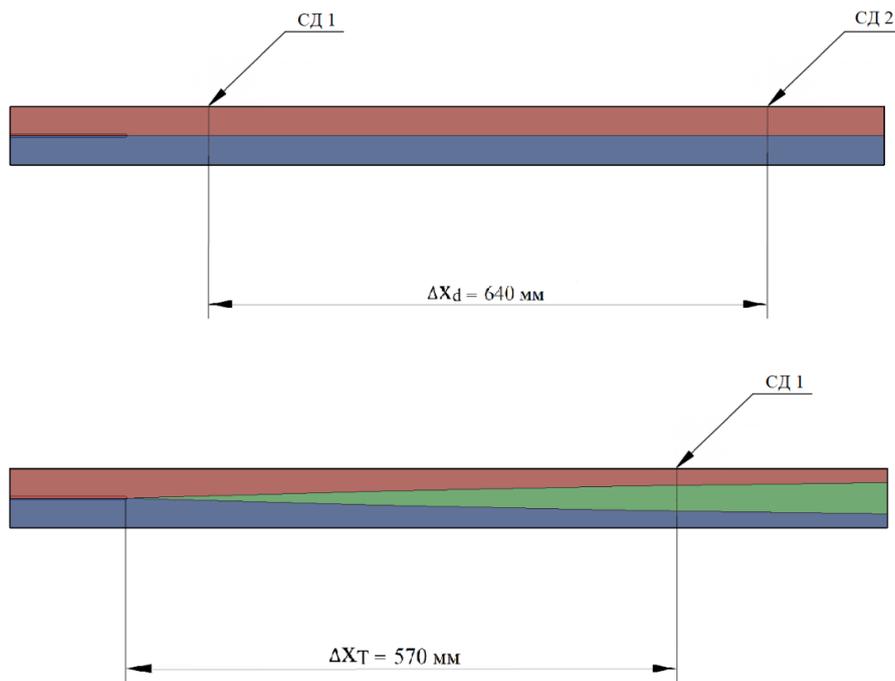


Рис. 4. Взаимное расположение сетчатых датчиков

Нормировка осредненных значений УЭП (для исключения общих систематических погрешностей и обеспечения сравнимости результатов) производилась в виде (1):

$$\phi = \frac{\lambda_{изм} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}, \quad (1)$$

где λ_{min} – удельная проводимость пресного потока (при $x = 0$), λ_{max} – удельная проводимость соленого потока солёного потока (при $x = 0$), $\lambda_{изм}$ – удельная проводимость, измеренная данной ячейкой кондуктометрического датчика.

Нормированные осредненные значения УЭП в измерительной плоскости СД 1 для турбулентного режима с $Re \cdot 10^3$ представлены на рис. 5.

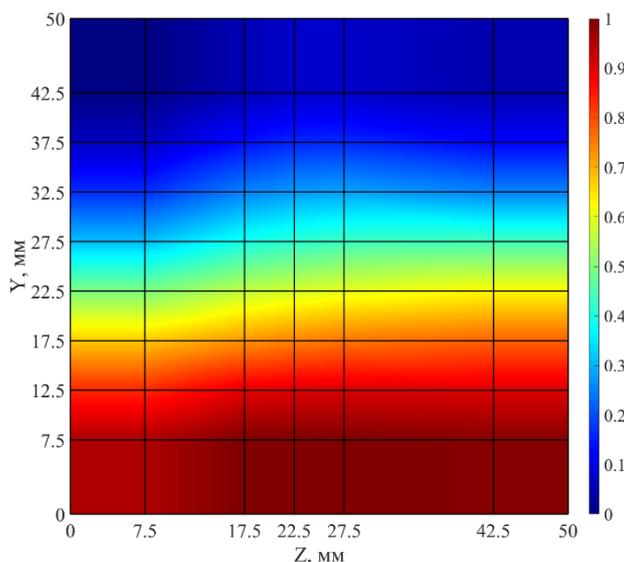


Рис. 5. Картограмма распределения осредненной нормированной УЭП в режиме с $Re \cdot 10^3$

Оценка величины потока трассера (в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) через границу раздела, пролегающую между приемниками с координатами $y = 22,5$ мм и $y = 27,5$ мм, производилась в соответствии с соотношением (2):

$$J = \frac{\Delta C}{S \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где ΔC – разность безразмерных концентраций в точках с координатами $x = 0$ и $x = \Delta x$; S – площадь контакта потоков, определяемая как $S = \Delta x \cdot b$, м^2 ; Δt – время прохождения расстояния Δx потоком, с.

Вклад молекулярной диффузии трассера в показания СД оценивался в соответствии с соотношением (3):

$$\chi = \frac{J_t}{J_l} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где J_t – поток трассера при турбулентном режиме, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; J_l – поток трассера при ламинарном режиме, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Анализ результатов

Обработка экспериментальных данных позволила получить профили осредненных нормированных значений проводимости в измерительных ячейках кондуктометрических датчиков (далее приводятся значения УЭП, осредненные по координатам $y = 22,5$ мм и $y = 27,5$ мм). График распределения проводимостей для режимов с $\text{Re } 10^3$ и $\text{Re } 20 \cdot 10^3$ приведен на рис. 6.

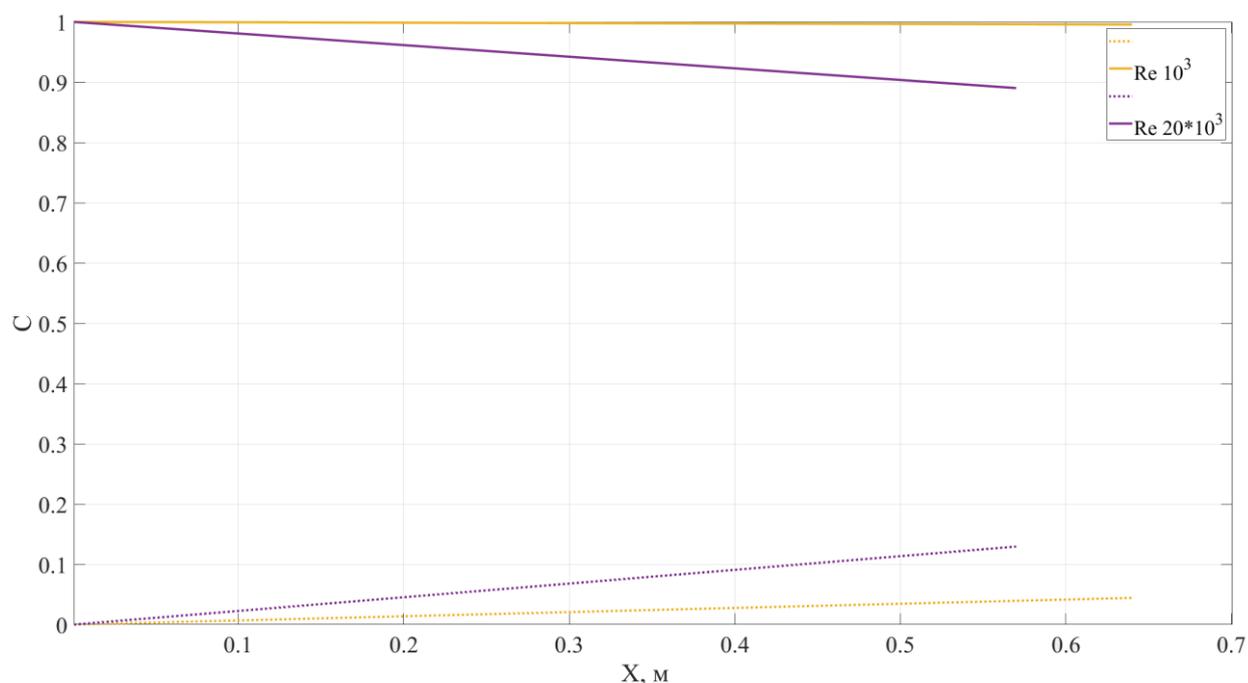


Рис. 6. График осредненной нормированной УЭП при ламинарном и турбулентном режимах: сплошная линия – УЭП соленого потока; пунктирная линия – УЭП пресного потока.

Очевидно, что с возрастанием числа Re происходит увеличение турбулентной составляющей диффузии, в то время как молекулярную диффузию можно принять равной константе (при сохранении температуры смешиваемых потоков). Вследствие этого, с ростом числа Re в высокорейнольдсовых режимах, представляющих наибольший интерес с точки зрения исследования внутриреакторных потоков, происходит значительное снижение вклада моле-

кулярной диффузии в распространение трассера. Полученные значения потоков трассера, а также вклад молекулярной составляющей диффузии, сведены в табл. 3.

Таблица 3.

Сводная таблица результатов

Параметр	Re · 10 ⁻³		
	1	10	20
Поток трассера, м ⁻² · с ⁻¹	0,04	1,54	1,75
Вклад молекулярной диффузии в перенос трассера, %	100,00	2,60	2,03

На основании данных видна экспоненциально убывающая зависимость вклада молекулярной диффузии в показания сетчатых датчиков от числа Рейнольдса.

Заключение

По результатам проведенной серии экспериментов вклад молекулярной диффузии в результаты исследований высокорейнольдсовых внутриреакторных потоков с применением матричной кондуктометрической системы не превышает 3 %. Представленная методика обработки экспериментальных данных позволила получить осредненные нормированные поля удельной проводимости, построить картограммы распределения концентрации, а также получить соотношения вклада молекулярной и турбулентной диффузии в перенос пассивной скалярной примеси при использовании трассерного метода измерения.

Библиографический список

1. **Krpan, R.** Simulation of Turbulent Wake at Mixing of Two Confident Horizontal Flows / R. Krpan, B. Koncar // Hindawi, Science and Techonology of Nuclear Installations, 2018.
2. **Badillo, A.** The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, NURETH-15 / A. Badillo, R. Kapulla, B. Niceno // Uncertainty quantification in CFD simulations of isokinetic turbulent mixing layers. Pisa. 2013.
3. **Fokken, J.** NEA Benchmark Exercise: Computational Fluid Dynamic Prediction and Uncertainty Quantification of a GEMIX Mixing Layer Test / J. Fokken, B. Krohn, R. Kapulla, B. Niceno, H.M. Prasser, A. Badillo // Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations, JT03442730, 2019.
4. **Rohde, U.** The European project FLOMIX-R: Description of the slug mixing and buoyancy related experiments at the different test facilities (Final report on WP 2) / U. Rohde, S. Kleim, B. Hemstrom, T. Toppila, Y. Bezrukov // Rossendorf, ISSN 1437-322X, 2005.
5. **Баринов, А.А.** Внедрение метода пространственной кондуктометрии для экспериментального изучения процессов смешения внутриреакторных потоков в современных ЯЭУ / А.А. Баринов, В. Варенцов, В.Г. Главный, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, А.В. Рязанов, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Vol. 117. – No. 2. – 2017. – P. 35-41.
6. **Konovvalov, I.A.** Application of the Correlation Velocity Measurements for Hydrodynamic Investigations of Turbulent Coolant Flow in Nuclear Reactor Elements / I.A. Konovvalov, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.A. Barinov, A.V. Ryazanov, A.A. Chesnokov, M.A. Makarov // Devices and Methods of Measurements. – Vol. 3, – No. 11. – 2020. – P. 196-203.
7. **Баринов, А.А.** Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, В.Г. Главный // Приборы и методы измерений. – Vol. 7. – No. 3. – 2016. – P. 247-356.
8. **Коновалов, А.** Разработка методики повышения точности обработки показаний первичных преобразователей расходомерных устройств / А. Коновалов, А.А. Баринов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров, С.В. Исаева // Молодой ученый, Vol. 40, No. 330, 2020. pp. 21-28.

*Дата поступления
в редакцию: 01.12.2020.*

**A.A. Chesnokov, I.A. Konovalov A.A. Barinov, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov,
S.S. Borodin, M.A. Makarov**

**ON THE ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF TRANSFER OF TRACER DUE TO
MOLECULAR DIFFUSION IN INVESTIGATIONS OF TURBULENT INTRA-REACTOR
FLOWS WITH THE APPLICATION OF A CONDUCTOMETRIC MEASURING SYSTEM**

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Estimation of influence of transfer of tracer due to molecular diffusion in turbulent flows.

Method of work: To work out the methodology for estimation of distortion of results of experiments, carrying out with conductometric measurement system, a series of experiments were carried out using a mesh conductometric sensor.

Findings: The influence of molecular diffusion in all experiments with high Reynolds were less than 3 %.

Conclusions: The method for processing experimental data presented in this work made it possible to obtain averaged normalized fields of specific conductivity, to construct cartograms of the concentration distribution, and to obtain the ratios of the contribution of molecular and turbulent diffusion to the transfer of a passive scalar tracer using the tracer measurement method.

Key words: hydrodynamics, spatial conductometry, diffusion, flow mixing processes in nuclear power plants.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_62

В.В. Беляков, А.В. Тумасов, Д.А. Бутин, А.С. Вашурин

АДЕКВАТНОСТЬ УПРАВЛЯЕМОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты оценки адекватности имитационной модели легкого коммерческого автомобиля ГАЗ «ГАЗель NEXT», подтверждаемой сравнением результатов полигонных и расчетных исследований управляемости. Модель создана в программном пакете *MSC ADAMS/Car*. Для оценки использовалось сопоставление данных, полученных экспериментальным и расчетным путем. Испытание проводилось по методике «Fishhook» («Рыболовный крючок»), используемой *NHTS* для оценки устойчивости автомобилей. Погрешность результатов измерялась относительным и абсолютным значениями. При анализе отклонений бокового ускорения и скорости рыскания использовались средства математической статистики: среднее отклонение, дисперсия, среднеквадратичное отклонение. Незначительные отклонения и разброс свидетельствуют об адекватности имитационной модели и возможности ее использования для моделирования процессов криволинейного движения легких коммерческих автомобилей, а также оценки их управляемости и устойчивости.

Ключевые слова: имитационное моделирование, математическая модель, адекватность, верификация, легкий коммерческий автомобиль, управляемость, адекватность, точность.

Модели используются для частного исследования системы или для проверки ее реакции на внесение определенных изменений; они бывают различных типов: физические, аналоговые, математические. В технических науках популярны имитационные модели: логико-алгоритмическое описание поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность возникающих событий. Проверку адекватности модели необходимо проводить для оценки степени ее подобия, доказательство возможно только в результате сравнения расчетных и опытных данных [1]. Оценка адекватности на одном эксперименте не гарантирует ту же точность при других исследованиях или после внесения изменений, но дает косвенное представление о точности модели при подобных исследованиях. Таким образом, адекватность модели гарантирована в области в пространстве параметров, где погрешности модели остаются в допустимых пределах. Для подтверждения адекватности оценивается совпадение реакций модели с моделируемым объектом. При оценке реакций используют средние значения откликов и дисперсию отклонений откликов. Модель характеризуется областью адекватности – совокупностью ситуаций, в которых она адекватна. Точность модели характеризует рассогласованность соответствующего параметра модели и исследуемого объекта.

Объектом исследования и моделирования является автомобиль ГАЗ «ГАЗель NEXT» (модель А21R22 с полной массой 3 500 кг, с распределением между осями 1325 / 2175 кг). В снаряженном состоянии масса автомобиля равна 2 040 кг. Колесная база модели составляет 3145 мм, ширина колеи передней оси 1 750 мм, ширина колеи задней оси 1 560 мм. Шины: Cordiant Business 185/65R16С. Передняя подвеска – независимая на двойных поперечных рычагах со стабилизатором поперечной устойчивости. Задняя подвеска – зависимая на полуэллиптических рессорах с подрессорниками и стабилизатором поперечной устойчивости, оборудована телескопическими масляными амортизаторами. Трансмиссия – механическая с

пятиступенчатой коробкой передач; привод на заднюю ось; дифференциал открытого типа; рулевое управление реечного типа.

Моделирование автомобиля осуществлялось в объектно-ориентированном программном пакете *MSC ADAMS Car*. Имитационная модель имеет подвижность по всем шести степеням свободы. В ней учитываются массо-инерционные характеристики подрессоренной и неподрессоренной массы, кинематика и эластокинематика подвески и рулевого управления, а также упругие и демпфирующие элементы. Модель шины создавалась на основании теории *Pacejca H.B.*, она учитывает вертикальную жесткость и демпфирование. Жесткость увода зависит от вертикальной нагрузки, продольного коэффициента скольжения и поперечного угла наклона шины относительно опорной поверхности. Характеристики шины исследовались при помощи дорожной лаборатории *Skid-trailer*. На данный момент такая методика исследования шин позволяет получить наиболее адекватные результаты за счет того, что контакт шины осуществляется с настоящим асфальтовым полотном. Осевые моменты инерции автомобиля относительно центра тяжести можно определить расчетно-аналитически, представив конструкцию транспортного средства как совокупность отдельных элементов: колеса, оси, кабина, рама, кузов, груз и др. Момент инерции отдельных элементов рассчитывался с помощью подробной CAD-модели.

Методика проведения и результаты полигонных испытаний исследуемого автомобиля представлена в [2-6]. Для изучения управляемости и реакций объекта исследования использовалось испытание «Fishhook» («Рыболовный крючок»), используемое *NHTSA* [7] при исследовании динамической устойчивости автомобиля к опрокидыванию. Для проведения этого испытания используется рулевой робот. Автоматизация при исследовании автомобиля значительно повышает достоверность и повторяемость результатов. Адекватность модели оценивалось по результатам одного заезда. Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы». Во время проведения испытаний фиксировались следующие параметры: угол поворота рулевого колеса, продольная скорость движения автомобиля, скорость рыскания, поперечное и продольное ускорение, а также перемещение центра тяжести в плоскости дороги. Для наглядности сравнения результатов полигонных испытаний и результатов расчета на рисунках изображены совмещенные графики. Результаты полигонных испытаний и моделирования совмещались во временной области по общей точке начала поворота рулевого колеса. Для анализа адекватности использовались относительные и абсолютные отклонения. Среднее относительно отклонения результатов расчета от эксперимента рассчитывалось (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{\text{эксперимент}}^i - X_{\text{расчет}}^i}{X_{\text{эксперимент}}^i} \right) \quad (1)$$

На рис. 1 представлены графики углов поворота рулевого колеса при эксперименте и моделировании, при котором использовалась зависимость поворота рулевого колеса из результатов полигонных исследований, поэтому графики не различаются. Поскольку у управляющей аппаратуры имеется определенная инертность, действительный процесс управления несколько отличается от заданного теоретического. Эта разница в управлении могла привести к очень большим различиям между результатами эксперимента и моделирования. В модели необходимо было учесть особенности приводов управляющих органов. Чтобы не усложнять модель, в качестве управляющего сигнала использовались регистрируемые при эксперименте данные. Таким образом, в модели учитывались особенности управляющих механизмов.

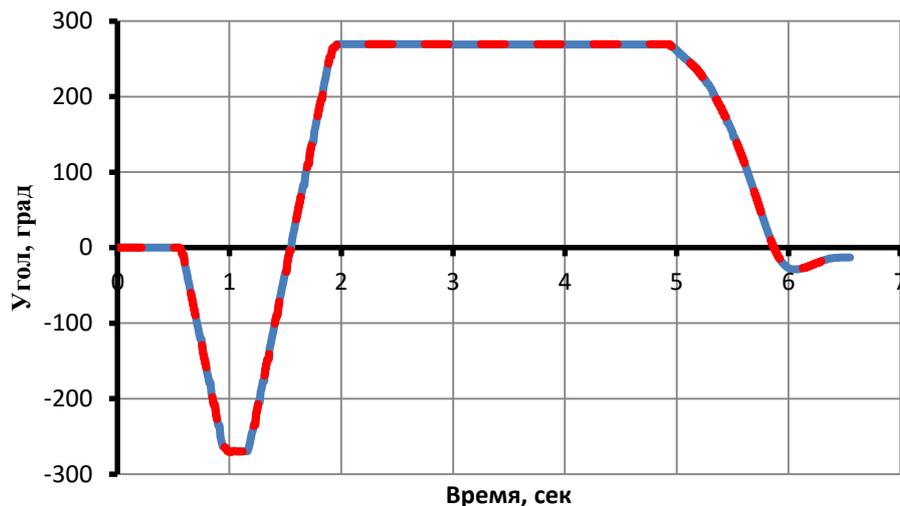


Рис. 1. Угол поворота рулевого колеса

— полигонные исследования, - - - моделирование

Скорость движения автомобиля во время эксперимента измерялась при помощи системы глобального позиционирования GPS с частотой 100 Гц. Она оказывает сильное влияние на реакцию автомобиля к повороту рулевого колеса. Можно сказать, что погрешность продольной скорости движения предопределяет точность всех других параметров, по которым оценивается погрешность управляемости модели. На рис. 2 представлены графики продольной скорости движения при эксперименте и моделировании.

