

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

№ 2 (133)

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. №2(133).
– 128 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, 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 (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

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

УЧРЕДИТЕЛЬ

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

№ 2 (133)

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, 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 (Executive Secretary)

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 |
| Ильичева М.Н. Об особенностях управления процессом доставки дисперсной воды в очаг лесного пожара | 7 |
| Карпычев В.Ю., Шальнова Ю.П. Концептуальная модель больших данных | 16 |
| Махонина Ю.В., Неймарк Е.А. Решение задачи раскроя-упаковки с помощью комбинированного эволюционно-генетического алгоритма | 24 |
| Мухин А.В. Математическое моделирование процесса стабилизации жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках | 32 |
| ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ | 43 |
| Басов А.А., Соколова Г.М., Яшина А.Н. Компьютерное моделирование натурального эксперимента по определению характеристик нейтронов | 43 |
| Худяков И.С., Власичев Г.Н. Обзор современных тенденций и основных конструктивных решений для реакторных установок малой мощности | 50 |
| МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО | 60 |
| Бутин Д.А., Сергиевский С.А. Модель динамического воздействия поршневого двигателя внутреннего сгорания для расчетного анализа вибрации автомобиля | 60 |
| Верещагин С.Б. Натурные ходовые испытания для изучения климатических факторов, воздействующих на водителя в условиях высоких температур | 68 |
| Евсеев К.Б. Разработка иерархии эксплуатационных свойств транспортных средств для перевозки тяжелых неделимых грузов в условиях Крайнего Севера | 74 |
| Куклина И.Г., Дёмина Е.Е., Мокеров Д.С. Математическая модель работы шнека специальных машин – длинного межопорного ротора | 85 |
| Мазунова Л.Н., Дубкова М.А., Беляков В.В., Бушуева М.Е., Макаров В.С., Ерофеева Л.Н. Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанного на применении многокритериальной оптимизации | 102 |
| Шаповалов С.В. Система активной безопасности на силовых факторах в контакте колес с опорной поверхностью | 113 |
| НАШИ АВТОРЫ | 124 |

CONTENTS

| | |
|---|----------------|
| INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS | 7 |
| Ilyicheva M.N. On features of managing the process of dispersed water delivery to focus of forest fire | 7 |
| Karpychev V.Y., Shalnova J.P. A Conceptual model of big data | 16 |
| Makhonina Y.V., Neymark E.A. Solving the cutting-stock problem using a hybrid evolutionary-genetic algorithm | 24 |
| Mukhin A.V. Mathematical modeling of a rigid rotor stabilization process, rotating in electromagnetic bearings | 32 |
| ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES | 43 |
| Basov A.A., Sokolova G.M., Yashina A.N. Computer simulation of a full-scale experiment to define the characteristics of neutrons | 43 |
| Khudyakov I.S., Vlasichev G.N. Overview of modern trends and main design solutions of small nuclear power reactors | 50 |
| MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION | 60 |
| Butin D.A., Sergievsky S.A. Dynamic model of an internal combustion engine for calculation and analysis car vibration | 60 |
| Vereshchagin S. B. Full scale sea trials to study climate factors affecting the driver in high temperature conditions | 68 |
| Evseev K.B. Development of a hierarchy of operational properties of vehicles for the transportation of heavy indivisible cargo in the Far North | 74 |
| Kuklina I.G., Demina E.E., Mokerov D.S. Mathematical model of the auger operation of special machines of long inter-rotor | 85 |
| Mazunova L.N., Dubkova M.A., Belyakov V.V., Bushueva M.E., Makarov V.S., Erofeeva L.N. Developing a method of calculating a mobility index for passenger cars based on the application of multi-objective optimization | 102 |
| Shapovalov S.V. Active safety system on power factors in contact of wheels with the support surface | 113 |
| AUTHORS | 124 |

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 517.927.4: 614.841.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_7

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОСТАВКИ ДИСПЕРСНОЙ ВОДЫ В ОЧАГ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

М.Н. ИльичеваORCID: 0000-0002-1046-3258 e-mail: poman99@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

С целью оптимизации управления тушением лесного пожара детально проанализированы свойства капля воды различного размера. Осуществлено численное решение двух ключевых задач: испарения каплей воды при движении в нагретой среде и налипания их на элементы растительности. При моделировании вертикального движения и испарения капли учитывались силы тяжести, лобового сопротивления и трения, а также теплообмен с окружающей средой. Принималось, что интенсивность теплообмена пропорциональна площади. При моделировании процесса налипания капли на элементы растительности проведены численные эксперименты и сделана оценка доли дисперсных частиц, которые остаются на препятствии при его обтекании вместе с газовым потоком. Представлены результаты численного моделирования, выявлено, что логит вероятности столкновения дисперсной частицы с элементом растительности находится в зависимости, близкой к линейной от логарифма ее размера. Предполагается, что частицы воды не влияют на скорость газовой фазы, а их движение обусловлено лобовым сопротивлением и инерцией. Проведена оценка проницаемости лесной растительности для дисперсной воды. Показано, что более крупные частицы способны преодолеть область высоких температур, но хуже обтекают препятствия. Использование капсул в активной оболочке, позволяющее преодолеть конвективную колонку и осуществить более эффективное тушение лесного пожара, является прорывной технологией доставки дисперсной воды в зону уязвимости пожара и требует поиска оптимальных режимов сброса капсул.

Ключевые слова: численное моделирование, дисперсная вода, аэродинамика, термодинамика, тушение лесного пожара.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильичева, М.Н. Об особенностях управления процессом доставки дисперсной воды в очаг лесного пожара // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2. С. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_7

DISPERSED WATER DELIVERY INTO A FOREST FIRE EPICENTER: FEATURES OF THE PROCESS CONTROL

M.N. PyichevaORCID: 0000-0002-1046-3258 e-mail: poman99@mail.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In order to optimize the management of forest fire extinguishing, properties of water droplets of various sizes are analyzed in detail. A numerical solution of two key problems is carried out: evaporation of water droplets while moving in a heated environment, and sticking therefore to vegetation elements. When modeling the droplet vertical movement and evaporation, forces of gravity, drag, and friction, as well as heat exchange with the environment, were taken into account. It was assumed that the heat exchange rate was proportional to the area. When modeling the process of droplet sticking to vegetation elements, numerical experiments were performed, and a portion of dispersed particles that remain on the obstacle when it is flown along with the gas flow, was estimated. Numerical modeling results are presented, and it is revealed that the logit of the probability of a dispersed particle colliding with a vegetation element is dependent on the logarithm of its size. It is assumed that water particles do not affect the velocity of the gas

phase, and their movement is due to drag and inertia. The permeability of forest vegetation for dispersed water was estimated. It is shown that larger particles are able to overcome the high temperature region, but they flow past obstacles badly. Use of capsules in active shells, which allows them to overcome the convective column and more effectively extinguish forest fires, is a breakthrough technology for dispersed water delivery to a fire vulnerability zone, and it requires the capsules to be discharged in optimal modes.

Key words: numerical modeling, dispersed water, aerodynamics, thermodynamics, forest fire extinguishing.

FOR CITATION: Ilyicheva M.N. Dispersed water delivery into a forest fire epicenter: features of the process control. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №2. P. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_7

Введение

Рост числа и масштабов лесных пожаров в России [1] и за рубежом [2] показывает, что существующие современные способы борьбы с ними не всегда эффективны. Большое значение имеет выбор средств тушения, наиболее доступным, эффективным и экологичным из которых остается вода. Она поглощает тепловую энергию при нагревании и испарении, блокируя доступ кислорода в зону горения за счет образующегося водяного пара. При тушении лесных пожаров в труднодоступных и отдаленных местах авиационные технологии часто становятся единственным способом ликвидации горения. Однако высокая стоимость и малая производительность [3,4] остаются существенными недостатками авиационного способа пожаротушения. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что простой сброс большого объема воды малоэффективен: значительное ее количество уносится конвективной колонкой. Оставшаяся часть прекращает горение на поверхности, но высокая температура быстро высушивает, и горение возобновляется. Математическое моделирование подтверждает эти факты [5]. Способ и точность подачи воды в зону уязвимости существенно влияет на эффективность тушения [6-8]. Упрощенная модель тушения лесного пожара на основе сброса воды представлена в работе [6]. Предполагается, что вся вода пролетает сверху вниз, а при попадании в нагретую среду происходит ее испарение и снижение температуры среды до точки кипения воды. В работе [7] исследуется мгновенная подача воды в определенную точку без потерь с учетом ее нормального пространственного распределения. Тушение лесного пожара при подаче воды сверху на основе псевдотрехмерной постановки рассмотрено в работе [8]. В работах [6-9] не изучены потери воды, связанные с ее уносом и налипанием на элементы растительности. Одним из способов повышения эффективности тушения лесного пожара является использование диспергированной воды. Современные средства видеорегистрации и визуализации позволили получить точные экспериментальные данные по свободному падению с высоты различных объемов воды. При свободном падении ядра воды с высоты формируется облако мелкодисперсных частиц, которое под воздействием аэродинамических сил растет в вертикальном и горизонтальном направлении [10]. Дисперсная вода оседает, испаряется и при различных условиях может слипаться, разрушаться, стекать и сдуваться ветром.