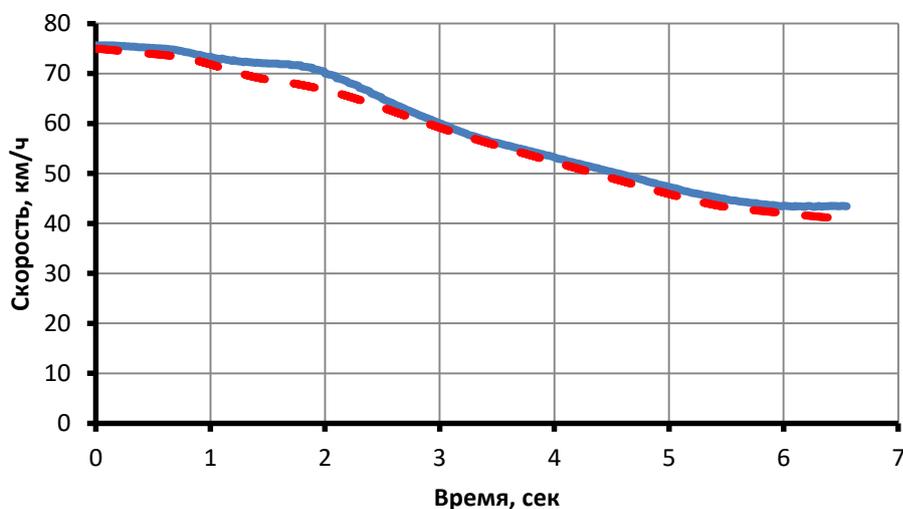


Рис. 2. Продольная скорость движения

— полигонные исследования, - - - моделирование

Видно, что скорость движения при моделировании меньше, чем при эксперименте. Среднее отклонение продольной скорости движения модели 1,6 км/ч. Максимальное отклонение скорости движения 3,87 км/ч. Среднее относительное отклонение скорости модели 3 %, но не более 6 %. На рис. 3 представлены графики скорости рыскания. Она является одним из важных показателей оценки управляемости автомобиля: по ней можно судить об управляемости и поворачиваемости автомобиля, оценивать устойчивость управляемости.

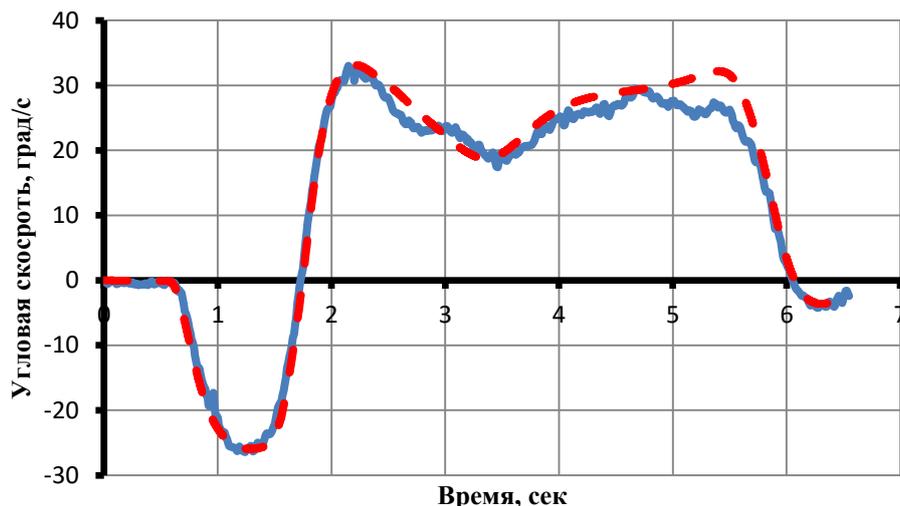


Рис. 3. Скорость рыскания

— полигонные исследования, - - - моделирование

Среднее относительное отклонение скорости рыскания 6 %. Разница скоростей рыскания при моделировании и испытании непостоянна, ее можно представить в виде распределения (рис. 4). Из гистограммы видно, что распределение отклонений имеет нормальное распределение. Абсолютное среднее отклонение скоростей рыскания $-1,0234$ рад/с. Дисперсия разницы отклонения скорости рыскания $D=4,464$ мм²/с⁴, среднее квадратичное отклонение $\sigma=2,11$ мм/с². Максимальное отклонение скорости рыскания 7,05 град/с.

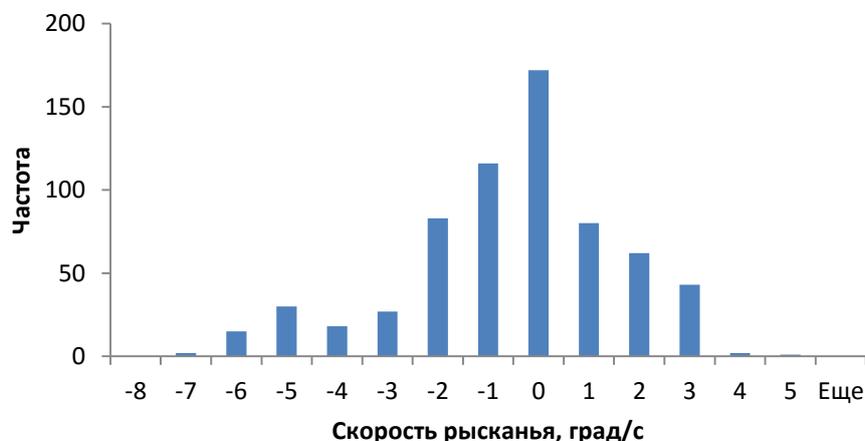


Рис. 4. Распределение отклонений скорости рыскания

На рис. 5 представлены графики бокового ускорения. Максимальное боковое ускорение, развиваемое автомобилем, важно с точки зрения активной безопасности. Фактически этот параметр обозначает максимально возможную динамику ухода транспортного средства от столкновения. Из графиков видно, что боковое ускорение при моделировании меньше, чем при эксперименте.

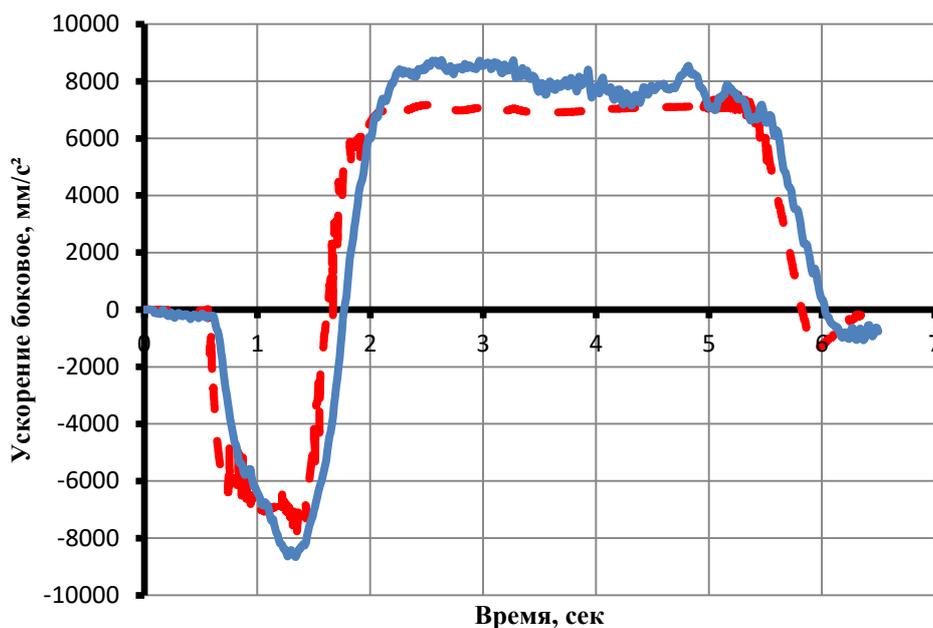


Рис. 5. Боковое ускорение

— полигонные исследования, - - - моделирование

Среднее относительное отклонение боковых ускорений 7 %. Разницу боковых ускорений можно представить в виде распределения рис. 6. Среднее отклонение боковых ускорений 391,92 мм/с². Дисперсия отклонений бокового ускорения $D = 2483002$ мм²/с⁴, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 1575,7$ мм/с². Максимальное отклонение бокового ускорения 5814 мм/с².

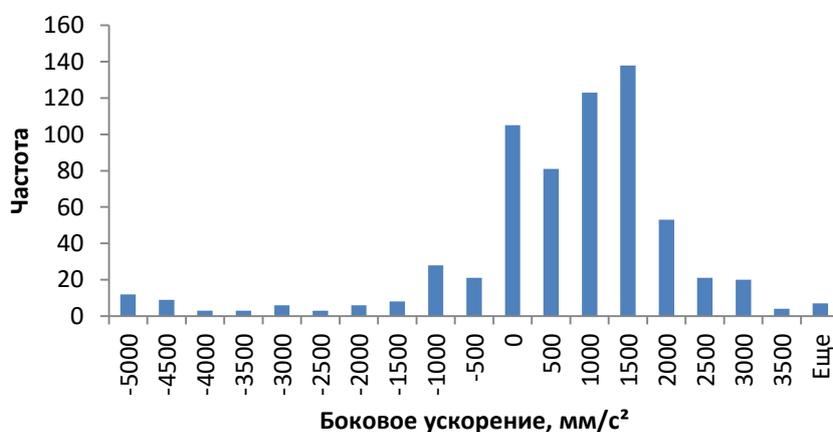


Рис. 6. Распределение отклонений боковых ускорений

Из-за проведения исследований в различных системах координат для расчета погрешности траекторий требуются некоторые преобразования для их совмещения. Для совмещения траекторий они перемещались и поворачивались таким образом, чтобы начальные условия движения совпадали. Прямолинейное движение автомобиля в начале испытания принимается за общую ось, а время начала поворота рулевого колеса определяет общую точку траекторий. Совмещенные траектории движения центра тяжести автомобиля на полигонных исследованиях и при имитационном моделировании представлены на рис. 7.

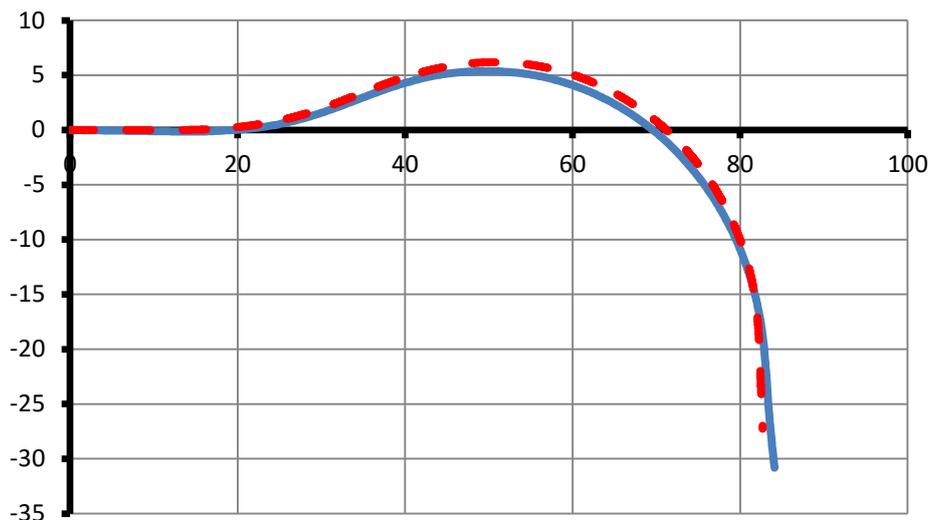


Рис. 7. Траектории движения ЦТ

— полигонные исследования, - - - моделирование

Разница траекторий – это расстояние между положением центров тяжести модели и реального автомобиля во время испытания в одинаковый момент времени, рассчитываемое по формуле (2):

$$\Delta^t = \sqrt{(X_{\text{расчет}}^t - X_{\text{эксперимент}}^t)^2 + (Y_{\text{расчет}}^t - Y_{\text{эксперимент}}^t)^2} \quad (2)$$

Зависимость изменения расстояния между центрами тяжести от времени представлена в виде графика на рис. 8.

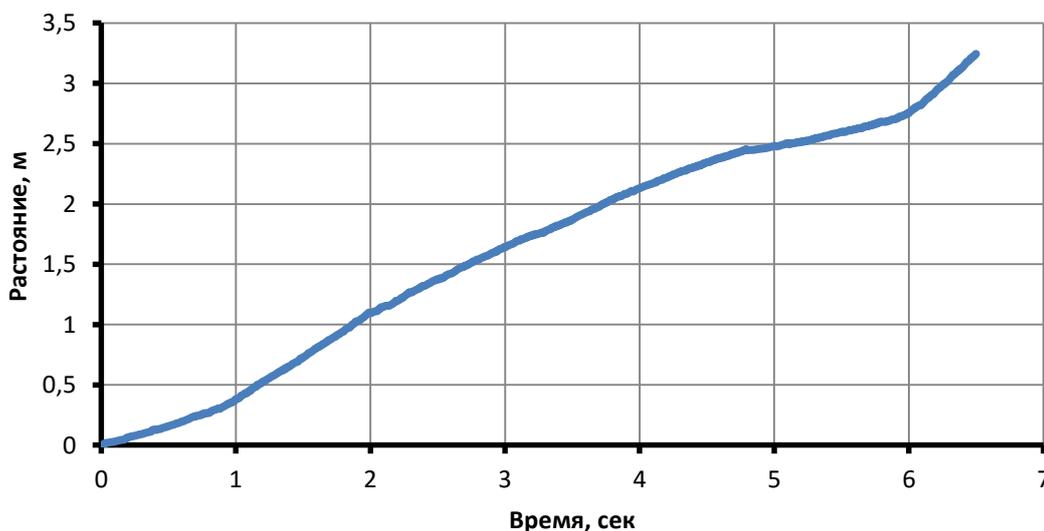


Рис. 8. Отклонение траекторий

Максимальное отклонение траекторий в конце испытания составило 3,24 м, при этом общий пройденный путь во время испытания равен 106,93 м. Относительное отклонение траектории от пути составляет 3 % или 0,03 м/м.

Выводы

Выполнена проверка адекватности имитационной математической модели путем сравнения результатов натурального эксперимента и моделирования. Адекватность и точность модели оценивалась по результатам испытания «Fishhook». Оценка проводилась по параметрам, характеризующим управляемость и устойчивость движения: продольная скорость движения, скорость рыскания, боковое ускорение, траектория движения. Сравнение результатов эксперимента и имитационного моделирования доказывает адекватность модели. Расхождение результатов и отклонение средних значений не превышает 10 %. Абсолютное отклонение продольной скорости движения не превысило 6 %, а траектории – 3 %. Среднее значение отклонений: бокового ускорения 7 %, скорости рыскания 6 %. Среднее отклонение скорости рыскания $-1,0234$ град/с, а бокового ускорения $-391,92$ мм/с². Среднеквадратическое отклонение скорости рыскания $2,11$ мм/с², а бокового ускорения $-1575,7$ мм/с². Небольшие отклонения и разброс свидетельствуют об адекватности имитационной модели и возможности ее использования для моделирования процессов криволинейного движения легких коммерческих автомобилей, оценки их свойств управляемости и устойчивости.

Библиографический список

1. **Скотников, Г.И.** Проверка адекватности математической модели криволинейного движения автотрассы / Г.И. Скотников // Известия вузов. Машиностроение. – 2016. – №8 (677). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proverka-adekvatnosti-matematicheskoy-modeli-krivolineynogo-dvizheniya-avtopoezda> (дата обращения: 03.12.2020).
2. **Торопов, Е.И.** Проведение натурных испытаний для отладки программно-аппаратного комплекса для оценки управляемости легких коммерческих автомобилей, оснащенных системами электронными контроля устойчивости. Особенности выполнения маневров на сухом и влажном асфальте / Е.И. Торопов, Ю.П. Трусов, П.С. Мошков, А.А. Аникин, А.С. Вашурин, Ю.И. Палутин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №4 (119). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/provedenie-naturnyh-ispytaniy-dlya-otladki-programmno-apparatnogo-kompleksa-dlya-otsenki-upravlyaemosti-legkih-kommercheskih> (дата обращения: 30.11.2020).
3. **Вашурин, А.С.** Исследование влияния электронной системы динамической стабилизации легкого коммерческого автомобиля на безопасность криволинейного движения / А.С. Вашурин, П.С. Мошков, Ю.П. Трусов, Е.И. Торопов, А.В. Тумасов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-4. – С. 665-670; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39601> (дата обращения: 30.11.2020).
4. **Groshev, A.** Estimation of light commercial vehicles dynamics by means of HIL-testbench simulation / A. Groshev, A. Tumasov, E. Toropov, P. Sereda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – №315(1). – 2018. – DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012010.
5. **Tumasov, A.** Estimation of Influence of ESP on LCV / A. Tumasov, A. Vashurin, E. Toropov, Yu. Trusov, P. Moshkov // Active Safety in Condition of Curvilinear Movement. 118-123. DOI:10.5220/0005894401180123. 2016.
6. **Торопов, Е.И.** Верификация методики виртуально-физических исследований динамики криволинейного движения автомобилей по результатам дорожных испытаний / Е.И. Торопов, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.А. Васильев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №2 (125). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-metodiki-virtualno-fizicheskikh-issledovaniy-dinamiki-krivolinei-nogo-dvizheniya-avtomobilei-po-rezultatam-dorozhnyh> (дата обращения: 30.11.2020).
7. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Electronic Stability Control Systems; Controls and Displays // National Highway Traffic Safety Administration URL: <https://www.nhtsa.gov/fmvss/federal-motor-vehicle-safety-standards-electronic-stability-control-systems-0> (дата обращения: 03.12.2020).

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2021*

V.V. Belyakov, A.V. Tumasov, D.A. Butin, A.S. Vashurin

ADEQUACY SIMULATION MODEL OF A LIGHT COMMERCIAL CAR

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

The article presents the results of assessing the adequacy of the simulation model of the light commercial vehicle GAZ GAZelle NEXT. The adequacy of the model is confirmed by comparing the results of polygon and calculated controllability studies. The model was created in the MSC ADAMS / Car software package. It takes into account the mass-inertial characteristics of the sprung and unsprung masses, the suspension model takes into account the kinematics and elasto-kinematics of the suspension and steering, as well as stiffness and damping elements. The tire model takes into account the vertical stiffness and damping, the slip stiffness depends on the vertical load, the longitudinal slip coefficient and the lateral angle of inclination of the tire relative to the ground. The assessment was carried out by comparing the data obtained experimentally and by calculation. The test was conducted using the "Fishhook" method used by NHTS to assess vehicle stability. To estimate the error of the results, relative and absolute measurements of the error were used. When analyzing the lateral acceleration and yaw rate deviations, the means of mathematical statistics were used: mean deviation, variance, standard deviation. The discrepancy between the results and the deviation of the mean values does not exceed - 10%. Small deviations and scatter indicate the adequacy of the simulation model and the possibility of its use for modeling the curvilinear motion of light commercial vehicles and assessing their properties of handling and stability.

Key words: simulation, mathematical model, adequacy, verification, light commercial vehicle, LCV, handling, adequacy, accuracy.

П.Н. Ненашев¹, С.В. Абдулов¹, А.И. Тараторкин²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДА ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ АМФИБИЙНОЙ МАШИНЫ

¹Акционерное общество «Специальное конструкторское бюро машиностроения»
Курган, Россия

²Институт машиноведения Уральского Отделения РАН
Екатеринбург, Россия

Исследуется процесс динамического нагружения привода водометного движителя (ПВД) быстроходных гусеничных амфибийных машин (БГАМ). Представлена экспериментальная оценка динамического нагружения привода водометных движителей. Применительно к объекту исследования на основе анализа амплитудно-частотной характеристики динамического момента установлено, что резонансные режимы возникают вследствие периодического изменения параметров системы, определяемых кинематикой асинхронных шарниров карданных передач. Основной причиной ограничения долговечности элементов конструкции ПВД является отсутствие учета динамических составляющих момента при возбуждении резонансных колебаний. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методики проектного расчета приводов водометных движителей.

Ключевые слова: амфибийная машина, эксперимент, водомет, движитель, динамика, резонанс, динамическая нагруженность, привод, колебания динамического момента.

Введение

Одним из основных свойств быстроходных гусеничных амфибийных машин (БГАМ) является способность преодолевать водные преграды без предварительной подготовки. При этом, в случае отказа на плаву привода водоходного движителя (ПВД), БГАМ полностью теряет подвижность – одно из основных свойств быстроходных гусеничных машин. В связи с этим, требования по уровню надежности, предъявляемые к элементам конструкции ПВД, очень высоки. Для обеспечения движения на плаву в конструкциях амфибийных машин используются различные типы движителей. В качестве водоходного движителя могут применяться как сухопутные движители (колесный, гусеничный, роторно-винтовой), так и специализированные – гребные винты, водометы. С целью обеспечения скоростных свойств, энергоэффективности и надежности БГАМ конструкция водоходных движителей и их приводов непрерывно совершенствуются. Однако опыт эксплуатации серийных и результаты экспериментальных исследований опытных образцов изделий БГАМ свидетельствуют, что до 85 % поломок водометных движителей приходится на элементы конструкции их приводов (рис. 1). По результатам проектного расчета ПВД объекта исследования – плавающей гусеничной машины установлено, что запас прочности элементов конструкции составляет 3...4. Из опыта доводки опытных образцов машины следует, что долговечность элементов ПВД ограничена и не превышает 20 % требуемого ресурса. В работе выдвигается гипотеза, что это происходит вследствие возникновения колебательных процессов в динамической системе, не учитываемых при проектном расчете. Соответственно, целью является экспериментальное исследование динамической нагруженности ПВД быстроходных гусеничных амфибийных машин.

Методы проектного расчета БГАМ основаны на исследованиях А.П. Степанова [1], которые в свою очередь, базируются на теории корабля Я.И. Войткунского [2]. Водоходные движители были достаточно подробно рассмотрены А.А. Русецким [3], А.Н. Папиром [4],

С.В. Куликовым [5]. В их работах рассмотрена струйная теория водометных движителей и предложены методы определения оптимальных параметров элементов конструкции проектируемых машин. При известных методах проектного расчета номинальные размеры деталей приводов определяются из условия обеспечения прочности и долговечности в зависимости от нагрузок, рассчитываемых с учетом коэффициента динамичности [6], без учета высокочастотных составляющих динамического процесса. Это приводит к ограничению ресурса элементов ПВД. Таким образом, обзор известных методик проектного расчета показал, что при проектировании оценке особенностей динамического нагружения ПВД не уделяется требуемого внимания.