Моделирование всего комплекса процессов динамики полидисперсной фазы воды при тушении лесного пожара является сложной задачей. Поэтому считаем, что капли представляют собой водяной туман, не имеют инерции и бесконечно малы по размеру. В данной работе представлены решения двух задач. Первая из них – моделирование динамики дисперсных частиц воды конечного размера при движении в пористом слое легко горючих материалов. В задаче определяются характеристики движения и испарения дисперсной воды в слое растительности, а также ее оседание на элементы легко горючих материалов. Вторая задача – двумерное моделирование налипания дисперсных частиц на тело в форме прямоугольника, обтекаемое газодисперсным потоком. В задаче оценивается доля воды, которая налипает на элементы растительности, не достигая очага пожара.

Математическая постановка задачи о движении капли в форме шара в нагретой среде

Рассматривается вертикальное падение шарообразной капли воды в неподвижной нагретой среде по вертикали под действием сил тяжести, трения и сопротивления. Капля движется вдоль оси z вниз. В результате испарения меняются масса и радиус капли. В задаче вычислена оценка количества энергии, поглощаемой каплей по пути движения. Полагаем, что размер капли меняется только в результате испарения в нагретой среде. Для упрощения пренебрегаем разрушением капли на части и слипанием капель.

Для моделирования динамики капли в пространстве используются уравнение движения капли в форме (1):

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{1}{m} (F_g + F_{fr} + F_{drag}), \\ \frac{dz}{dt} = u, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время, с; u – скорость капли, м/с; z – координата капли, м; m – масса, кг; $F_g = mg$ – сила тяжести, Н; $F_{fr} = -6\pi\mu u$ – сила трения, Н; $F_{drag} = -C_F \frac{\rho u^2}{2} S_{pr}$ – сила лобового сопротивления, Н; μ – динамическая вязкость воздуха; $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды; $S_{pr} = \pi r^2$ – площадь проекции капли на плоскость (для вычисления аэродинамического сопротивления), м²; $C_F = 0,47$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с².

Для описания теплообмена капли со средой и изменения массы капли будем использовать дифференциальные уравнения, исходящие из предположения, что при температуре окружающей среды, меньшей температуры частицы ($T_p < T_{evap}$), энергия тратится на нагрев капли, а если они равны ($T_p = T_{evap}$), энергия тратится на расход массы капли до полного исчерпания массы (2):

$$\begin{aligned} \frac{dT_p}{dt} &= \begin{cases} \frac{S_{sur} (A + Bu + Cu^2) (T_m - T_p)}{mc_p}, & T_p < T_{evap} \\ 0, & T_p = T_{evap} \end{cases}, \\ \frac{dm}{dt} &= \begin{cases} 0, & T_p < T_{evap} \\ -\frac{S_{sur} (A + Bu + Cu^2) (T_m - T_p)}{q}, & T_p = T_{evap} \end{cases}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $S_{sur} = (A + Bu + Cu^2) (T_m - T_p)$ – мощность подвода тепла к капле от окружающей среды [5], Вт; $(A + Bu + Cu^2)$ – интенсивность теплообмена, Вт/(м²К), а A, B, C – коэффициенты полиномиального множителя скорости теплообмена с каплей в зависимости от ее скорости; $S_{sur} = 4\pi r^2$ – площадь поверхности капли (для моделирования теплообмена), м²; $T_{evap} = 371$ К – критическое значение для испарения капли; T_m – заданная температура окружающей среды, К; $c_p = 4200$ Дж/(К·кг) – теплоемкость воды; $q = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота парообразования воды.

Изменение массы капли приводит к изменению ее объема $V = \frac{\rho}{m}$ и, как следствие, ее радиуса $r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}V}$. Предполагается, что форма капли остается шарообразной. Для замыкания данной постановки будем считать, что капля заданной температуры в начальный момент неподвижна, т.е., при $t=0$: $T_p=T_e$, $u=0$, $x=0$, $m=m_0$.

При решении задачи о движении шарообразной капли воды в неподвижной нагретой среде используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Особенностью данной задачи является качественное изменение динамики процессов в момент достижения каплей температуры кипения воды. Для уточнения времени этого достижения и времени полного испарения капли используется метод дихотомии. Задача не является жесткой, и использование таких методов, как метод Гира [11], не требуется.

Результаты задачи о движении капли в форме шара в нагретой среде

В табл. 1 показаны масштабы времени нагрева и испарения капель разного размера, а также пройденное расстояние. Сначала происходит нагрев капли, затем – испарение капли. При малом размере ее скорость движения является небольшой, и удельная поверхность увеличивается, что способствует более быстрому испарению и поглощению энергии окружающей среды. В зависимости от размера частицы воды, при движении через нагретую среду возможно ее испарение, также она может не достичь очага пожара, пролететь через него или задержаться элементами легко горючих материалов.

Таблица 1.

Масштабы времени нагрева, испарения капли и пройденное расстояние

Table 1.

Measurement of heating time, droplet evaporation, and distance traveled

| Начальный размер частицы, r_0 , 10^{-6} м | Длительность нагрева капли от 300 К до 373 К, с | Продолжительность испарения капли, с | Длина траектории капли до ее испарения z_0 , м |
|---|---|--------------------------------------|--|
| 53 | 0,1181 | 3,0055 | 0,1768 |
| 530 | 1,1807 | 30,0546 | 78,2882 |

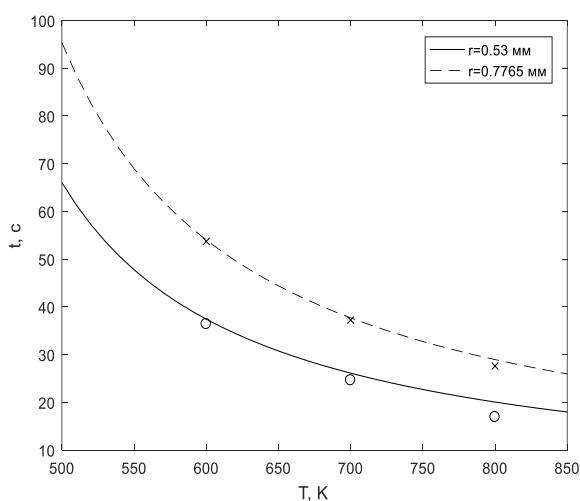


Рис. 1. Зависимость времени испарения капли от температуры окружающей среды и размера капли и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [12]

Fig. 1. Droplet evaporation time dependence on the ambient temperature and the droplet size, and the comparison of the calculation results with the experimental data

На рис. 1 показана зависимость времени испарения капли от температуры окружающей среды и размера капли. Результаты расчетов представлены в сравнении с экспериментальными данными [12]. Отклонение численных значений от экспериментальных данных не превышает 20 %.