Рис. 1. Разрушения элементов привода водометных движителей:

*а), б) рабочего колеса водомета; в) шипа крестовины карданного вала
г), д) опор креплений элементов привода; е) проушины крепления углового редуктора;
ж) крестовины карданного вала; з) резьбового соединения креплений опор элементов привода*

Помимо этого, экспериментальными исследованиями опытных образцов БГАМ установлено, что высокий уровень виброн нагруженности приводит к ослаблению болтовых соединений крепления опор элементов конструкции привода с последующим их разрушением. Анализ исследований показал [7-11], что ослабление болтовых соединений происходит вследствие уменьшения коэффициента трения в резьбовом соединении при высокочастотных вибрациях, что приводит к уменьшению трения в резьбе, а в отдельных случаях – к полной потери самоторможения [12,13]. Болтовое соединение предполагает предварительный натяг, гарантирующий передачу усилия между соединяемыми элементами. Тем не менее, в болтовых соединениях часто наблюдается самоослабление, что может привести к снижению работоспособности конструкции [14,15]. Исследованию виброн нагруженности ТС посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В работах В.Б. Держанского и И.А. Тараторкина [16,17] рассматривается виброн нагруженность дотрансформаторной зоны трансмиссии. Устранение крутильных колебаний в трансмиссии автомобиля исследовано в трудах И.Т. Воробьева [18]. Ф.Р. Геккером составлена методика определения оптимального момента трения демпфера трансмиссий автомобиля [19], А.И. Гришкевич, А.С. Литвинов, Й. Раймпель, М.С. Высоцкий и др. подробно описывают каждый агрегат, приводит анализ и расчет отдельных систем [20-24]. Однако применительно к динамическому нагружению ПВД необходимо проведение дополнительных исследований.

Таким образом, проблема прогнозирования динамической нагруженности ПВД на этапе проектирования и установлении его амплитудно-частотных характеристик, а также исключение возможных последствий по ограничению долговечности, в совокупности с особенностями работы болтовых соединений, является актуальной.

Объект и условия экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования динамической нагруженности ПВД выполнены при ходовых испытаниях многоцелевого плавающего транспортера массой 13,2 т, оснащенного дизельным двигателем и гидромеханической трансмиссией. На машине установлены два водометных движителя, размещенных на днище вдоль правого и левого бортов корпуса. Привод ПВД включает в себя угловые редукторы и карданные передачи.

Испытания образца на плаву проводились в соответствии с основными положениями типовой методики испытаний, плавающих гусеничных и колесных машин на следующих режимах: работа привода водометных движителей на фиксированных частотах вращения двигателя; вход-выход образца в воду и выход из нее; поворот изделия на плаву влево и вправо (маневр «змейка»); включение реверса на плаву для определения собственных частот системы и демпфирующих свойств привода; интенсивный разгон водометов на воде. Параметры и их характеристики, измеряемые во время эксперимента, приведены в табл. 1. Схема установки аппаратуры представлена на рис. 2. В процессе проведения экспериментальных исследований выполнялся спектральный анализ крутящего момента в режиме реального времени.

Таблица 1.

Характеристика измеряемых параметров при исследованиях на плаву

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение параметра	Единица измерения	Диапазон измерения
1	Время	t	с	0...14400
2	Крутящий момент	M	Н·м	±1000
3	Частота вращения вала двигателя	n_d	об/мин	0...2400
4	Виброускорения по трем осям на корпусе углового редуктора.	a	м/с ²	0...500

Для установления тождественности совпадения измеряемых параметров по экспериментальным данным выполнялась градуировка и тарировка измерительных каналов. Комплекс информационно-измерительной регистрирующей аппаратуры аттестован в установленном порядке. При определении уровня нагруженности динамической системы без присоединенной массы воды, возможности возникновения резонансных режимов и определения приведенного момента инерции динамической системы осуществлялся разгон водометов на суше при резком изменении частоты вращения вала двигателя от 1400 об/мин до 2600 об/мин. Установлено, что максимальная величина моментов на валах приводов водометов не превышает 29 Нм, амплитуда переменной составляющей не превышает 8...10 Нм, резонансных режимов не выявлено.

Результаты определения зависимости динамического момента от частоты вращения вала двигателя в рабочем диапазоне двигателя от минимальных до максимально возможных при движении по воде приведены на рис. 3. Из полученных данных следует, что средняя величина момента на валах карданных передач изменяется в квадратичной зависимости. Максимальная величина динамической составляющей отмечается на частотах вращения вала двигателя 1300...1500 об/мин и имеет значение 197,1 Нм (кривая 1 на рис. 3). При этом суммарный момент средней и переменной составляющих во всем рабочем диапазоне частот вращения двигателя не превышает расчетный (кривая 3 на рис. 3). Динамическая нагруженность во время входа и выхода из воды незначительна, при повороте изделия на плаву влево и вправо (маневр «змейка») характеризуется повышением передаваемого момента на водомет отстающего борта до 10 %, что также не превышает допустимые значения.

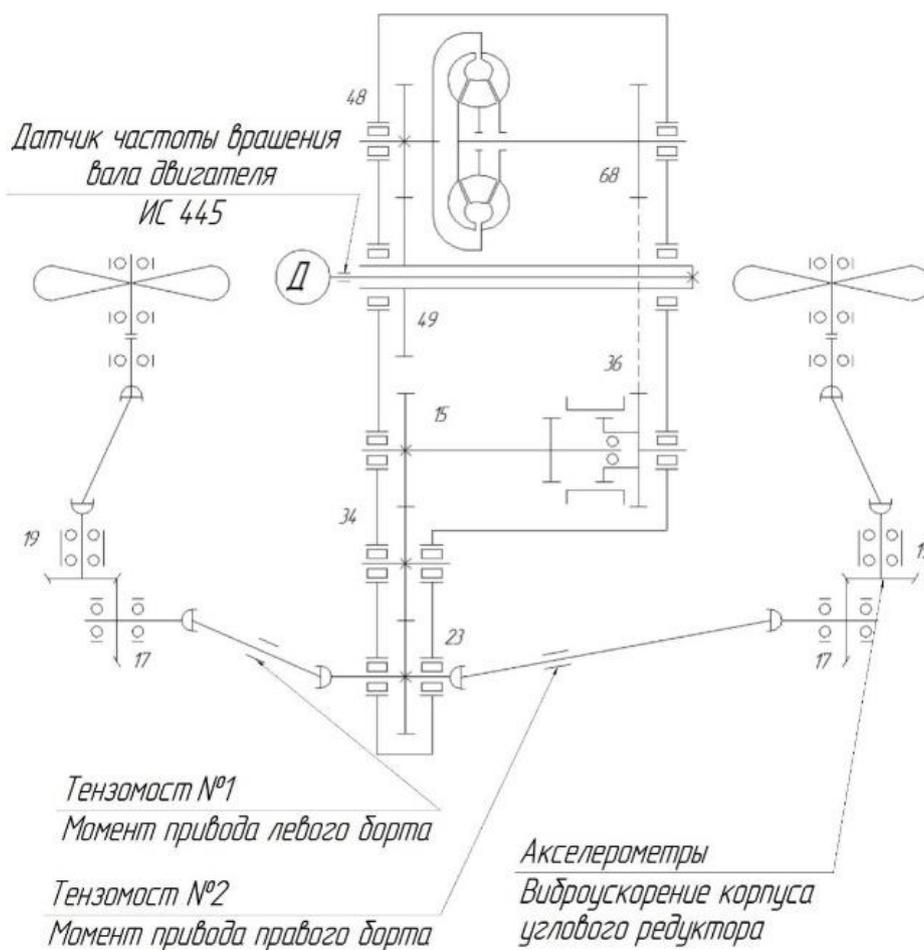


Рис. 2. Схема установки аппаратуры на объекте исследования

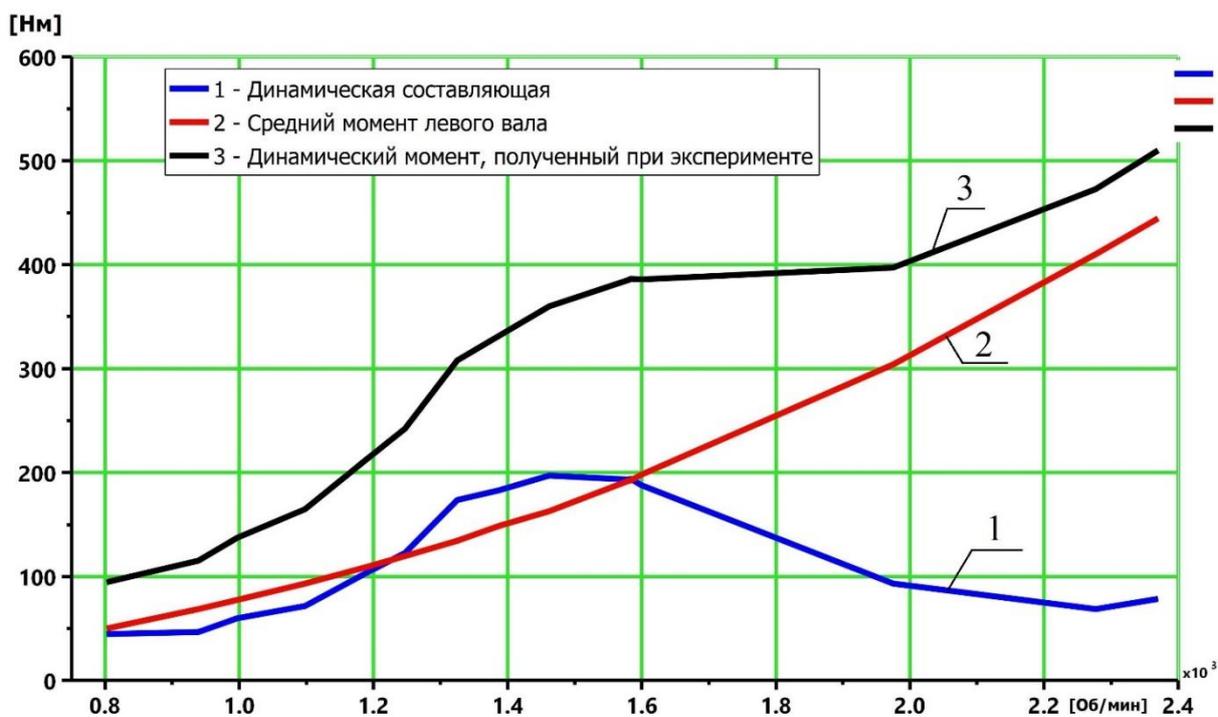


Рис. 3. График зависимости динамического момента в приводе водометных движителей от частоты вращения вала двигателя

Обработка и анализ результатов экспериментального исследования

При определении уровня нагруженности динамической системы с присоединенной массой воды и определении приведенного момента инерции динамической системы с присоединенной массой воды осуществлялся при интенсивном разгоне водометов на плаву. Установлено, что величина заброса моментов на валах приводов водометов не превышает установленных значений для соответствующих оборотов двигателя из-за существенного демпфирования колебаний. Иллюстрация возбуждаемых колебаний в приводе водомета и результаты определения периодических составляющих момента в частотной области приведены на рис. 4. По результатам испытаний выявлен ранее неисследованный новый эффект возбуждения режима биений в ПВД, возникающий вследствие близкого совпадения частот вращения валов углового редуктора ($u = 19/17$).

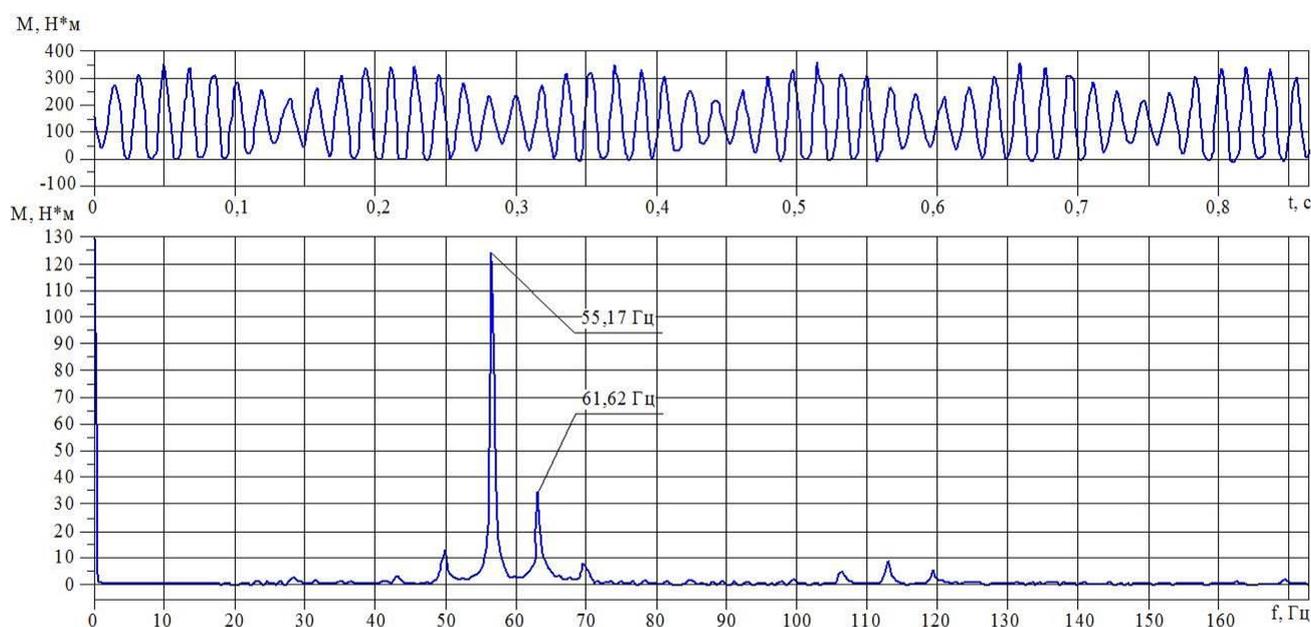


Рис. 4. Фрагмент осциллограммы и АЧХ динамического момента ПВД

По результатам обработки экспериментальных данных определены собственная частота приведенной динамической системы, составляющая 32...35 Гц, и коэффициент затухания, характеризующий демпфирующие свойства, составляющий 10...12 Нм*с (рис. 5).

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено:

- во всем частотном диапазоне работы вала двигателя момент на карданных валах приводов водометов не превышает значения 510 Нм;
- для снижения амплитуд колебаний динамического момента, действующего в ПВД, содержащем карданные передачи, повышения срока службы его элементов, целесообразно выполнить расчет требуемых углов относительного разворота вилок карданных шарниров обоих валов приводов каждого борта;
- включение режима блокировки гидротрансформатора не оказывает существенного влияния на динамическую нагруженность приводов водомета на всех режимах их работы;
- нагруженность валов приводов определяется статическим моментом и динамической составляющей, вызванной периодическими колебаниями с частотой равной двукратной частоте вращения карданов.

Максимальная амплитуда динамической составляющей равна 193...197 Нм при частоте колебаний от 50 до 65 Гц при средней величине момента 149 Нм. При максимальной ве-

личине среднего момента на оборотах 2400 об/мин переменная составляющая составляет 68 ... 78 Нм. За 50 час работы привода на оборотах вала двигателя 1400 об/мин число дополнительных, не учитываемых в расчетах циклов нагружения, составляет 11 млн. Эти параметры являются исходными данными для выполнения дополнительного расчета для оценки долговечности карданных передач. Установленные значения параметров приведенной динамической системы, такие как приведенный момент инерции водомета с учетом присоединенной массы воды, коэффициент затухания колебаний, а также собственная частота системы могут быть использованы при выполнении уточненного расчета динамической нагруженности приводов водометов.

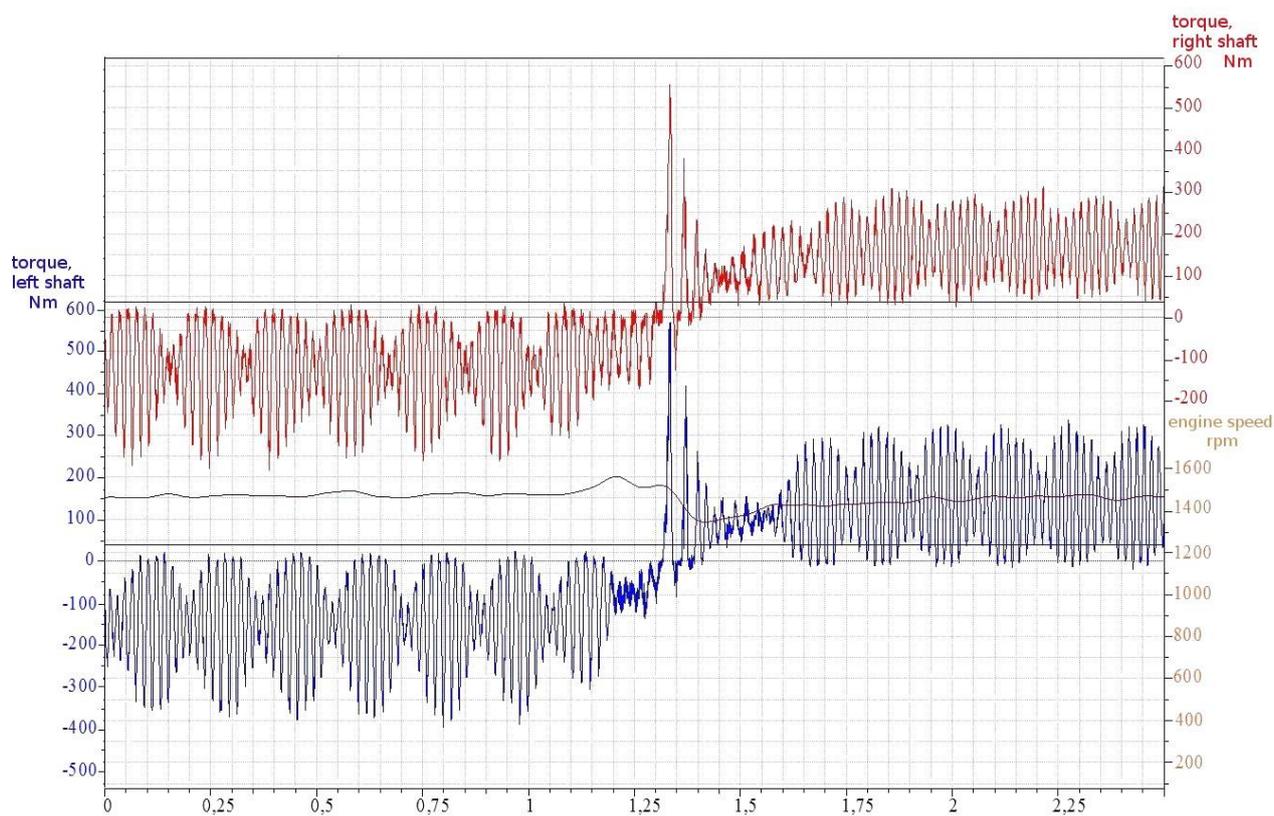


Рис. 5. Динамический момент при включении реверса на плаву

Заключение

Проведенный анализ современного состояния вопроса по динамической нагруженности ПВД БГАМ, а также результаты выполненных экспериментальных исследований о динамической нагруженности элементов конструкции ПВД при движении БГАМ на плаву, позволили обосновать вывод о том, что основной причиной ограничения долговечности элементов конструкции ПВД является несовершенство методики проектного расчета, не учитывающей возбуждение колебательных процессов.

Экспериментально обоснована необходимость разработки усовершенствованной методики проектного расчета, учитывающей кинематические и силовые периодически изменяемые свойства пространственно расположенных карданных передач, возбуждающих резонансные колебания в приводе водометного движителя.