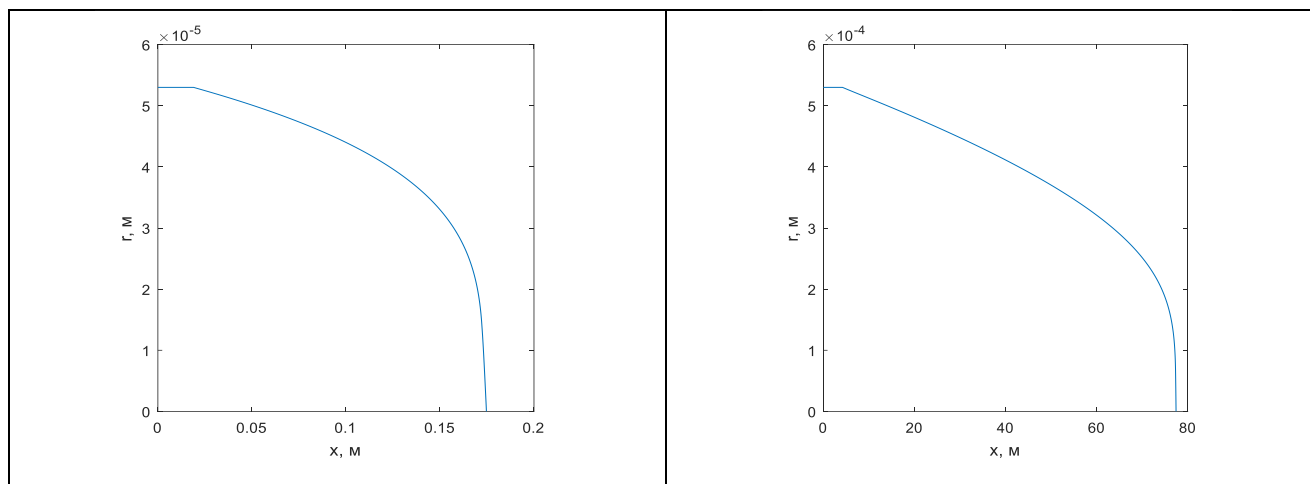


Рис. 2. Динамика изменения радиуса капли при ее движении в среде с температурой 600 К

Fig. 2. Droplet radius dynamics as it moves in an environment with a temperature of 600 K

На рис. 2 показана динамика изменения радиуса и объема капли при ее падении в высокотемпературной среде. На оси абсцисс показано отношение текущей координаты капли к координате, где происходит полное испарение. Сплошная линия соответствует капле с начальным диаметром 53 мкм, а штриховая – 530 мкм. Для капли большего размера уменьшение объема близко к линейному. Это означает, что количество тепла, поглощаемое каплей, приблизительно одинаково по всему пути. Маленькие капли отдают больше тепла в конце пути ввиду того, что сила трения способствует замедлению движения, что увеличивает количество поглощаемого тепла в этой области. Из табл. 1 и рис. 1, 2 видно, что крупные капли не способны интенсивно поглощать тепло в полете, а мелкие будут быстро испаряться при попадании в нагретую среду. Частицы малого размера, имеющие низкую инерцию и высокую скорость испарения в нагретой среде, не могут преодолевать конвективную колонку. Частицы большого размера не обладают способностью облетать элементы растительности вместе с газовым потоком. В связи с этим целесообразно обеспечить движение частиц воды в капсулах для их высвобождения в мелкодисперсной форме в зоне уязвимости пожара.

Задача налипания мелкодисперсных частиц на недеформируемую преграду

Рассматривается двумерная задача моделирования налипания дисперсных частиц на тело в форме прямоугольника, обтекаемое газодисперсным потоком. В начальный момент частицы находятся перед телом на расстоянии, при котором поле скоростей можно считать невозмущенным. Затем частицы движутся вместе с газовым потоком под воздействием силы лобового сопротивления.

Рассмотрим систему уравнений в виде (3)-(6):

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s W)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_s U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s UW)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_5 W)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_5 U W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_5 W^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial W}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$P = \frac{\rho_5 R T}{M} \quad (6)$$

Граничные условия имеют следующий вид (7)-(10):

$$z = h_{\max} : U = U_e, W = \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad z = 0 : \mu_t = 0, U = U_e, W = 0, \quad (7)$$

$$x = 0 : U = U_e - \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, W = 0, \quad (8)$$

$$x = x_{\max} : U = U_e + \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, W = 0, \quad (9)$$

$$G : \mu_t = 0, U = 0, W = 0. \quad (10)$$

На первом этапе моделирования решается стационарная задача обтекания (3)-(6) для определения поля скоростей при обтекании хвостки (11):

$$\begin{cases} \frac{dx_p}{dt} = U_p, \\ \frac{dz_p}{dt} = W_p, \\ \frac{dU_p}{dt} = -c_d (U_p - U) \sqrt{(U_p - U)^2 + (W_p - W)^2}, \\ \frac{dW_p}{dt} = -c_d (W_p - W) \sqrt{(U_p - U)^2 + (W_p - W)^2} - g. \end{cases} \quad (11)$$

На втором этапе на основе уравнений (7)-(10) выполняется моделирование движения частиц с различным значением коэффициента аэродинамического сопротивления. В начальный момент частица имеет координаты $x_{p,0}$, $z_{p,0}$ и движется со скоростью среды в этой точке. Движение частицы происходит под действием аэродинамического сопротивления за счет силы тяжести и инерции.

Начальные условия для капли имеют вид (12):

$$x_p(0) = x_{p,0}, z_p(0) = z_{p,0}, U_p(0) = U(x_{p,0}, z_{p,0}), W_p(0) = W(x_{p,0}, z_{p,0}), \quad (12)$$

где x , z – горизонтальная и вертикальная координата, м; U , W – составляющие скорости газовой фазы по направлениям x и z соответственно, м/с; U_e – скорость невозмущенного потока газовой фазы относительно обтекаемого тела; ρ_5 – плотность газовой фазы, кг/м³; P – давление, Па; P_e – давление невозмущенной среды на нулевой высоте; ρ_e – плотность невозмущенной среды на нулевой высоте; μ_t – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; R – универсальная газовая постоянная, м²·кг·с⁻²·К⁻¹·Моль⁻¹; $T = 300$ К – температура окружающей среды; M – молярная масса воздуха, кг/моль; x_{\max} , h_{\max} – длина и высота расчетной области соответственно, м; x_p , z_p – координаты мелкодисперсной частицы, м; U_p , W_p – составляющие скорости мелкодисперсной частицы по направлениям x и z соответственно, м/с; c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления мелкодисперсной частицы, м⁻¹; c_x – коэффициент лобового сопротивления мелкодисперсной частицы; ΔV – модуль разности между скоростью движения мелкодисперсной частицы и воздуха вокруг нее, м/с; m – масса мелкодисперсной частицы, кг; S – площадь сечения мелкодисперсной частицы, м²; v – объем мелкодисперсной частицы, м³.

При попадании в ячейку, принадлежащую обтекаемому телу, частица прилипает к телу, и для нее вычислительный процесс останавливается. При достижении частицей границ расчетной области расчеты также прекращаются. Будем искать зависимость изменения диаметра частицы от коэффициента аэродинамического сопротивления. Величина его силы с учетом шарообразной формы капли вычисляется по формуле (13):

$$F = m \frac{dU_p}{dt} = mc_d (\Delta U)^2 \quad (13)$$

где ΔU , м/с – разность между скоростью частицы и газовой среды.

После преобразований получим (14):

$$F = m \frac{dU_p}{dt} = mc_d (\Delta U)^2 = c_d (\Delta U)^2 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \rho_p, \quad (14)$$

$$F = \frac{c_x \rho_e \cdot S_{pr} \cdot \Delta U^2}{2} = \frac{c_x \rho_e \cdot \pi r^2 \cdot \Delta U^2}{2}. \quad (15)$$

Находим соотношение, связывающее диаметр частицы и ее коэффициент аэродинамического сопротивления (16):

$$c_d (\Delta V)^2 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \rho_p = \frac{c_x \rho_e \cdot \pi r^2 \cdot \Delta V^2}{2}, \quad (16)$$

$$c_d \left(\frac{4}{3} r \right) \rho_p = \frac{c_x \rho_e}{2}, c_d = \frac{3c_x \rho_e}{8r \rho_p} = \frac{3c_x \rho_e}{4d \rho_p}, d = \frac{3c_x \rho_e}{4\rho_p A_{\text{coef}}}, \quad (17)$$

где ρ_p – плотность частицы, кг/м³; ρ_e – плотность воздуха, кг/м³; $c_x = 0,45$ – безразмерный коэффициент лобового сопротивления сферы.

Будем считать, что при $c_d=10^{18}$ дисперсные частицы не должны налипать на тело, так как движутся вместе с потоком газа, который не проникает в хвоинку. Следовательно, частицы, которые налипают при $c_d=10^{18}$, исключаются при вычислении доли прилипших частиц из числа тех, которые могли не прилипнуть. Далее, полученные результаты логарифмируем (натуральный логарифм коэффициента аэродинамического сопротивления $Lc_d = \ln(c_d)$) и вычисляем логит вероятности налипших частиц $Lfr = \ln(Lc_d / (1 - Lc_d))$. Аппроксимируем методом наименьших квадратов по формуле $Lfr(LU, Lc_d) = A + B \cdot LU + C \cdot Lc_d + D \cdot Lc_d^2 + E \cdot Lc_d^3$.