Библиографический список

1. **Степанов, А.П.** Проектирование амфибийных машин / А. П. Степанов. – М.: Мегалион, 2007. – 420 с.
2. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
3. **Мавлюдов, М.А.** Двигатели быстроходных судов / М.А. Мавлюдов, А.А. Русецкий, Ю.М. Садовников, Э.А.Фишер. – Л.: Судостроение, 1982. – 280 с.
4. **Папир, А.Н.** Водометные двигатели малых судов / А.Н. Папир. – Л., Судостроение, 1970. – 254 с.
5. **Куликов, С.В.** Водометные двигатели / С.В. Куликов, М.Ф. Хражкин. – Л.: Судостроение. – 1980, – 312 с.
6. **Пантелеев, В.Ф.** Расчеты деталей машин: учеб. пособие. – 3–е изд., доп. / В.Ф. Пантелеев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 164 с.
7. **Блехман, И.И.** Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400с.
8. **Блехман, И.И.** Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок / И.И. Блехман, Л.И. Блехман, В.Б. Васильков, К.С. Иванов, К.С. Якимова // Вестник научно-технического развития. – 2012. – №11.
9. **Zhu, M. H.** On the mechanisms of various fretting wear modes / M.H. Zhu, Z.R. Zhou // Tribology International. – 2011. – Vol. 44. – P. 1378-1388.
10. **Yong, Liu** Evaluation of fretting wear based on the frictional work and cyclic saturation concepts / Liu Yong, Xu Jin-Quan, Mutoh Yoshiharu // International Journal of Mechanical Sciences. – 2008. – Vol. 50. – P. 897-904.
11. **Helmi, Attia** A generalized fretting wear theory / Attia Helmi // Tribology International. – 2009. – Vol. 42. – P. 1380-1388.
12. **Биргер, И.А.** Расчет на прочность деталей машин. Справочник. 4–изд, перераб. и доп. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
13. **Liang, D.** Decision fusion system for bolted joint monitoring / D. Liang and S.–F. Yuan, Shock and Vibration, vol. 2015, Article ID 592043, 11 pages, 2015.
14. **Zhu, L.** Experimental study on initial loss of tension in bolted joints / L. Zhu, J. Hong, G. Yang, X. Jiang // Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 230, no. 10, – P. 35-54, 2015.
15. **Junker, G.** New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration / G. Junker // SAE Technical Paper 690055, 1969, <https://doi.org/10.4271/690055>.
16. **Держанский, В.Б.** Прогнозирование резонансных режимов в гидромеханической трансмиссии транспортной машины / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.С. Климова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. – 2008. – №10 (110).
17. **Держанский, В.Б.** Основы методики прогнозирования динамической нагруженности дотрансформаторной зоны ГМП / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Б.А. Голосеев, Ю.Н. Гизатуллин // Вестник Курганского государственного университета. – 2008. – №3 (13).
18. **Воробьев, И.Т.** Устранение шума шестерен и крутильных колебаний в трансмиссии автомобиля с шестицилиндровым V-образным двигателем ЯМЗ / И.Т. Воробьев, И.И. Козлов // Автомобильная промышленность. – №6. – 1964.
19. **Геккер, Ф.Р.** К методике определения оптимального момента трения демпфера трансмиссий автомобиля / Ф.Р. Геккер // Автомобильная промышленность. – №2. – 1969.
20. **Высоцкий, М.С.** Автомобили. Специализированный подвижной состав / М.С. Высоцкий, А.И. Гришкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 240 с.
21. **Литвинов, А.С.** Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
22. **Раймпель, Й** Шасси автомобиля. Элементы подвески / Й. Раймпель. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
23. **Гришкевич, А.И.** Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / Под общ. Ред. А.И. Гришкевича; М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
24. **Афанасьев, Б. А.** Проектирование полноприводных колесных машин: в 2 т. / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов; под общ. ред. А. А. Полунгяна. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
25. **Колчин, А.И.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов. – 4–е изд. / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высш. Школа, 2008. – 496 с.

26. Гимадиев, А.Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах: учебное пособие / А.Г. Гимадиев, П.И. Грешняков, А.Ф. Синяков. – Самара: СамНЦ РАН, 2014. – 138 с.
27. LMS Imagine.Lab Amesim. Integrated simulation platform for multi-domain mechatronic systems simulation. URL: <http://www.plm.automation.siemens.com>.
28. LMS Imagine.Lab AMESim. Reference guide [Электронный ресурс]: электрон. дан. и прогр. (46,8 Мб), 2013. – 1 электрон. опт. диск (CDROM).
29. Игнатов, А.В. Преимущества клеевой фиксации резьбы / А.В. Игнатов, Н.С. Кечаев // Метизы – №3. – 2002.
30. Loctite. World wide design handbook. — Loctite European Group, Munich, Germany, 1998 – 450 p.
31. ТУ 2242–003–50686066–2003. Анаэробный клей–герметик АНАКРОЛ®–202.

*Дата поступления
в редакцию: 15.01.2021*

P.N. Nenashev¹, S.V. Abdulov¹, A.I. Taratorkin²

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMIC LOADING OF A WATER JET PROPULSION DRIVE OF A HIGH-SPEED TRACKED AMPHIBIOUS VEHICLE

¹Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building», Kurgan

²Institute of Engineering Science Ural Branch RAS, Yekaterinburg

Purpose: Experimental study of the dynamic loading of a water jet propulsion drive

Findings: The need to develop an improved design calculation technique that takes into account the kinematic and power, periodically changing properties of spatially located cardan gears that excite resonant vibrations in the drive of a water jet propulsion system is experimentally justified.

The problem solution: One of the main properties of high-speed tracked amphibious vehicles is the ability to overcome water obstacles. At the same time, ensuring the movement of tracked vehicles afloat is most effectively carried out by a water jet engine, which is the object of the study performed. The subject of the study is the process of dynamic loading of the water jet propulsion drive. The aim of the study is an experimental assessment of the dynamic loading of the drive of water jet propellers. With regard to the object of study, based on the analysis of the amplitude-frequency characteristic of the dynamic moment, it is established that resonant modes arise due to periodic changes in the system parameters determined by the kinematics of asynchronous joints of cardan gears. The main reason for limiting the durability of the design elements of the water jet propulsion drive is not taking into account the dynamic components of the moment when resonant vibrations are excited. The obtained results of the study can be used to improve the methodology of design calculation of water jet propulsion drives.

Key words: amphibious vehicle, experiment, water cannon, propulsion, dynamics, resonance, dynamic loading, drive, dynamic moment fluctuations.

УДК 621.432

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_78

С.А. Сергиевский, А.В. Герасин

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКУЮ ЖЕСТКОСТЬ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предложен подход к расчету и анализу динамической жесткости рамы легкого коммерческого автомобиля. Характеристика динамической жесткости рамы ассоциируется с конкретной точкой и направлением приложения переменной нагрузки, а также перемещением этой точки в том же направлении. Две указанные величины определяют динамическую жесткость рамы в данной точке. Разработанный подход позволяет при оценке динамической жесткости рамы дистанцироваться от способа приложения граничных условий (закрепления) модели. Это достигается в результате применения при расчете жесткости величины деформации, в качестве которой принимается разность перемещения точки приложения нагрузки к упругой модели рамы и перемещения аналогичной точки приложения такой же нагрузки к недеформируемой модели рамы. Она вычисляется с учетом фазового сдвига перемещений в двух анализируемых расчетных моделях. Результатом вычислений является зависимость динамической жесткости рамы от частоты. Расчетная модель реализована с применением программного комплекса *MSC Nastran*. Предложенный подход применим при использовании для расчетов других расчетных конечно-элементных программных комплексов.

Ключевые слова: динамическая жесткость рамы, расчетная модель рамы, зависимость динамической жесткости рамы от частоты, сравнение вариантов конструкции рамы.

Рама (в более общем смысле – несущая система) автомобиля является его важнейшим конструктивным элементом, в значительной степени определяющим многие характеристики автомобиля: прочность, долговечность, устойчивость и управляемость, топливную экономичность (рама имеет значительный вес), комфортабельность. Стоимость рамы составляет немалую часть общей стоимости автомобиля, ее конструкция сильно связана с его компоновкой и конструкцией других узлов и агрегатов автомобиля. Выбор конструкции рамы является весьма сложной задачей, причем наиболее значимо принятие правильных решений на начальном этапе разработки. С другой стороны, изменение конструкции рамы на поздних этапах разработки автомобиля зачастую весьма затратно и также требует очень «взвешенных» решений. Существующая структура технических центров автопромышленности такова, что различные компоненты (в том числе, раму) автомобиля разрабатывают до некоторой степени обособленные коллективы специалистов. Поэтому важным является применение методов оценки свойств разрабатываемого компонента, позволяющих оценить конструкцию, исходя из некоторых «локальных» критериев. Применительно к раме одним из таких «локальных» критериев является величина ее жесткости и, в частности, динамической жесткости в зонах сопряжения с виброактивными компонентами, например, силовым агрегатом, узлами трансмиссии и ходовой части. Актуальность повышения динамической жесткости рамы упоминается в различных работах [1]. Об этом же свидетельствуют материалы внутренних отчетов ведущих отечественных и зарубежных технических центров автомобильной промышленности.

В настоящей работе рассматривается подход к определению динамической жесткости рамы легкого коммерческого автомобиля, позволяющий повысить объективность оценки этого показателя и дающий возможность применять его как «локальный» критерий при сравнении различных конструктивных вариантов рамы. Традиционно жесткость определяется как отношение величины прилагаемой нагрузки к перемещению точки ее приложения. Величина перемещения различных точек исследуемого объекта зависит (зачастую суще-

ственно) от способа приложения граничных условий (т.е., его закрепления). Если исследуемый объект (в данном случае – рама) связан с другими частями комплексного изделия с помощью упругих связей, величина перемещения точки приложения нагрузки зависит от характеристик этих связей, что вносит некорректность в получаемый результат. Если же, напротив, применять в качестве граничных условий полное исключение перемещений закрепляемых точек исследуемого изделия, это приводит к зависимости получаемого результата от выбора областей приложения граничных условий, что также ведет к некорректности результата. В приложении к определению *статической* жесткости рам (и в более общем смысле – несущих систем) в автопромышленности вопрос выбора закрепления исследуемого объекта решен на условно-методическом уровне. Например, нагрузки и закрепления прилагаются к определенным точкам рамы (зачастую, к точкам сопряжения с элементами подвески колес), а перемещения определяются в характерных сечениях рамы (несущей системы) [2]. Другим вариантом оценки локальной жесткости рамы является расчет перемещения точек приложения нагрузки в отсутствие приложения граничных условий (закреплений). При таких условиях в результате расчета получается зависимость жесткости рамы от частоты, «начинающаяся» от нулевого значения [1,3]. Это объясняется тем, что перемещение точки приложения нагрузки формируется как сумма двух величин: упругой деформации элементов рамы и перемещения рамы в целом как недеформируемого тела.

Предлагаемый подход предусматривает расчет отклика модели рамы на прилагаемую нагрузку при отсутствии граничных условий (закреплений) и вычисление ее жесткости в виде (1):

$$C(f) = F(f) / (d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)), \quad (1)$$

где: $C(f)$ – зависимость динамической жесткости от частоты;
 $F(f)$ – зависимость прилагаемой нагрузки от частоты;
 $d_{flex}(f)$ – зависимость перемещения точки приложения нагрузки от частоты в упругой модели рамы;
 $d_{rigid}(f)$ – зависимость перемещения точки приложения нагрузки от частоты в абсолютно жесткой (недеформируемой) модели рамы.

Отклик упругого объекта на приложение переменной нагрузки характеризуется определенными фазовыми соотношениями. С математической точки зрения это означает, что $d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)$ являются комплексными величинами и функциями частоты f . Учет этого обстоятельства приводит к преобразованию выражения (1) к виду (2):

$$C(f) = F(f) / \text{Mod}[d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)], \quad (2)$$

где: $\text{Mod}[\dots]$ – модуль комплексного числа.

Учитывая, что величины $d_{flex}(f)$ и $d_{rigid}(f)$ являются комплексными, для вычислений выражение (2) преобразуется к виду (3):

$$C(f) = F(f) / \{ \{ \text{Re}[d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)] \}^2 + \{ \text{Im}[d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)] \}^2 \}^{1/2}, \quad (3)$$

где: $\text{Re}[\dots]$ и $\text{Im}[\dots]$ соответственно, реальная и мнимая части комплексного числа.

Данный метод позволяет оценить динамическую жесткость рамы в точке приложения нагрузки дистанцируясь от условий закрепления рамы при проведении расчета. Повышение точности расчета особенно заметно в области низких частот, так как в этой области влияние члена $d_{rigid}(f)$ на результат расчета жесткости.

При практической реализации предлагаемого подхода для расчета разности перемещений точек приложения нагрузок в упругой и недеформируемой моделях рамы применен следующий способ. Расчетная модель (рис. 1) реализована в конечно-элементном комплексе *MSC Nastran*. Части расчетной модели, ассоциируемые с деталями, изготовленными из листового металла, представлены оболочечными конечными элементами типа *QUAD4*

и *TRIA3*. Характерный размер оболочечных конечных элементов 5 мм, что обеспечивает возможность расчета отклика модели в частотном диапазоне до ~800 Гц. При построении сетки конечных элементов принимались меры к минимизации количества трехузловых элементов *TRIA3*. Заклепочные и болтовые соединения частей рамы моделируются с применением балочных элементов *BAR* и элементов – кинематических связей *RBE3*.

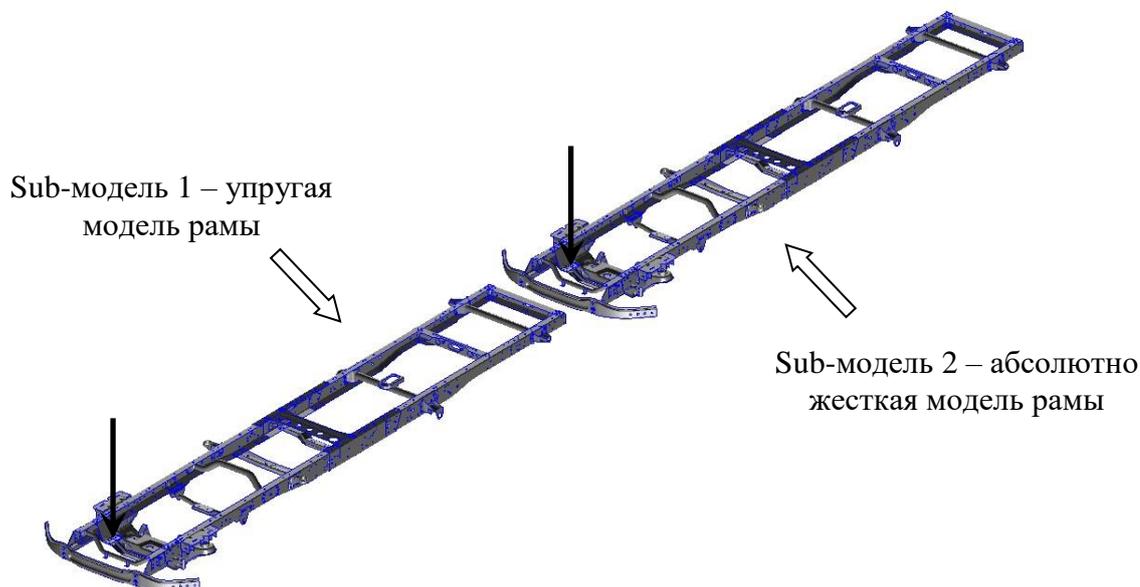


Рис 1. Расчетная модель

Диссипация энергии при упругих колебаниях модели учитывается с применением *модального* демпфирования. В соответствии с этим подходом, каждой форме (моде) собственных колебаний расчетной модели назначается коэффициент модального демпфирования, вычисляемый в соответствии с выражением (4):

$$b_n = 2 \cdot \xi_n \cdot \lambda_n, \quad (4)$$

- где:
- b_n – величина модального демпфирования для n -ой моды собственных колебаний расчетной модели;
 - ξ_n – величина критического демпфирования для n -ой моды собственных колебаний расчетной модели;
 - λ_n – собственное значение для n -ой моды ($\lambda_n = (2 \cdot \pi \cdot f_n)^2$, f_n – частота колебаний n -ой моды собственных колебаний расчетной модели).

В разработанной расчетной модели для мод собственных колебаний, имеющих частоту в диапазоне до 2,0 Гц, назначен коэффициент критического демпфирования $\xi = 0$ (т.е., «твердотельные» моды собственных колебаний не демпфированы). Модам собственных колебаний, имеющим частоту в диапазоне выше 2,5 Гц, назначен коэффициент критического демпфирования $\xi = 0,03$. В диапазоне 2,0 ... 2,5 Гц коэффициент критического демпфирования линейно увеличивается с величины 0 до величины 0,03.

Модель включает две части (sub-модели), которые являются полными копиями друг друга за исключением плотностей материалов, с которыми ассоциируются компоненты sub-моделей. Характеристики материалов компонентов sub-модели 1 (упругая модель) полностью соответствуют таковым в исследуемой раме. В sub-модели 2 (недеформируемая модель) значения модулей упругости материалов, с которыми ассоциируются компоненты этой

sub-модели, приняты на 4 порядка выше по сравнению с таковыми в sub-модели 1. Таким способом имитируется недеформируемость sub-модели 2.

К обеим sub-моделям в выбранных точках прилагаются одинаковые по величине и направлению нагрузки. Для примера, на рис. 1 изображено приложение вертикальной нагрузки к точке сопряжения поперечины рамы с правой передней опорой двигателя. В расчетную модель с применением межузловых кинематических связей (в комплексе MSC Nastran это элементы MPC) введено вычисление разности перемещений точек приложения нагрузки в sub-моделях 1 и 2. Расчет выполняется с помощью решателя SOL111 комплекса MSC Nastran (вычисление частотного отклика в модальной постановке). Расчет отклика модели на воздействие $F(f)$ выполняется в диапазоне 1 ... 400 Гц с дискретностью по частоте 0,5 Гц. Полученная с применением MSC Nastran зависимость от частоты разности перемещений точек приложения нагрузки в упругой и недеформируемой sub-моделях (т.е., $d_{flex}(f) - d_{rigid}(f)$) с помощью вышеприведенного выражения (3) преобразуется в зависимость от частоты динамической жесткости $C(f)$.

Влияние учета перемещения рамы как недеформируемого тела на результат вычисления локальной динамической жесткости иллюстрируется на рис. 2. Здесь приведены результаты расчета локальной динамической жесткости в точке сопряжения поперечины рамы с правой передней опорой двигателя в вертикальном направлении. Зависимость 1 определена без учета перемещения рамы как недеформируемого тела, зависимость 2 – с учетом влияния упомянутого эффекта. Можно видеть различия в получаемых результатах, особенно заметные в области частот до 50...70 Гц. Конкретные численные значения локальной динамической жесткости на рис. 2 и последующих рисунках не указаны для того, чтобы соблюсти требования к обращению с конфиденциальной информацией предприятия – разработчика и изготовителя легкого коммерческого автомобиля.

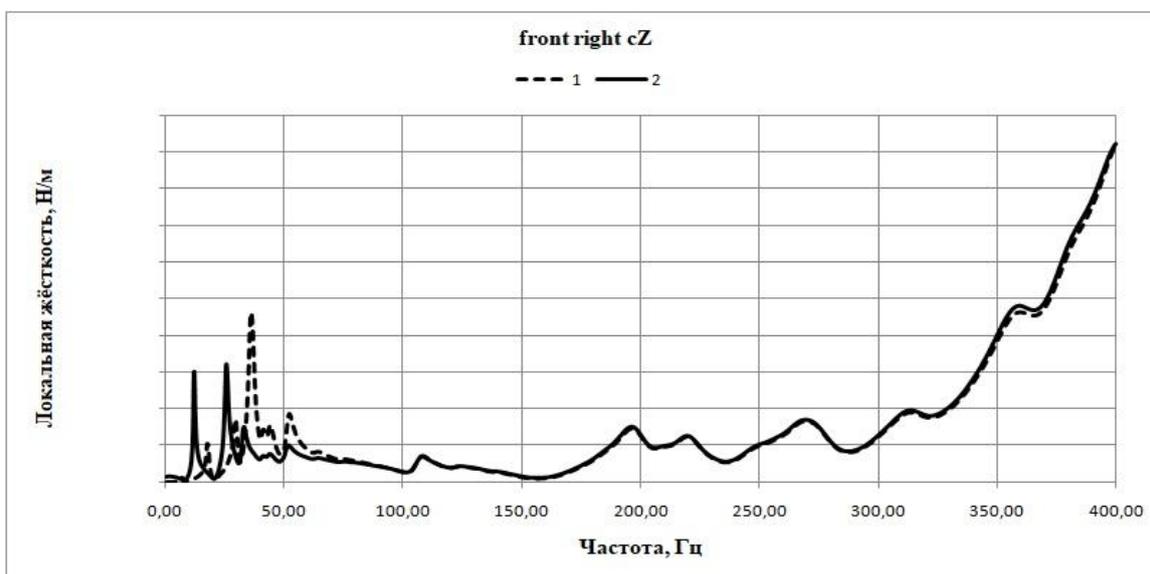


Рис. 2. Зависимости локальной динамической жесткости, определенные без учета и с учетом перемещения рамы как недеформируемого тела

- 1 – расчет без учета перемещения рамы как жесткого тела
2 – расчет с учетом перемещения рамы как жесткого тела

С применением предложенного подхода проанализировано влияние на локальную динамическую жесткость возможных конструктивных изменений рамы в области, примыкающей к подрамнику и поперечине рамы, на которой располагаются передние опоры силового агрегата. Проведено сравнение трех вариантов конструкции: рама действующего производства («вариант 0» – рис. 3), рама с лонжероном с профилем «закрытого» сечения на участке от поперечины рамы, на которой располагается задняя опора силового агрегата, до попере-

чины, на которой располагаются передние опоры силового агрегата («вариант 1», рис. 4) и рама с профилем «закрытого» сечения дополнительно на участке поперечины крепления передних опор силового агрегата («вариант 2», рис. 5). Необходимо отметить, что в модели «вариант 2» «труба» первой поперечины рамы не соединена с усилителем, «закрывающим» профиль лонжерона рамы на участке, примыкающем к первой поперечине рамы. На рис. 6-8 представлены полученные в результате вычислений частотные зависимости локальных динамических жесткостей в точке сопряжения правой передней опоры силового агрегата и поперечины рамы.

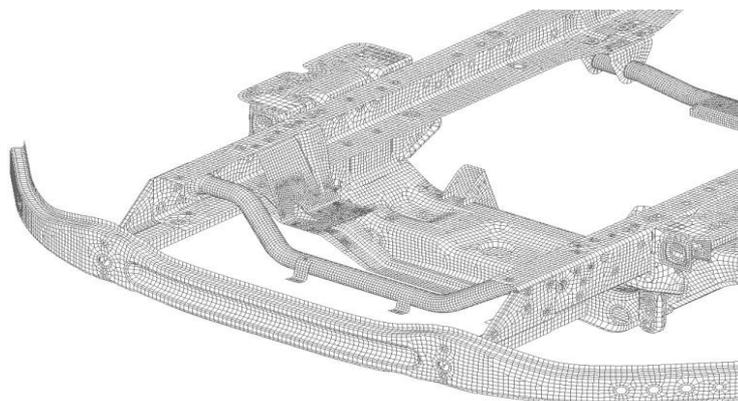


Рис. 3. Рама действующего производства («вариант 0»)

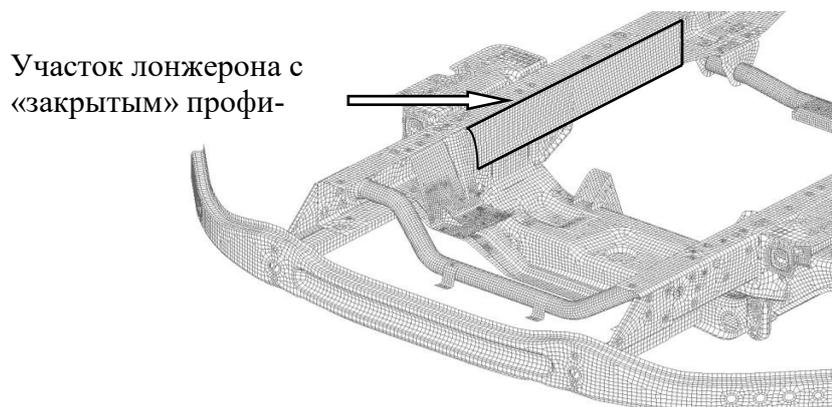


Рис. 4. Рама («вариант 1»)

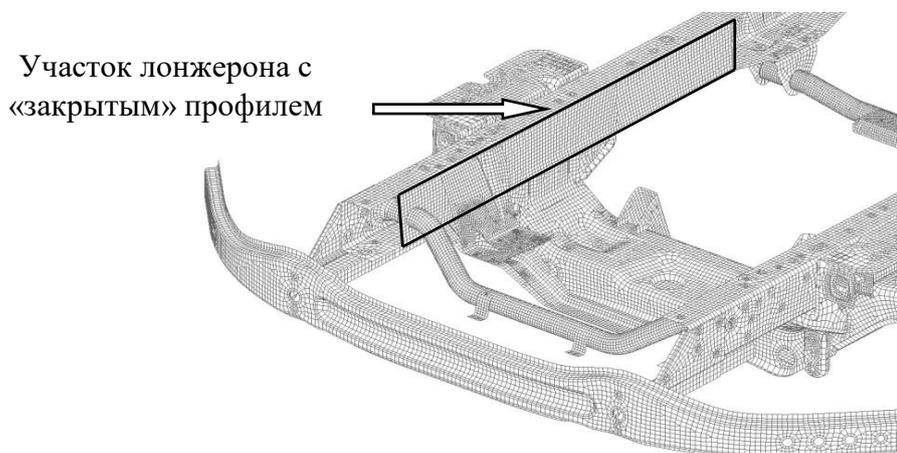


Рис. 5. Рама («вариант 2»)

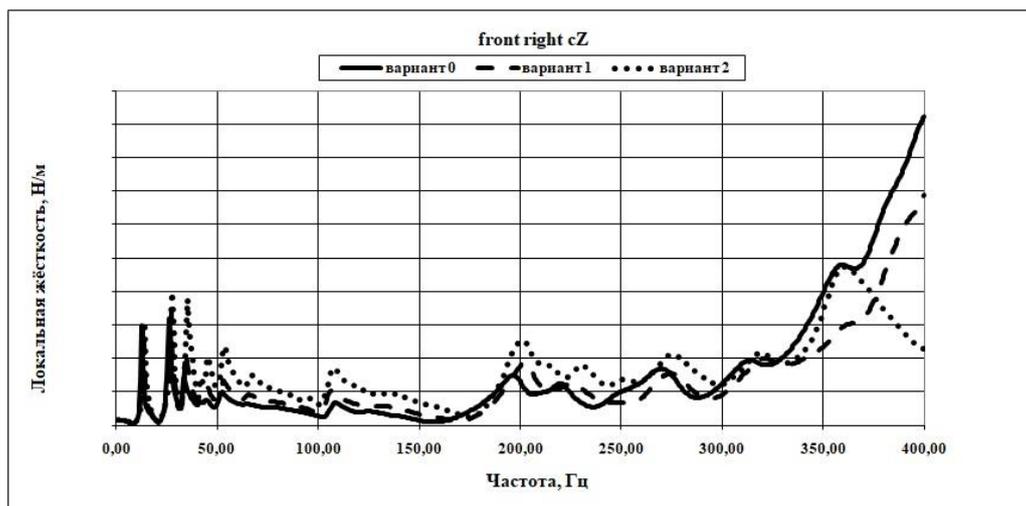


Рис. 6. Локальная динамическая жесткость в точке сопряжения правой передней опоры силового агрегата и поперечины рамы в продольном (X) направлении

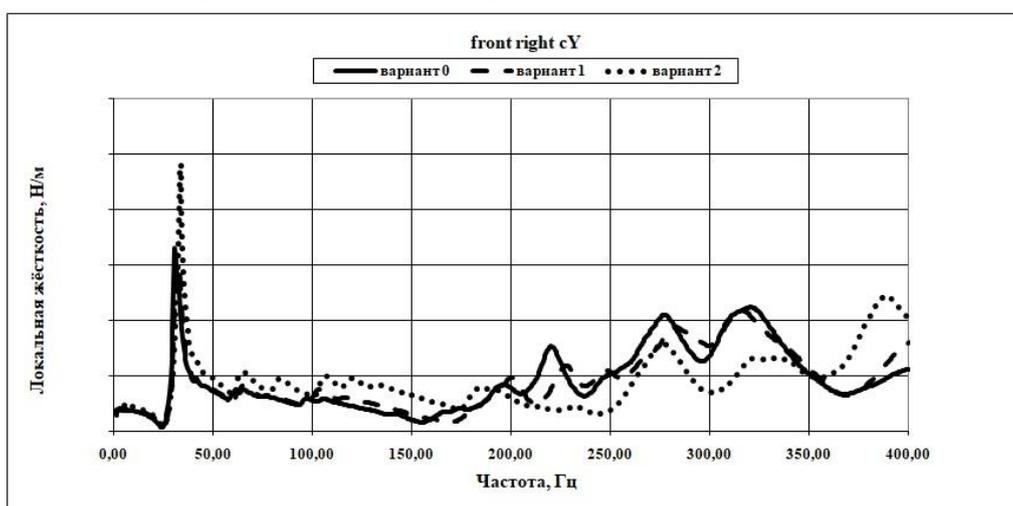


Рис. 7. Локальная динамическая жесткость в точке сопряжения правой передней опоры силового агрегата и поперечины рамы в боковом (Y) направлении

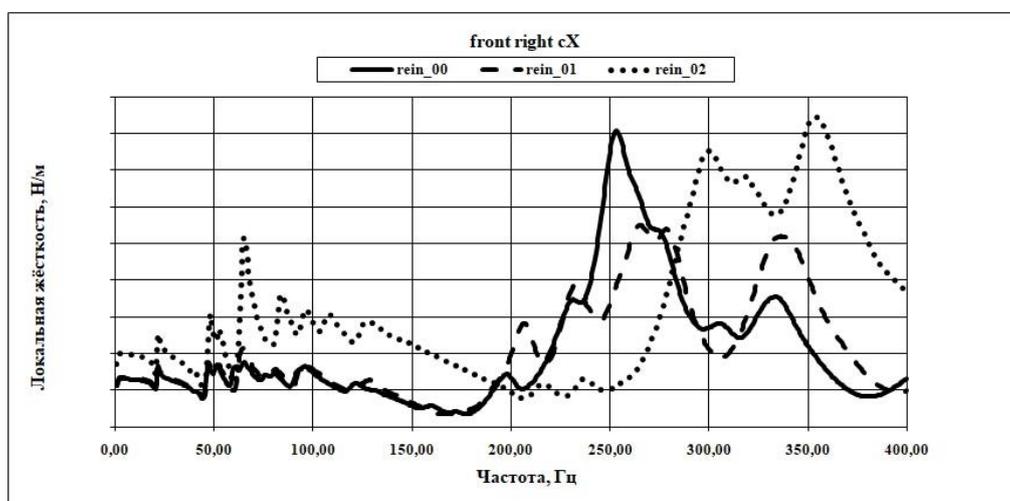


Рис. 8. Локальная динамическая жесткость в точке сопряжения правой передней опоры силового агрегата и поперечины рамы в вертикальном (Z) направлении

Зависимости, подобные изображенным на рис. 6-8, получены также для точек сопряжения рамы с левой передней и задней опорами силового агрегата. Их анализ показывает, что введение усилителя «вариант 1» сравнительно мало влияет на величину локальной динамической жесткости в точке сопряжения правой передней опоры силового агрегата и поперечины рамы. Введение усилителя «вариант 2» значительно больше влияет на локальную динамическую жесткость. В отдельных частотных диапазонах локальная динамическая жесткость увеличивается «в разы». В то же время в некоторых частотных диапазонах (свыше 150 ... 200 Гц) введение усилителя «вариант 2» приводит к неоднозначному влиянию на локальную динамическую жесткость.

Из рис. 7 и 8 видно, что на отдельных частотах локальная динамическая жесткость рамы в точке сопряжения ее с передней опорой силового агрегата в направлениях Y и Z имеет очень малое значение. Это объясняется тем, что упругая деформация рамы на этих частотах определяется «глобальными» модами ее собственных колебаний («закрутка» вокруг продольной оси и изгиб в продольной вертикальной и горизонтальной плоскостях). Очевидно, что усиление лонжерона на участках ограниченной длины мало влияет на изменение характеристик «глобальных» мод. Однако, даже при этих условиях, локальная динамическая жесткость в точке сопряжения рамы и правой передней опоры двигателя в направлении Z на частоте 21 Гц (частота с минимальным значением жесткости) при «варианте 2» выше жесткости при «варианте 0» на 15 %, а на частоте 35 Гц (частота с максимальным значением жесткости) больше в 2,5 раза.

Применения лонжерона с «закрытым» профилем оказывает значительно большее влияние в области средних и высоких частот, так как на этих частотах локальная динамическая жесткость в большей степени зависит от упругих деформаций в областях, близких к точке приложения нагрузки. В приложении к локальной динамической жесткости в направлении X (рис. 6) это справедливо и в области низких частот, так как нагрузка, прилагаемая в этом направлении, не возбуждает «глобальные» моды, и возникающая деформация локализуется вокруг точки приложения нагрузки.

Выводы

Предложен подход к расчету характеристик локальной динамической жесткости рамы автомобиля, не зависящий от выбора способа закрепления исследуемого объекта и повышающий объективность получаемых результатов. Его применение проиллюстрировано на примере расчетного анализа влияния вариантов изменения конструкции рамы легкого коммерческого автомобиля на ее локальную динамическую жесткость. Показано, что рассматриваемые изменения повышают локальную динамическую жесткость рамы в области сопряжения ее с передними опорами силового агрегата, что будет способствовать повышению эффективности «фильтрации» вибраций двигателя опорами силового агрегата.

Предложенный подход может применяться также для анализа влияния конструкции рамы в зонах сопряжения ее с другими виброактивными компонентами (трансмиссия, подвеска колёс, система выпуска отработавших газов и др.)

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 года № 218).

Библиографический список

1. **Patrikeev, A.** NVH Analysis of off-road vehicle frame. Evaluation of Mutual influence of body-frame system components / A. Patrikeev, A. Tarasov, A. Borovkov, M. Aleshin, O. Klyavin // Materials Physics and Mechanics 34 (2017) 70-75. http://mpm.spbstu.ru/no_13417/MPM134_08_patrikeev.pdf
2. **Pedersen, Bjorn** Conceptual dynamic analysis of a vehicle bode / Bjorn Pedersen // Master's dissertation at Lund University, Sweden, October 2018. <http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5233.pdf>
3. **Леонтьев, А.** Опыт применения программного продукта MSC Nastran для решения задач жесткости, вибрации и шумов (NVH) / А. Леонтьев // СПбПУ, http://docs.mssoftware.ru/conf/forum2017/day2/09_%D0%A1%D0%9F%D0%B1%D0%9F%D0%A3_%D0%9B%D0%B5%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%8C%D0%B5%D0%B2.pdf

*Дата поступления
в редакцию: 19.01.2021*

S.A. Sergievskiy, A.V. Gerasin

**EVALUATION OF INFLUENCE OF LIGHT COMMERCIAL VEHICLE FRAME
TO ITS DYNAMIC STIFFNESS**

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

An approach to the calculation and analysis of the dynamic stiffness of light commercial vehicle frame dynamic stiffness is proposed. In this approach, the dynamic stiffness of the frame is associated with a specific point and direction of application of a load, as well as the displacement of this point in the same direction. These two values determine the dynamic stiffness of the frame at the mentioned point. The developed approach to calculating the frame dynamic stiffness allows, when evaluating it, to distance oneself from the method of applying boundary conditions (constraints) of the simulation model. This is achieved by usage for stiffness calculation the value, which is the difference between the movement of the load application point to the flexible frame model and the movement of a similar point of application of the same load to the non-deformable frame model. The difference between the displacements of the load application points to the flexible and non-deformable frame models is calculated taking into account the phase shift of the displacements in the two mentioned simulation models. The result of calculations is the function of the frame dynamic stiffness to the frequency. The simulation model is implemented using the MSC Nastran software package, but the proposed approach is also applicable when using other finite element analysis software.

Key words: frame dynamic stiffness, simulation model of frame, function of the frame dynamic stiffness to the frequency, comparison of frame design options.

Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВЕРИ АВТОМОБИЛЯ НА ПАССИВНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ БОКОВОМ УДАРЕ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Представлены разработанные рациональные конечно-элементные модели (КЭМ) кузова и столба, на базе которых возможно обеспечение пассивной безопасности автомобиля при боковом ударе. Рассмотрены вопросы повышения энергоемкости кузова автомобиля с помощью дополнительных усиливающих элементов в полости двери. Проверка решений выполнялась посредством компьютерного моделирования в программном продукте *LS-Dyna*. В качестве режима нагружения был рассмотрен боковой удар автомобиля о столб, регламентированный Правилами ЕЭК ООН №135. Выбор сечений усиливающих элементов двери осуществлялся на основе анализа научных исследований, также предложены три новых варианта, из которых выбраны два наиболее эффективных, проверенные в составе кузова. Критерием эффективности была принята энергоемкость, определяющая величину проникновения внутренней поверхности двери в салон. Все рассмотренные варианты усиления двери имеют разную эффективность, повышая энергоемкость системы от 5 до 19 %. Наиболее эффективным вариантом усиления двери является круглая труба с внутренним ромбом, заполненная пеноалюминием.

Ключевые слова: кузов, столб, пассивная безопасность, дверь, пеноалюминий, конечно-элементная модель, энергоемкость, боковой удар.

Введение

Боковые столкновения являются одними из наиболее опасных аварий, ежегодно приводящих к гибели и травмам людей. Глобальный показатель аварийности показывает, что более трети всех аварий в мире происходят из-за бокового удара о деревья или столб, что указывает на значимость этого удара по сравнению с фронтальными авариями. Существует много исследований, посвященных способности конструкции транспортного средства поглощать энергию удара и уменьшать ударный импульс, передаваемый человеку при боковых ударах [1,2]. В отличие от лобового столкновения, боковые столкновения особенно опасны, так как расстояние между пассажиром и боковой стороной автомобиля минимальны. Бамперы, двигатель и другие элементы конструкции помогают поглощать энергию удара при лобовом ударе, но водитель имеет очень слабую защиту при ударе автомобиля о бок. Чтобы разработать систему безопасности, необходимы энергопоглощающие элементы конструкции для снижения травматизма пассажиров при боковом столкновении [3,4]. Во время бокового удара одним из ключевых элементов защиты пассажиров автомобиля является дверь. Она состоит из внутренней и внешней стальной оболочки. Дверь обычно усилена боковой ударной балкой, которая горизонтально помещается между внутренней и внешней стальными оболочками. Когда преграда ударяется о дверь автомобиля, она деформируется и поглощает энергию. Одной из ключевых характеристик боковых балок является уменьшение проникновения в автомобиль при одновременном распределении энергии удара. Усиление двери автомобиля при боковых ударах о столб требует большого внимания из-за меньшей площади зоны удара и малой жесткости по сравнению с другими элементами кузова.

Цель исследования

Целью работы является исследование путей увеличения энергоемкости двери и выбора наиболее эффективных способов усиления. Внимание было сосредоточено на поиске формы поперечного сечения балки двери для улучшения характера поглощения энергии [5].

Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) кузова легкового автомобиля при боковом ударе

Для легковых автомобилей проводятся испытания и моделирование для оценки безопасности транспортного средства при боковом ударе согласно Правилам ЕЭК ООН. Все остальные испытания (Европейский комитет испытания новых автомобилей – EuroNCAP; Американское управление дорожной безопасности – NHTSA и др.) базируются на методике данных правил, однако проводятся на более высоких скоростях. Согласно Правилам ЕЭК ООН, существуют следующие два вида испытаний автомобиля при боковом ударе [6,7].

1. Правило ЕЭК ООН №95: имитация бокового удара другим автомобилем. При боковом краш-тесте в водительскую дверь неподвижного автомобиля направляется тележка, на которой закреплен деформируемый барьер. Скорость удара составляет 50 ± 1 км.

2. Правило ЕЭК ООН №135: автомобиль со скоростью 32 ± 1 км/ч направляют в столб диаметром в 25,4 см (рис. 1).

Удар с левой стороны (вид сверху)

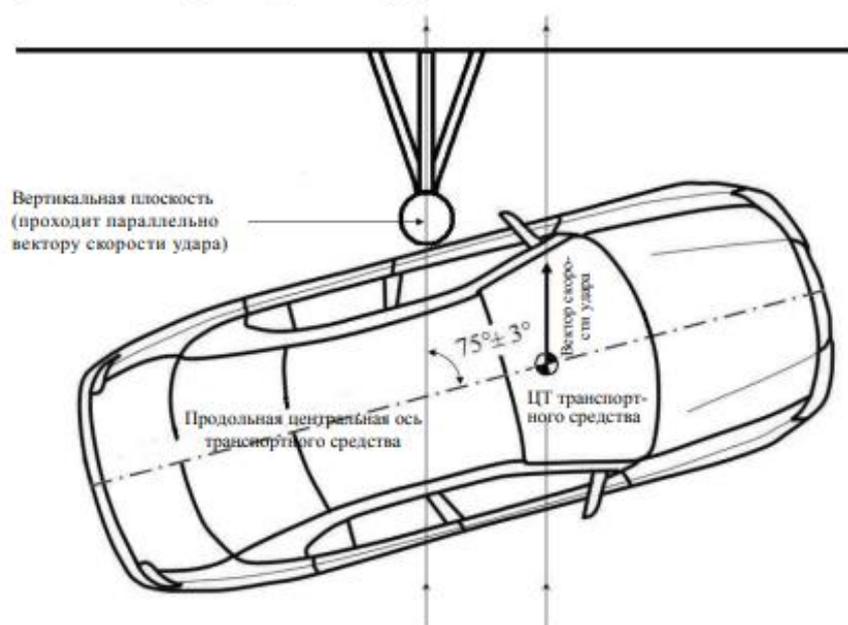


Рис. 1. Испытания по Правилу ЕЭК ООН №135

В качестве объекта исследования рассматривается кузов автомобиля УАЗ. Конечно-элементная модель данного кузова была подробно описана ранее [8]. Она формировалась с использованием оболочечных элементов с формулировкой Бельчко-Цая (рис. 2). Тип элемента – 4-х узловой 1-го порядка, средний размер – 15 мм.

В модели использовались следующие материалы:

- стекло (тип модели Multilinear Isotropic Hardening с критерием разрушения Failure/Principal Stress Failure с уровнем разрушающих напряжений 150 Мпа);
- сталь AISI1020 с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Джонсона-Кука;
- пеноалюминий с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Дешпенда-Флека (только в моделях с пенонаполненными элементами усиления) [9].

Картина деформированного состояния кузова автомобиля после удара о столб и график распределения энергии представлены на рис. 3-4.