Решение задачи о налипании капли выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется моделирование обтекания препятствия воздушными потоками на основе системы обыкновенных уравнений в частных производных при помощи метода крупных частиц [13]. На втором этапе выполняется моделирование динамики частиц, движущихся под действием силы тяжести и аэродинамического сопротивления среды на основе решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Эйлера. В начальный момент частицы размещаются на заданном расстоянии от грани препятствия, обращенной к внешнему полю скоростей. Для определения скорости среды по координатам частицы используется билинейная интерполяция. Низкий порядок точности связан с тем, что при решении задачи обтекания используется метод первого порядка точности по пространству. При попадании частиц в области, принадлежащей обтекаемому препятствию, ее скорость считается равной нулю, что соответствует прилипанию. После моделирования определяется доля частиц, прилипших к препятствию. При достаточно большом значении аэродинамического сопротивления частицы не имеют инерции и движутся вместе с газовой фазой. В этом случае налипание частиц на препятствие связано с численной погрешностью интерполяции скорости. Доля таких частиц составляет от 3 до 6 % в зависимости от скорости газовой фазы на границах. Для ком-

пенсации погрешности такие частицы исключаются из рассмотрения, что обеспечивается хорошим согласованием с полиномиальной зависимостью между логарифмом размера частиц и логитом вероятности их прилипания.

Результаты решения задачи налипания мелкодисперсных частиц на недеформируемую преграду

В табл. 1 показаны результаты расчетов, согласно которым логит вероятности налипания частицы хорошо согласуется с линейной зависимостью от логарифма размера частицы.

Таблица 2.

Аппроксимация вероятности налипания капель на элементы растительности

Table 2.

Approximation of probability of droplets sticking to vegetation elements

| | | | | | |
|-----------------------------|--------|----------|--------|------------|------------|
| Размер капли, 10^{-6} м | 281,25 | 35,15625 | 4,3945 | 0,54931641 | 0,06866455 |
| Логит вероятности налипания | 4,8454 | 2,7659 | 0,7115 | -1,3652 | -3,3274 |
| Линейная аппроксимация | 4,7155 | 2,7419 | 0,7683 | -1,2052 | -3,1788 |
| Кубическая аппроксимация | 4,7967 | 2,8195 | 0,7028 | -1,3834 | -3,2693 |

Результаты аппроксимации хорошо согласуются с результатами численных экспериментов на основе решения задачи аэродинамики (3)-(12). Полученные результаты показывают, что можно решить численную задачу для небольшого набора параметров и форм препятствия и использовать полиномиальную аппроксимацию логита доли налипающих частиц от логарифма их размера. Это позволяет оценить возможность проникновения частиц воды в слой лесной растительности.

При малых размерах частиц погрешность аппроксимации увеличивается, что связано с неточностью дискретизации при решении задачи обтекания и динамики движения частиц в среде; тем не менее, эта погрешность невелика.

Выводы

Рассмотрен случай падения капель воды в неподвижной внешней среде. В случае наличия конвективной колонки мелкие капли могут вообще не попасть в зону горения ввиду их неспособности двигаться с большой скоростью относительно среды. Для тушения пожара мелкими водными каплями целесообразно обеспечить их точную доставку в нужном количестве в зону уязвимости пожара. Одним из эффективных способов доставить воду в область горения является использование капсул в активной оболочке, которые позволяют преодолеть конвективную колонку. Этот способ смоделирован в работе [14], где после разрыва капсулы вода распыляется на частицы бесконечно малого размера, не налипающие на растительность; температура при этом мгновенно перераспределяется между каплями и средой, что способствует более эффективному подавлению горения.

Использование капсул в активной оболочке является прорывной технологией доставки дисперсной воды в зону уязвимости пожара и требует поиска оптимальных режимов сброса капсул. Для более точного попадания в зоны уязвимости пожара можно использовать алгоритмы сегментации изображения, описанные в работах [15,16]. Это позволит использовать беспилотные летательные аппараты для более эффективного тушения лесных пожаров капсулами.