Mesh

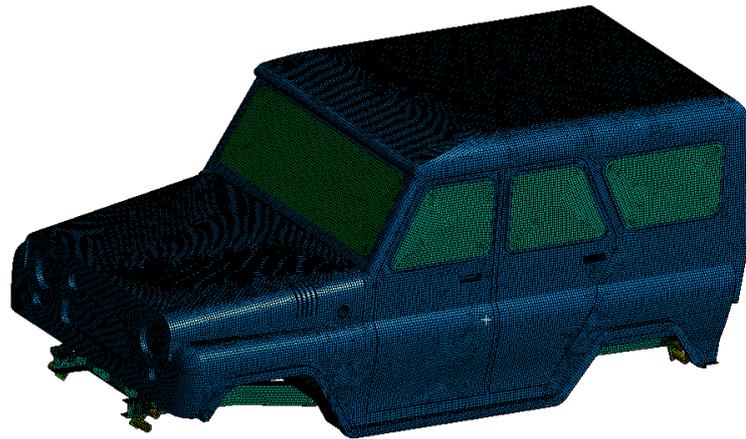


Рис. 2. Конечно-элементная модель кузова с рамой

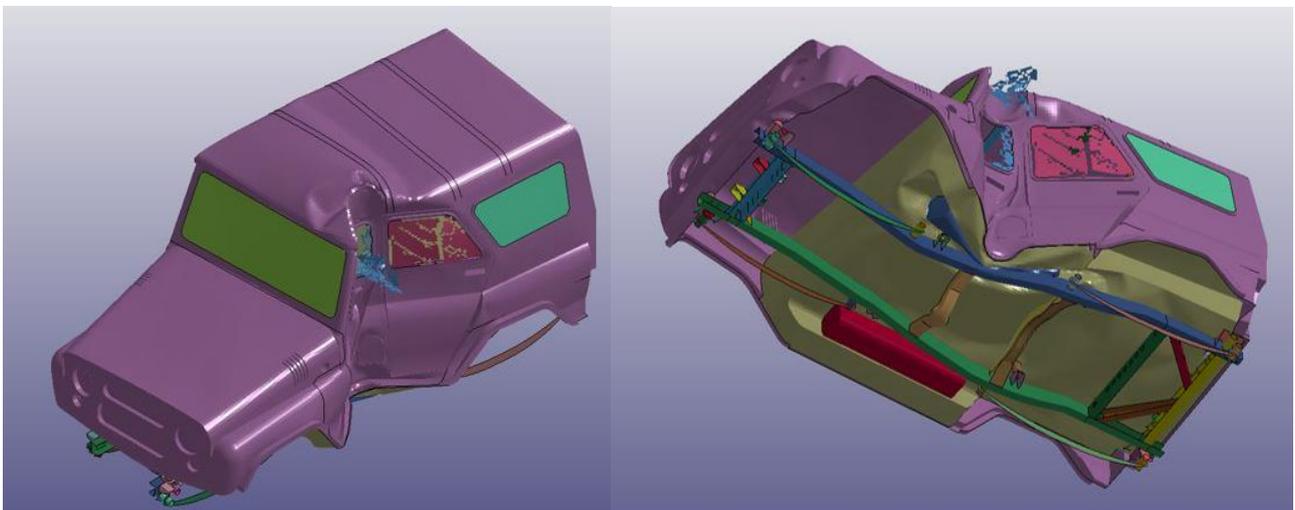


Рис. 3. Деформированное состояние исходного варианта кузова

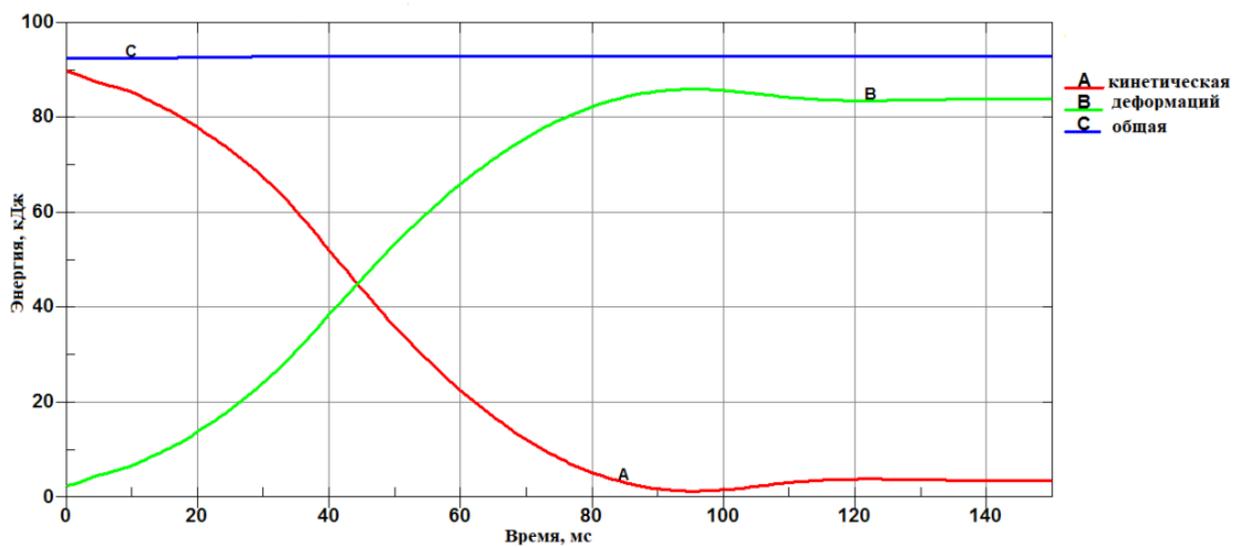


Рис. 4. График распределения энергий исходной конструкции

Подробный анализ картины деформированного состояния кузова автомобиля при ударе о столб представлен в [8]. Необходимо особо отметить, что дверь сильно деформируется и работает в большей степени на изгиб на протяжении всего соударения, поэтому необходим анализ различных способов усиления двери.

Оценка пассивной безопасности кузова автомобиля с внесенными конструктивным изменениями

Проанализируем влияние использования различных усиливающих элементов двери на ее проникновение в пространство салона. Дверь работает преимущественно на изгиб, следовательно, эффективным является повышение ее жесткости увеличением расстояния между внешней и внутренней панелями с установкой между ними связующих элементов. Однако этот вариант не является рациональным с позиции ее собираемости. Более выгодной является установка в пространство между внешней и внутренней панелями балки с креплением ее к боковинам двери. Выбор типов балок производился на основании анализа публикаций по данной теме [10,11], наружный размер балок определялся возможностью их установки во внутреннее пространство двери. Важным являлось наличие внутренней зоны, которую можно заполнить пеноалюминием. Уменьшение внутреннего пространства салона происходит за счет деформации двери, которая передается с внешней панели, контактирующей со столбом после ее вдавливания на величину зазора между панелями, на внутреннюю, следовательно, усиливающий элемент должен сопротивляться изгибу и смятию. Это позволит уменьшить передачу деформаций с внешней панели на внутреннюю и сохранить жизненное пространство салона.

В результате был рассмотрен ряд балок различного сечения (рис. 5), две из которых также были запенены алюминием. Схема установки на примере круглой балки приведена на рис. 9, но для наиболее точного определения места расположения балки необходимо в будущем провести топологическую оптимизацию двери.

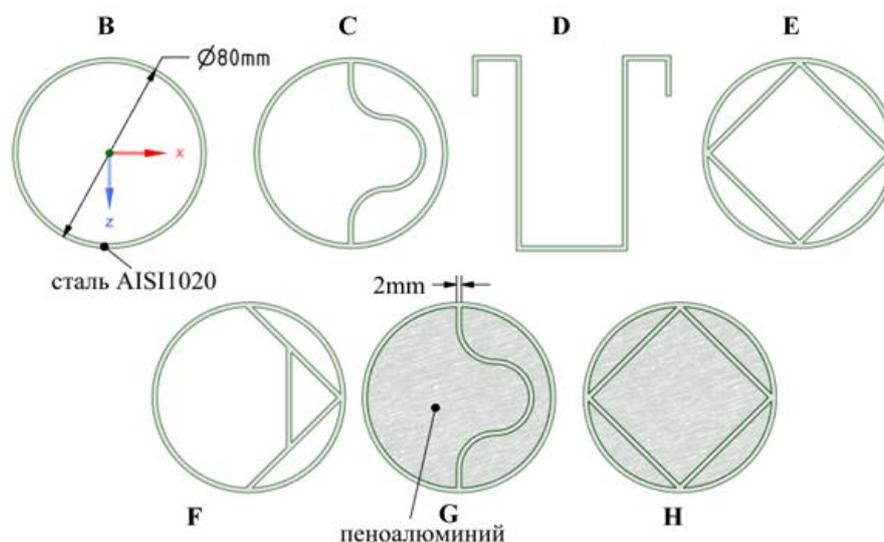


Рис. 5. Сравнимые сечения балок в двери

При этом два из предлагаемых вариантов сечения балок (Е и F) выбирались на основании направленного вычислительного эксперимента, суть которого заключалась в следующем. Предполагая, что усиливающая балка в двери является двухопорной и работает на изгиб, были рассмотрены соударения с ней некоего тела с начальной скоростью с фиксацией остаточных прогибов, а также три сечения балки (рис. 6). Схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 7. На рис. 6 представлены также остаточные прогибы балок со стороны салона.

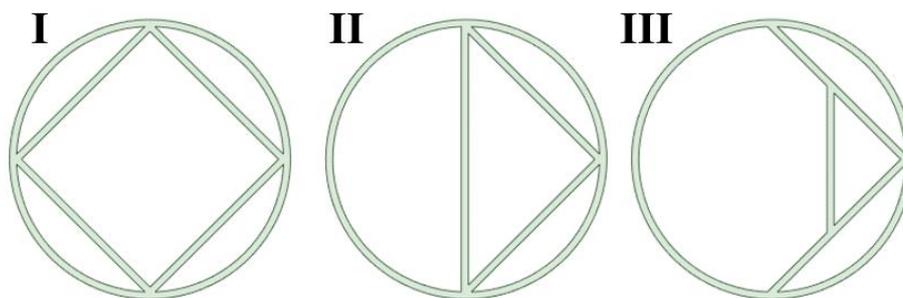


Рис. 6. Сечения для направленного вычислительного эксперимента

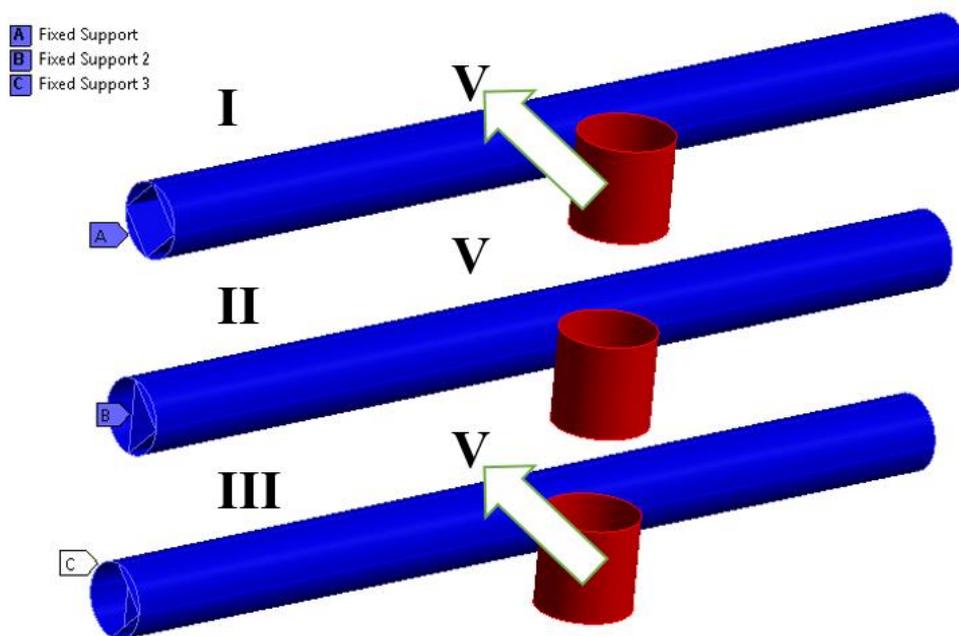


Рис. 7. Схема вычислительного эксперимента

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что балка с большим треугольником (вариант II, рис. 6) уступает двум остальным балкам по энергоемкости. На основании данного виртуального эксперимента и были выбраны два сечения (варианты I и III), которые далее рассматривались в составе кузова.

На рис. 10-11 представлены результаты по энергиям системы для подтверждения отсутствия вычислительных проблем, а также относительным перемещениям элементов кузова для двух вариантов: С и G. Относительные перемещения измерялись как результирующие перемещения по отношению к плоскости, проходящей через узлы порога с неударной стороны кузова.

Для установления дискретной величины относительного перемещения (внедрения двери в салон) деформированная геометрия кузова экспортировалась в САD-формат и производился контроль поперечного размера кузова (рис. 12). Результаты по остальным вариантам сведены в табл. 1. Энергоемкость определялась как отношение начальной энергии к разности между начальным (при недеформированном состоянии кузова) и конечным (при деформированном состоянии кузова), результаты приведены в табл. 1 и на рис. 13.

На рис. 14-15 приведены для визуального сравнения деформированные состояния: усилителей, дверей и кузовов.

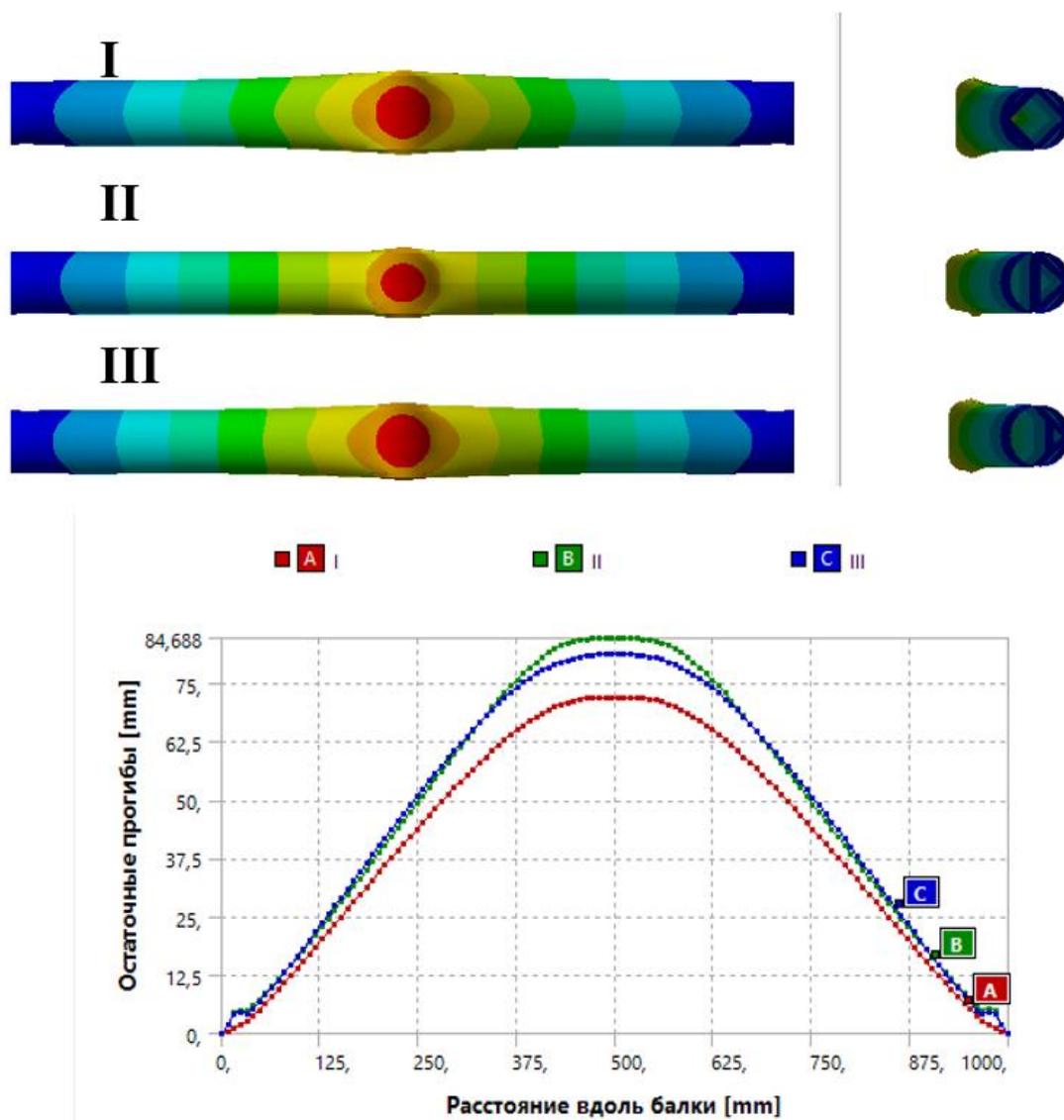


Рис. 8. Графики изменения прогиба балок в процессе деформирования

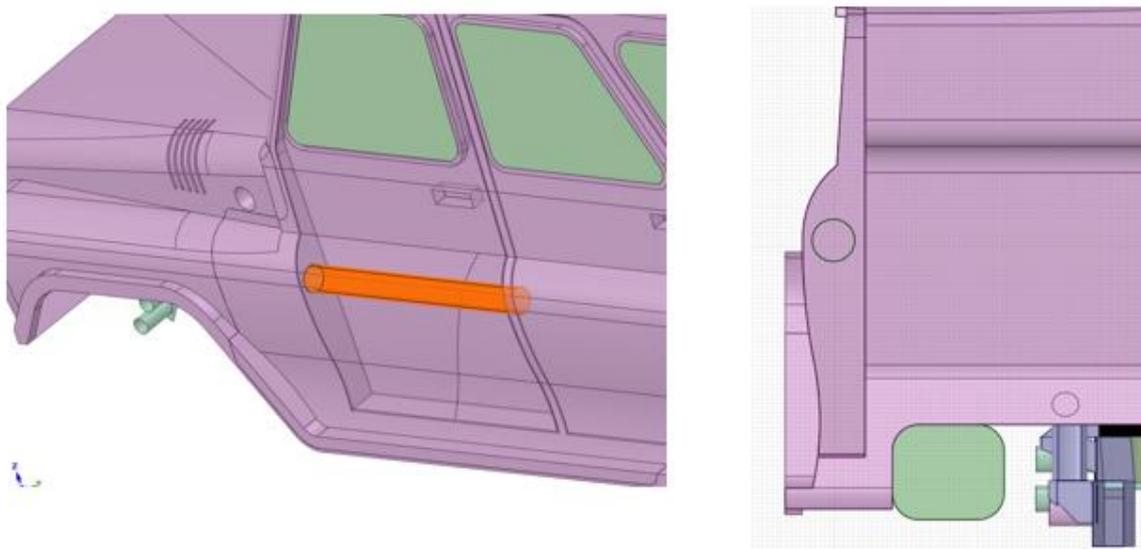


Рис. 9. Схема установки балок в двери

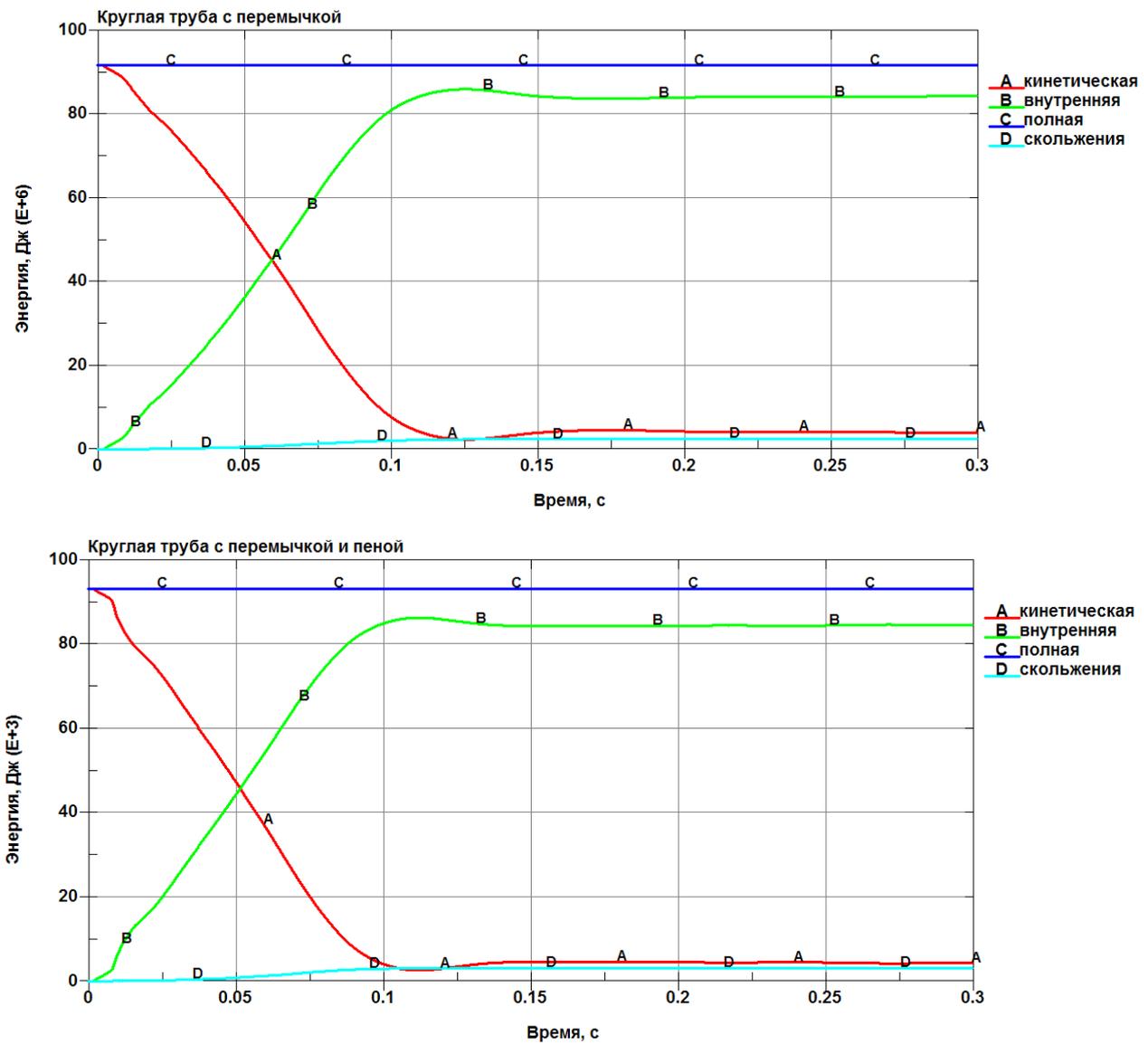


Рис. 10. Графики изменения энергий (для вариантов С и G)

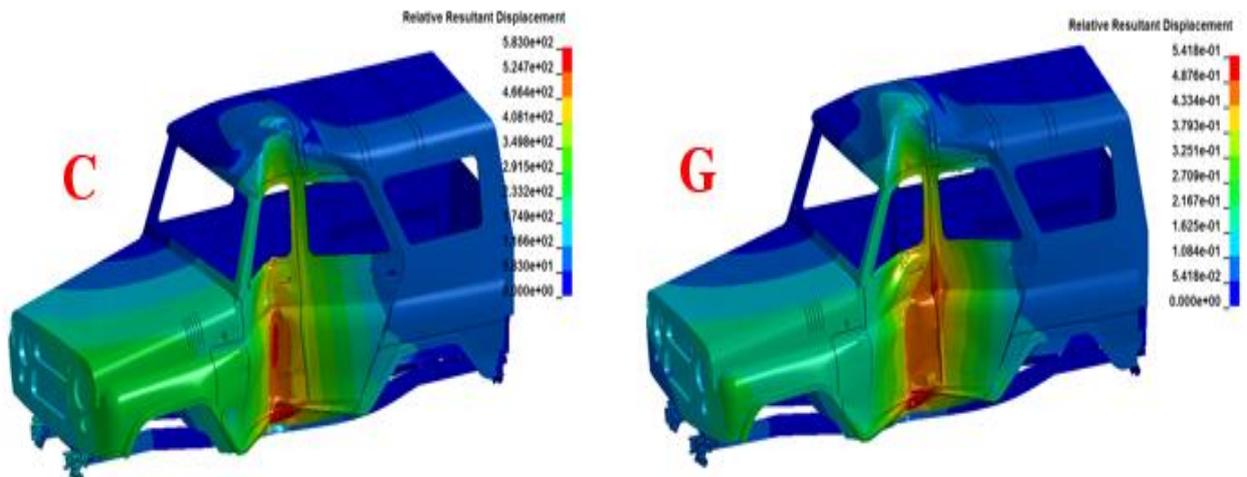


Рис. 11. Перемещения элементов кузова, мм

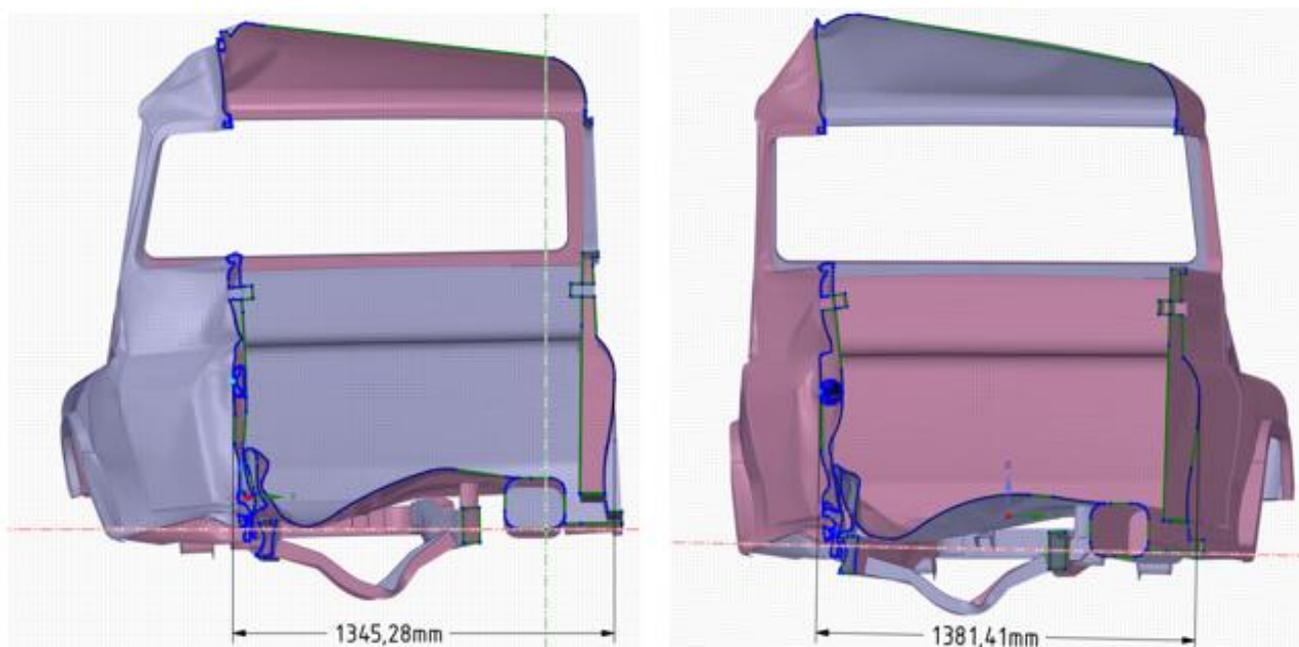


Рис. 12. Поперечный размер деформированного кузова

Результаты сравнения эффективности применения балок по критерию энергоемкости в составе двери приведены в табл. 1 и на рис. 13.

Таблица 1.

Сравнение эффективности балок по энергоемкости

Вариант	Исполнение	Начальный размер	Прирост массы	Размер после деформации, мм	Энергоемкость, Дж/мм	Прирост, %
A	Дверь с двойной стенкой	1843	-	1302	169	-
B	круглая труба		+3 кг.	1327,5	177	5,06
C	круглая труба с перемычкой		+4,7 кг.	1345,28	184	8,88
D	балка с hat профилем		+3,5 кг.	1349,55	185	9,77
E	круглая труба с ромбом		+5,7 кг.	1358,8	189	11,96
F	круглая с треугольником		+4,6 кг.	1355,7	188	11,2
G	круглая труба с перемычкой и пеной		+8 кг.	1381,41	199	17,54
H	труба с ромбом и пеной		+8,4 кг.	1387,2	201	18,99

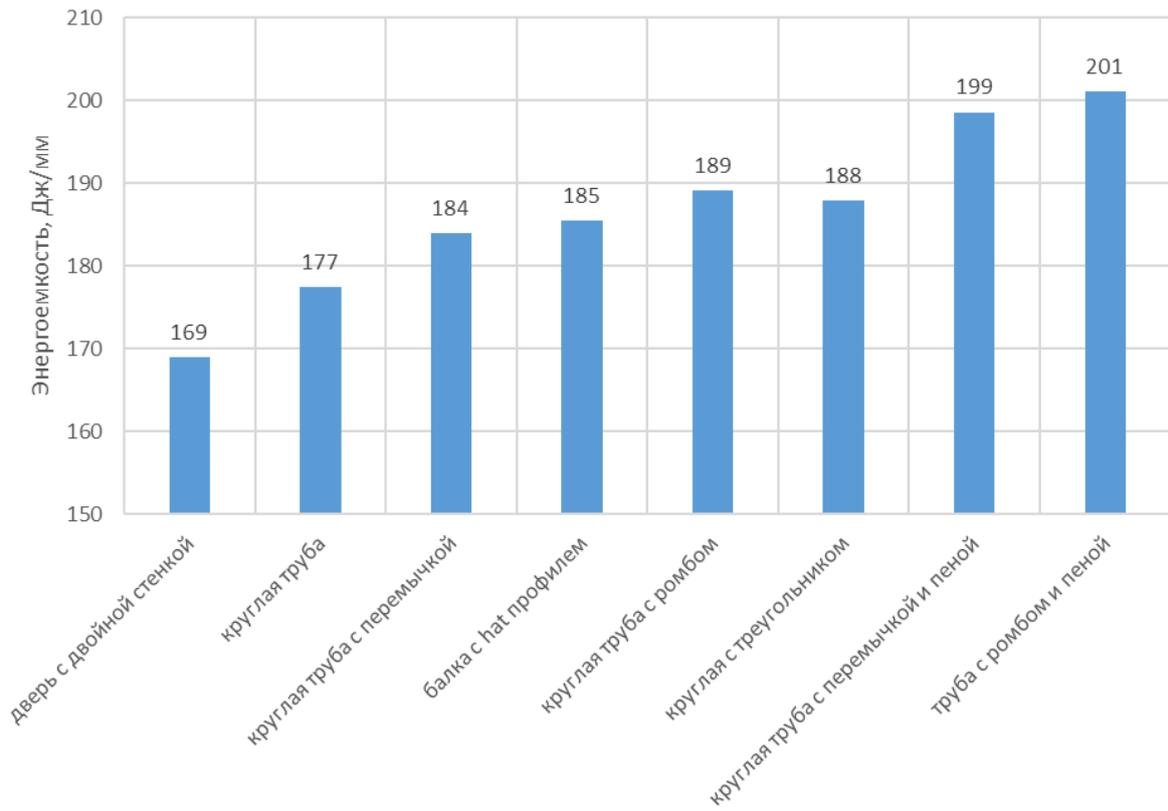


Рис. 13. Сравнение эффективности балок по энергоёмкости

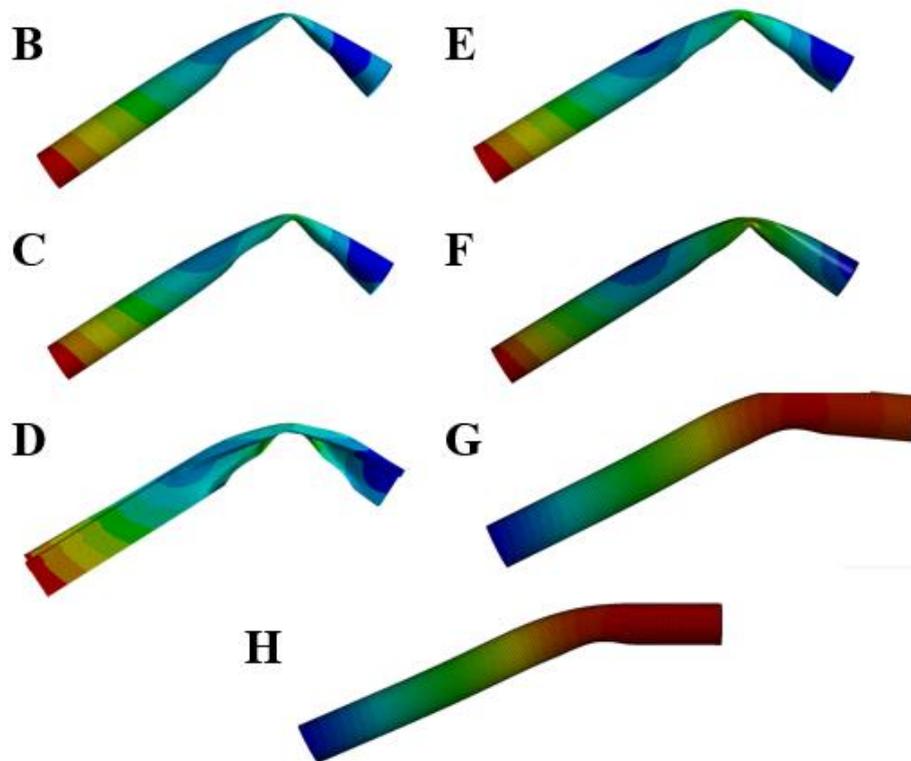


Рис. 14. Деформированные усилители

Характер деформирования усилителей без пеноалюминия (варианты В-Е) – изгиб со смятием, с пеноалюминием (варианты F-G) – изгиб.



Рис. 15. Деформированные двери

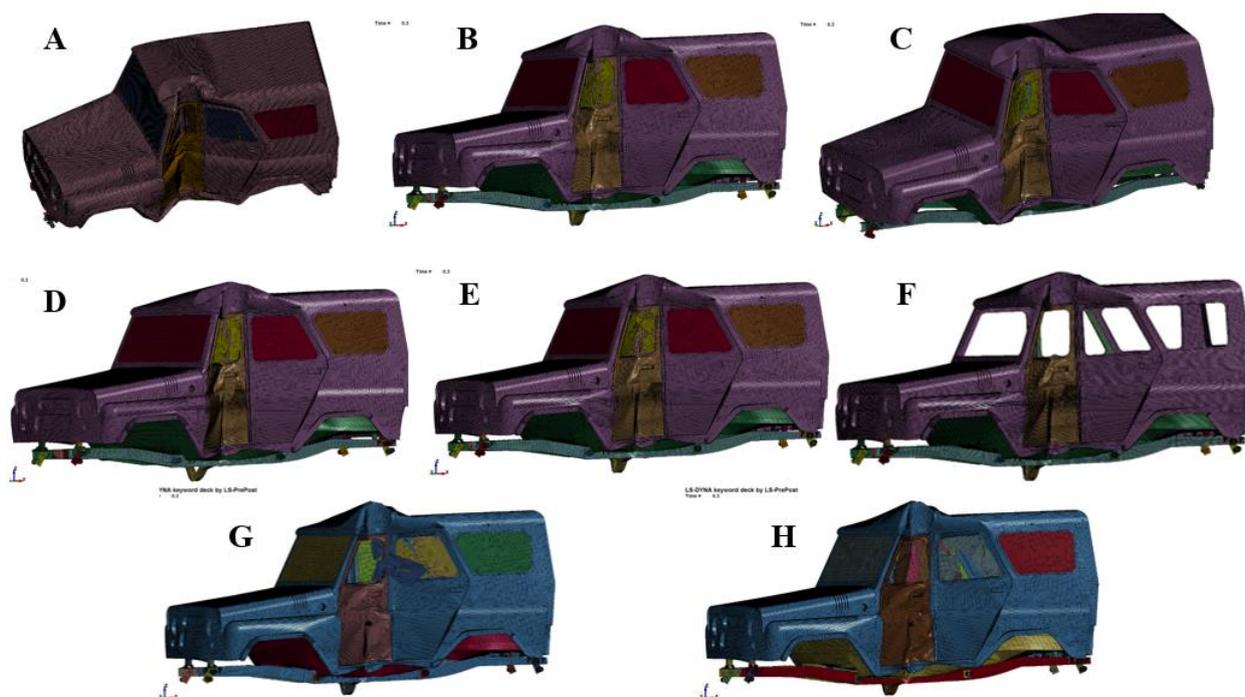


Рис. 16. Деформированные кузова

Заключение

1. Рассмотренные варианты усиления двери имеют разную эффективность, повышая энергоёмкость системы от 5 до 19 %. Выявлено существенное влияние формы поперечного сечения балок и запенивания.

2. Из балок без пены наиболее эффективным является комбинированное сечение, представляющее собой трубу с внутренним ромбом (вариант Е), повышающее энергоёмкость почти на 12 %.

3. Эффективность труб с перемычками повышается практически в два раза при заполнении их полостей пеноалюминием (варианты G и H).

4. Наиболее энергоёмким вариантом усиления двери является вариант круглой трубы с внутренним ромбом, заполненной пеноалюминием (вариант H), повышающий энергоёмкость системы почти на 19 %.

Библиографический список

1. **Guang, D.** Side structure sensitivity to passenger car crashworthiness during pole side impact analysis of passenger car side / D. Guang, W. Dazhi, Z. Jinhuan, H. Shilin // Tsinghua Sci Technol, 2007; 12:290–5.
2. The Application of Energy Absorbing Structures on Side Impact Protection Systems by James Njuguna. International Journal of Computer Applications in Technology, 2011.
3. Investigation of anti-intrusion beams in vehicle side doors' by E. Cerniauskas, A. Kersys, V. LukoSevicius, J. Sapragonas. Mechanika, 2010.
4. Modelling, Analysis and Comparative Study of Side Impact Beam" by HarijonoDjojodihardjo, Soo Lin Khai. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), November, 2013.
5. Crashworthiness evaluation of side-door beam of vehicle' by T. L. Teng K. C. Chang, T.H. Nguyen. Technische Mechanika, October, 2007.
6. Правила ЕЭК ООН № 95 (документ E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.2). Единообразные требования, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае бокового столкновения. ООН, 2011. – 99 с.
7. Правила ЕЭК ООН № 135 (документ E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.1–E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.134/Rev.1). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их характеристик при боковом ударе о столб (БУС). ООН, 2016. – 48 с.
8. **Зузов, В.Н.** Исследование влияния на энергоёмкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара / В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 20–34. DOI: 10.14529/engin200403.
9. **Гончаров, Р.Б.** Определение критериев выбора параметров материала наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2019, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
10. **Ghadianlou, Ali** Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts / Ali Ghadianlou, Shahrir Bin Abdullah // Thin-Walled Structures. – 2013. – №6, 7. – С. 23-33.
11. **Long, C.R.** Analysis of a car door subjected to side pole impact / C.R. Long, S. Yuen, Kim Chung, G.N. Nurick // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2019. – vol.16. – №.8.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2021*

D.A. Sulegin, V.N. Zuzov

**AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A CAR DOOR REINFORCEMENTS
ON PASSIVE SAFETY IN A SIDE IMPACT**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

The urgent problem today is to ensure passive vehicle safety in a side impact. The paper presents the developed rational finite element models (FEM) of the body and pillar, on which the results are obtained with acceptable accuracy. The article discusses increasing the energy intensity of the car body with the help of additional reinforcing elements in the door cavity. Review of decisions were carried out using computer simulation in the LS-DYNA software product. The pole side impact regulated by UNECE Regulation № 135 was considered as the loading mode. The choice of sections of the door reinforcements was carried out by analyzing publications, and three own options were proposed, of which two more efficient ones were selected and tested as part of the body. The efficiency criterion was the energy intensity, which determines the penetration of the inner surface of the cabin door. All of the considered options for door reinforcements have different efficiency, increasing the energy consumption of the system from 5 to 19 %. The most effective option for reinforcing the door is a round pipe with an inner rhombus filled with foam aluminum.

Key words: a body, a pillar, passive safety, a door, foam aluminum, a finite element model, energy intensity, a side impact.

УДК 629.113.06 + 625.711

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_98

А.М. Умирзоков¹, К.Т. Мамбеталин², С.С. Сайдуллозода^{1,2}, А.Л. Бердиев¹

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ В ГОРНЫХ КАРЬЕРАХ

¹Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими*Душанбе, Таджикистан*²Южно-Уральский государственный университет*Челябинск, Россия*

Приведена оценка значимости карьерных автомобильных дорог для эффективного функционирования системы «Водитель-автомобиль-дорога-среда» (ВАДС) в горной местности Республики Таджикистан в условиях строительства гидротехнических сооружений. Рассматриваются вопросы эффективности горных карьерных дорог на высотах от 1000 до 1200 м н.у.м. Дана оценка засорения поверхности горной карьерной дороги гравийными и галечниковыми частицами, проанализировано соответствие параметров дороги требованиям существующих нормативно-технических документов. Проведен гранулометрический анализ гравийных и галечниковых частиц, выпавших из кузовов автомобилей-самосвалов и засоривших поверхность дорожного полотна, методом просеивания на ситах. Установлены причины и следствия засорения поверхности дороги гравийными и галечниковыми частицами; представлены результаты статистической обработки удельной плотности их распределения на единицу площади.

Ключевые слова: автомобиль-самосвал, автомобильная дорога, горные условия, неровности дороги, автомобильная шина, геометрия дороги, гранулометрический анализ, эффективность.

Введение

В системе «Водитель – автомобиль – дорога – среда» (ВАДС) при прочих равных условиях автомобильная дорога вступает доминирующим элементом (фактором), обеспечивающим эффективность ее функционирования. Это вдвойне значимо для условий эксплуатации большегрузных автомобилей в горных карьерных дорогах. Значительный энергообмен и силовое взаимодействие в данной системе осуществляется между двумя элементами – колесом и дорогой. Эффективность функционирования системы ВАДС [1] тесно связана с организацией энергообмена (характером протекания и динамикой) и соответствующими параметрами движения автомобиля (скоростью и направлением движения, моментом на колесе, ускорением, торможением, соотношением установившегося или неустановившегося режимов движения и т.д.) Эффективность преобразования энергии между колесом автомобиля и дорожным полотном (преобразования с минимальными затратами энергии на скольжение колес о поверхности дороги, преодоление сопротивлений движению, ускорению и торможению, на различные маневры и т.д.) можно считать важным определяющим фактором эффективности функционирования системы ВАДС в целом.

Известно, что затраты на сооружение и содержание технологических автодорог карьеров варьируют в пределах 5-8 % от затрат на автомобильную транспортировку горной массы, или 1,5-4,0 % от полной стоимости открытой добычи. При этом не менее двух третей от них идет на содержание и ремонт автомобильной дороги [2]. Однако, из-за суровости условий эксплуатации, транспортно-эксплуатационные качества технологических автодорог на строительстве горных гидротехнических сооружений, постоянно поддерживать на уровне, отвечающим требованиям нормативно-технических документов, не представляется возможным. Поверхность автомобильной дороги на карьерах строительства гидротехнических сооружений в горных условиях обычно засыпаны гравийными частицами, сформировавшимися из мелко дробленных вскрышных пород и галечников.

Постановка задачи

Карьерным автомобильным дорогам на строительстве гидротехнических сооружений в горных условиях присущи следующие особенности:

- большинство участков засыпаны дресвяными и щебенистыми обломками горных пород, выпавшими из кузова самосвала на поверхность дороги, причем распределение частиц имеет вероятностный характер (рис. 1);
- наибольшая удельная плотность дресвяных и щебенистых обломков горных пород, приходящаяся на единицу площади дороги, наблюдается на поворотах, подъемах, участках с неровностями, колеях;
- на обочинах имеются скопление камней (крупных, средних и мелких), дресвяных и щебенистых обломков горных пород;
- несоответствие поперечного профиля дорог требованиям СНиП, частые обратные уклоны и вогнутость формы, способствующие скоплению дресвяных и щебенистых обломков горных пород в подобных участках;
- дресвяные и щебенистые обломки горных пород на поверхности карьерных дорог разбросаны на твердую основу дорожного полотна, что приводит к увеличению интенсивности отказов и сокращению ресурса автомобильных шин.



Рис. 1. Фрагмент горной карьерной автодороги

Перечисленные характерные особенности карьерных автомобильных дорог на строительстве гидротехнических сооружений в горных условиях приводят к снижению эффективности функционирования системы ВАДС. Дорожные поверхности горных карьерных автодорог засоряются, главным образом, гравийными (размером 2...50 мм) и галечниковыми (размером 10...200 мм) частицами различной породы и форм, получаемых в результате разрушения горной породы при вскрышных работах и загрузке грунта. Основу горного гравия составляют шероховатые частицы неправильной формы, перемешанные с очень неоднородным составом и множеством загрязнений (глина, пыль). Гранулометрический анализ дресвяных и щебенистых обломков горных пород, выпавших из кузова самосвала на поверхность дороги, произведен методом просеивания на ситах [3-5] (рис. 2).

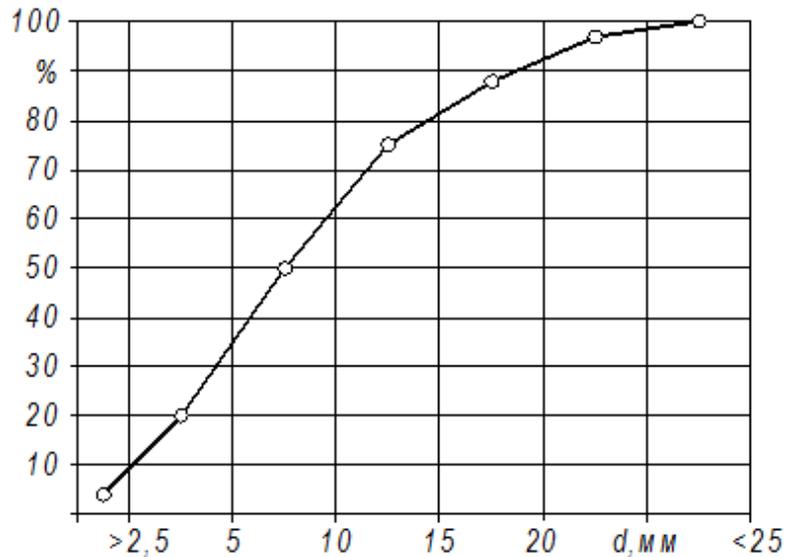


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа щебня, выпавшего из кузова самосвала на поверхность дороги методом просеивания на ситах

Состав гравия, разрабатываемого и используемого на строительстве гидротехнических сооружений в горных условиях, включает преимущественно зерна гранита и других пород. Можно выделить две основные причины засорения поверхности дороги гравийными и галечниковыми частицами: естественное и за счет их выпадения из кузова автомобиля-самосвала при перевозке горной породы.

Причинами интенсивности выпадения гравийных и галечниковых частиц из кузова карьерного самосвала на поверхность дороги служат:

- характеристика перевозимого грунта (порода, состав и структура);
- несовершенство конструкции автомобиля и его кузова;
- чрезмерный динамизм режима движения карьерного самосвала (режимы ускорения, торможения, поворотов, остановок и трогания с места);
 - частота и характер выполнения маневров;
 - уровень загрузки кузова самосвала грунтом;
 - скоростной и нагрузочной режимы движения автомобиля;
 - сложность геометрии дороги в плане и профиле;
 - маршрут движения;
 - природно-климатические условия;
 - мастерство управления автомобилем;
 - состояние дороги.

Другой характерной особенностью горной карьерной автомобильной дороги является скопление камней и гравия на обочине дороги, которые способствуют боковому разрыву шин автомобиля и, как следствие, снижению надежности автомобиля. Выпавшие из кузова самосвала и разбросанные по твердой поверхности дорожного полотна древесные и щебенистые обломки горных пород вдавливаются в тело протектора и служат причиной ускоренного износа и механического повреждения шины автомобиля (рис. 3). Засорение поверхности дорожного полотна древесными и щебенистыми обломками горных пород еще более усугубляют и без того сложные и суровые условия передвижения автомобиля по горной карьерной дороге, снижая эффективность функционирования системы ВАДС.



Рис. 3. Механические повреждения автомобильной шины на горной карьерной дороге, засоренных древесными и щебенистыми обломками горных пород

В горных условиях Республики Таджикистан карьерным автодорогам на строительстве ГТС присущи ровность (или неровность) дороги, которая характеризуется наличием неровностей или отклонений фактической поверхности от проектной, вызывающих при проезде автомобиля колебания его колес и кузова [6]. На таких дорогах встречаются продольные и поперечные виды неровности. Из поперечной неровности, наряду с макронеровностью (с длиной волны 5 м и более) и шероховатостью (с длиной волны до 10 см), широко распространены и микронеровности дорожной поверхности, состоящие из неровностей длиной от 10 см до 5 м, вызывающие значительные колебания автомобиля на подвеске [7]. Неровности поверхности карьерной дороги измерялись в условиях строительства Рогунской ГЭС при помощи универсальной дорожной рейки РДУ «Кондор» (рис. 4), согласно требованиям существующих стандартов и других нормативно-технических документов [8].

Все виды неровности дороги так или иначе влияют на функционирование системы ВАДС. В то же время, микронеровности оказывают существенное влияние на показатели эффективности функционирования системы ВАДС. В формировании эффективности функционирования системы ВАДС большое значение отводится засоренности поверхности дороги инородными предметами, такими как крупные или мелкие камни, древесные и щебенистые обломки горных пород, металлические и др. предметы. На отдельных участках карьерных дорог строительства ГТС в горных условиях Республики Таджикистан количество гравийных и галечниковых частиц, выпавшего из кузова самосвала, превышает 120 шт/м², с общим объемом, достигающим до 400-500 см³/м², и общей массой, равной 1,0-1,2 кг/м².

Удельное количество гравийных и галечниковых частиц на поверхности дороги, отнесенное на 1 км пути N_n средней шириной проезжей части, равной 12 м, рассчитывается по выражению (1):

$$N_n = S_d \cdot \rho_e, \text{шт} / \text{км}, \quad (1)$$

где S_d – площадь километра дороги, м². ρ_e – удельная плотность распределения гравийных и галечниковых частиц на поверхности дороги, отнесенных к 1 м² площади, шт/м².

При средней ширине проезжей части карьерной дороги, равной 12 м [9,10], получим $S_d = 1000 \cdot 12 = 12000 \text{ м}^2$.



Рис. 4. Измерение неровностей карьерной дороги при помощи универсальной дорожной рейки РДУ «Кондор»

По результатам измерений удельная плотность распределения гравийных и галечниковых частиц на поверхности дороги ρ_z , меняется в широких пределах ($\rho_z = 10 \dots 122$ шт/м²). При этом среднее значение названного показателя равняется $\rho_{z,ср} = 64,4$ шт/м² (рис. 5).

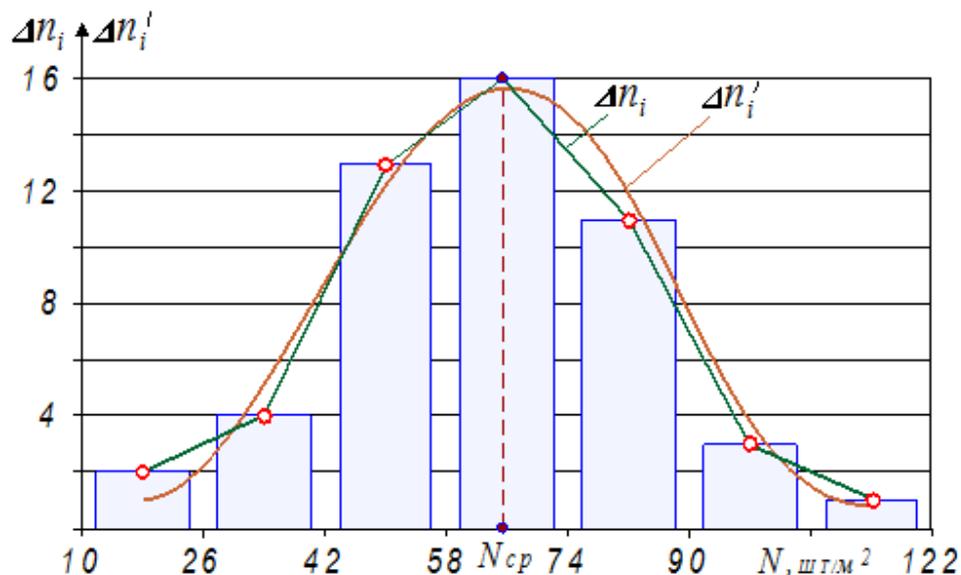


Рис. 5. Графики результатов статистической обработки удельной плотности распределения гравийных и галечниковых частиц на поверхности дорожного полотна:

$$N_{ср} = 64,4 \text{ шт/м}^2; \sigma = 20,36 \text{ шт/м}^2; \nu = 31,6 \%$$

Удельное количество гравийных и галечниковых частиц на поверхности карьерной дороги N_k длиной в 1 км, контактируемых при движении автомобиля-самосвала БелАЗ-7540В с протектором шины типоразмера 18.00-25 определяется из выражения (2):

$$N_k = S_k \cdot \rho_z = B_{ш} \cdot L \cdot \rho_z, \text{шт/км} \quad (2)$$

где S_k – площадь контакта протектора шины на пути в 1 км, м²; $B_{ш}$ – ширина протектора шины, мм. Для шины типоразмера 18.00-25 $B_{ш} = 500$ мм = 0,5 м [11,12]; L – длина пути, км. В данном случае $L = 1$ км; ρ_z – удельная плотность распределения гравийных и галечниковых частиц на единицу площади поверхности дороги, шт/м².

Удельное количество гравийных и галечниковых частиц на поверхности карьерной дороги N_k длиной в 1 км, контактируемых с протектором шины типоразмера 18.00-25 при движении автомобиля-самосвала БелАЗ-7540В, эксплуатируемого в условиях строительства ГТС в горных условиях, варьирует в пределах от 5 000 до 64 400 шт/км, а среднее значение показателя равняется 32 200 шт/км.

При длине плеча перевозки 5 км и средней ширины дороги 12 м общая площадь проезжей части дороги составляет 50 тыс. м². При среднем значении плотности распределения щебня на поверхности дорожного полотна 64,4 шт/м² можно предполагать, что количество гравийных и галечниковых частиц на поверхности дороги, контактируемых с протектором шины автомобиля БелАЗ-7540В (марки 18.00-25 шириной 500 мм), превышает 32 000 шт/км.

Основными факторами, которые должны быть приняты во внимание для оценки эффективности карьерной автомобильной дороги в горных условиях, являются: засоренность и неровность поверхности дороги, скопление камней, гравия и галечниковых частиц на обочине дороги и др. Из-за разнообразия многочисленных факторов, формирующих эффективность карьерной автомобильной дороги, не представляется возможным учитывать значимость каждого отдельного фактора. Для оценки эффективности карьерной автомобильной дороги предлагается обобщающий динамический коэффициент $k_{эд}$, учитывающий совместное (комплексное) влияние многочисленных факторов. Обобщающий динамический коэффициент для оценки эффективности функционирования карьерной автомобильной дороги в горных условиях определяется из выражения (2):

$$k_{эд} = 1 - k_d, \quad (3)$$

где k_d – динамический коэффициент, учитывающий сложность условий эксплуатации, значение которого зависит от состояния дорожного полотна, геометрии дороги, интенсивности движения, соотношения установившегося и неустойчивого режимов движения и т.д. (для условий строительства Рогунской ГЭС можно принимать $k_d = 0,12-0,13$) [13].

Следовательно, эффективность карьерной автомобильной дороги $\mathcal{E}_{ад}$ можно определять из выражения (4):

$$\mathcal{E}_{ад} = \mathcal{E}_A \cdot k_{эд} = \mathcal{E}_A \cdot (1 - k_d) = \mathcal{E}_{двс} \cdot \eta_{тр} \cdot (1 - k_d), \quad (4)$$

где \mathcal{E}_A – эффективность автомобиля; $\mathcal{E}_{двс}$ – эффективность ДВС; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии.

Многолетними исследованиями, проведенными сотрудниками технологического парка Таджикского технического университета им. М.С Осими, подтверждается хорошая согласованность результатов экспериментальных исследований с расчетными данными по предложенной математической модели.

Выводы

1. Исследованы характерные особенности карьерных автомобильных дорог на строительстве гидротехнических сооружений в горных условиях, а также причины интенсивности засорения поверхности дороги гравийными и галечниковыми частицами.

2. Представлены результаты гранулометрического анализа дресвяных и щебенистых обломков горных пород, выпавших из кузова карьерного самосвала на поверхность дороги, проведенного методом просеивания на ситах.

3. По результатам статистической обработки результатов измерений установлены удельные плотности распределения гравийных и галечниковых частиц на поверхности дороги на 1 м² площади и на 1 км пути.

4. Из-за разнообразия многочисленных факторов, влияющих на эффективность карьерной автомобильной дороги, и сложности учета их значимости предложен обобщающий динамический коэффициент для учета совместного влияния факторов.

5. Разработана математическая модель оценки эффективности карьерной автомобильной дороги в горных условиях.

Библиографический список

1. Сайдуллозода, С.С. Оценка надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда (ВАДС) в горных условиях / С.С. Сайдуллозода, К.Т. Мамбеталин, А.М. Умирзоков, У.М. Маллабоев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т 20. – №1 – С. 38-46. – DOI:10.14529/engin200105.
2. Лень, Ю.И. Карьерные автодороги - их значимость и проблемы совершенствования / Ю. И. Лень, Ю. В. Стенин, А. Г. Колчанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 3. – С. 103-108.
3. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микро агрегатного состава (взамен ГОСТ 12536 – 79). – М.: Стандарт-информ, 2019.
4. ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90) Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 11с.
5. Определение гранулометрического состава дисперсных материалов: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Брус И.Д.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 12 с.
6. ГОСТ 30412-96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий. – М., 1996. – 9 с.
7. **Леонович, И. И.** Диагностика автомобильных дорог: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» / И. И. Леонович, С. В. Богданович. – Минск: БНТУ, 2012. – 226 с.
8. Оценка ровности конструктивных слоёв дорожной одежды универсальной дорожной рейкой: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Технология и организация работ по строительству дорожной одежды» / сост. Е.В. Андреева. – Омск: СИБАДИ, 2011. – 16 с.
9. ГОСТ Р 52399 – 2005. Геометрические элементы автомобильных дорог. – М.: Стандарт-информ, 2006.
10. СНиП 3.06.03-85. Автомобильные дороги / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 112 с.
11. ГОСТ 26585-2003. Шины пневматические крупногабаритные и сверх крупногабаритные для внедорожных карьерных автомобилей. Технические условия (взамен ГОСТ 26585 – 85). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 35 с.
12. СНиП 2.05.07- 91* «Промышленный транспорт» / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. -112 с.
13. **Умирзоков, А.М.** Моделирование расхода топлива большегрузными автомобилями в горных условиях эксплуатации / А.М. Умирзоков, К.Т. Мамбеталин, С.С. Сайдуллозода, Ш.К. Самиев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева – 2020. – № 2 (129). – С. 140-149.

*Дата поступления
в редакцию: 13.12.2020*

A.M. Umirzokov¹, K.T. Mambetalin², S.S. Saydulozoda^{1,2}, A.L. Berdiev¹

EFFICIENCY ASSESSMENT OF ROAD OPERATION IN THE MOUNTAIN QUARRIES

¹Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe

²South Ural State University, Chelyabinsk

Purpose: Substantiation and assessment the efficiency of road operation in the mountain quarries.

Design / methodology / approach: The work was carried out on the basis of the results of many years of research in the field of improving the efficiency of the DVRS system in the context of the construction of hydraulic structures in the mountainous regions of the Republic of Tajikistan, and in particular the assessment of the importance of career highways in the formation of the efficiency of the functioning of the driver-vehicle-road-environment system (DVRS) in the mountainous conditions of the Republic of Tajikistan, more precisely, in the conditions of the construction of hydraulic structures using the methods and techniques of mathematical statistics and modeling.

Conclusions: the characteristic features of quarry roads in the construction of hydraulic structures in mountainous conditions, as well as the causes of clogging intensity the road surface with gravel and pebble particles, are Analyzed. The article presents a granulometric analysis of crushed and gravelly rock fragments that fell from the body of a dump truck to the road surface, produced by sieving on sieves. Based on the results of statistical processing of the measurement results, the specific densities of the distribution of gravel and pebble particles on the road surface, assigned to 1 m² of area and 1 km of track, were established. Due to the diversity of the influence of numerous factors that shape the efficiency of a career highway and the complexity of accounting for the significance of each individual factor, a generalizing dynamic coefficient is proposed to account for the combined influence of factors. A mathematical model for evaluating the efficiency of a quarry highway in mountain conditions has been developed.

Limitations / study implications: the limitations related to this study are as follows: the surface of the highway in hydraulic engineering quarries is usually covered with gravel particles formed from finely crushed overburden and pebbles that are unevenly distributed along the length of the highway. The surface unevenness of the quarry road on various routes varies quite widely. The transport and operational qualities of quarry roads during the construction of the Rogun HPP were measured not along the entire length of the track, but on its individual sections, which may lead to some distortions of the research results.

Originality / value: Due to the variety of numerous factors that shape the efficiency of a career road, it is not possible to consider the importance of each individual factor. To assess the efficiency of a career road, a generalizing dynamic coefficient k_{ED} is proposed, taking into account the joint (complex) influence of numerous factors.

Key words: dump truck, vehicle road, mountain conditions, road unevenness, vehicle tire, road geometry, granulometric analysis, efficiency.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Аристов Антон Олегович – доцент Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», канд. техн. наук;
batan-87@mail.ru

Галкина Екатерина Дмитриевна – программист ООО «Харман»;
ekaterinagalka@gmail.com

Гордеев Максим Михайлович – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
maximgrdv@gmail.com

Елисеев Михаил Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
eliseevmic@mail.ru

Кобляков Дмитрий Александрович – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
d.koblyakov@gmail.com

Мазунова Лариса Николаевна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
matematixx@mail.ru

Мухин Алексей Валерьевич – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
myhin-aleksey@yandex.ru

Мучник Илья Борисович – профессор Ратгерского государственного университета, (Нью-Джерси), канд. техн. наук,
ilyamuchnik@ymail.com

Тимофеева Ольга Павловна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
optimofeeva@mail.ru

Халайджи Алексей Константинович – аспирант, ассистент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;
aleksei_halaidzh@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Баринов Александр Александрович – инженер-конструктор 1 категории Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
lxbarinov92@mail.ru

Бородин Сергей Сергеевич – зам. директора Института ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
borodinss@mail.ru

Коновалов Илья Адильевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
iliakonowaloff@yandex.ru

Легчанов Максим Александрович – заместитель директора Института ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
legchanov@nntu.ru

Макаров Михаил Александрович – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
makarovmis@yandex.ru

Чесноков Александр Андреевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
1997chesnokov@gmail.com

Хробостов Александр Евгеньевич – директор Института ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
khrobostov@nntu.ru

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ:
ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ,
ПРОИЗВОДСТВО**

Абдулов Сергей Владимирович – ведущий инженер-программист АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения» (г. Курган);
sincopa2004@mail.ru

Беляков Владимир Викторович – начальник УНИИИР Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р техн. наук;
belyakov@nntu.ru

Бердиев Алишер Лугмонович – старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими,
alikh8405@inbox.ru

Бутин Данила Александрович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева;
danila.butin@nntu.ru

Вашурин Андрей Сергеевич – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, канд. техн. наук;
Vashurin@nntu.ru

Герасин Андрей Владимирович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева;
andrey.gerasin@nntu.ru

Зузов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук;
zuzvalery@rambler.ru

Мамбеталин Кахим Токушевич – профессор Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета ЮУрГУ), д-р техн. наук;
kahim2010@mail.ru

Ненашев Павел Николаевич – ведущий инженер-программист АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения» (г. Курган);
pasteer@mail.ru

Сайдуллозода Сайвали Сайдулло – аспирант Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета ЮУрГУ);
saivali.saidullo@mail.ru

Сергиевский Сергей Андреевич – руководитель НИЛ «Интеллектуальные транспортные системы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
s.sergievskiy@nntu.ru

Сулегин Дмитрий Андреевич – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;
d_sulegin@mail.ru

Тараторкин Александр Игоревич – научный сотрудник отдела механики транспортных машин Института машиноведения Уральского Отделения РАН (г. Екатеринбург);
alexander_tar@mail.ru

Тумасов Антон Владимирович – директор Института транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
anton.tumasov@gmail.com

Умирзоков Ахмад Маллабоевич – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук;
ahmad.umirzokov@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**

№ 1 (132)

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: 11.03.2021. Дата выхода в свет 24.03.2021. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 7,00. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
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