Библиографический список

1. Леса России состояние лесного фонда Российской Федерации [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://roslesinfor.ru/atlas> (дата обращения: 03.02.2021).
2. **Guido, R.** Kasibhatla Global fire emissions estimates during 1997-2016 / R. Guido, van der Werf, James T. Randerson, Louis Giglio, Thijs T. van Leeuwen, Yang Chen, Brendan M. Rogers, Mingquan Mu, Margreet J. E. van Marle, Douglas C. Morton, G. James Collatz, Robert J. Yokelson, and Prasad S. // *Earth Syst. Sci. Data*, 9. 2017. P.697-720, <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.
3. **Абдурагимов, И.М.** Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров // М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. С. 195-198.
4. **Глушков, Д.О.** Локализация и подавление горения лесных материалов с применением авиации / Д.О. Глушков, Н.П. Копылов, С.С. Кропотова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 337 с.
5. **Satoh, K.** A Numerical Study Of Water Dump In Aerial Fire Fighting / K. Satoh, I. Maeda, K. Kuwahara, K. Yang // *Fire Safety Science* 8. 2005. P. 777-787. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.8-777
6. **Лощилов, С.А.** Исследование влияния интенсивности сброса воды на динамику лесного пожара / С.А. Лощилов, Д.А. Маслеников, А.Д. Постнов, Л.Ю. Катаева // *Естественные и технические науки*. 2013. № 6 (68). С. 37-40.
7. **Нищенков, В.В.** Об оптимальной стратегии тушения лесного пожара водяной пушкой / В.В. Нищенков, Н.А. Романова, Л.Ю. Катаева, Д.А. Маслеников, А.А. Лощилов // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 3. С. 692.
8. **Kataeva, L.Y.** On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, N.A. Loshchilova // *Fluid Dynamics*. 2016. Vol. 51. No 3. P. 389-399.
9. **Kataeva, L.Y.** Influence of the water barrier on the dynamics of a forest fire considering the inhomogeneous terrain and two-tier structure of the forest / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, A.A. Loschilov, I.V. Belyaev // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. 11(5). С. 2972-2980.
10. **Накоряков, В.Е.** О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты / В.Е. Накоряков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Доклады академии наук*. 2017. том 475. № 2. С. 145-149. DOI: 10.7868/S0869565217020062.
11. **Катаева, Л.Ю.** О методе Гира численного моделирования динамических систем, описываемых жесткими обыкновенными дифференциальными уравнениями / Л.Ю. Катаева, В.Б. Карпужин // *Наука и техника транспорта*. 2008. № 2.
12. **Войтков, И.С.** Высокотемпературное испарение капель воды в газовой среде / И.С. Войтков, Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Журнал технической физики*. 2017. том 87. вып. 12. С. 1911-1914.
13. **Бабкин, А.В.** Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для вузов / А.В. Бабкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 520 с.
14. **Ильичева, М.Н.** Математическое моделирование тушения лесного пожара капсулами с водой в разрушающейся оболочке / М.Н. Ильичева, Л.Ю. Катаева // XXXII научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности». – М.: ВНИИПО МЧС России, 2020. С. 380-387.
15. **Bochkov, V.** WUUNET: Advanced fully convolutional neural network for multiclass fire segmentation / V. Bochkov, L. Kataeva // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1727(1). 012003.
16. **Bochkov, V.S.** Prototype of forest fire suppression robotics system based on exclusion of flame configuration from monocular video sequence / V.S. Bochkov, L.Yu. Kataeva, I.E. Belotserkovskaya, M.N. Pilycheva // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. 14(9). P. 1719-1730.

*Дата поступления
в редакцию: 02.02.2021*

УДК 004.6

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_16

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬШИХ ДАННЫХ**В.Ю. Карпычев**

ORCID: 0000-0001-8527-2600 e-mail: kavlyr@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Ю.П. Шальнова**

ORCID: 0000-0002-1953-3734 e-mail: julia.shalnova@gmail.com

ПАО «Сбербанк»
Нижний Новгород, Россия

Предложена концептуальная модель больших данных – абстрактная и обобщенная, но позволяющая понимать сущность моделируемого объекта и выступать основой разработки частных моделей больших данных для различных предметных областей. Назначением концептуальной модели является проведение технических и экономических исследований, направленных на повышение эффективности (монетизацию) и снижение рисков внедрения технологий больших данных в условиях нехватки информации, недоопределенных и некорректных прикладных задач. Сформулирована задача обработки больших данных. Показаны особенности и трудности ее постановки. Предложен набор параметров, составляющих модель больших данных, и критерии его формирования. Отмечен пилотный и итеративный характер разработанной модели.

Ключевые слова: большие данные, концептуальная модель, характеристики больших данных, экономическая эффективность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карпычев, В.Ю. Концептуальная модель больших данных / В.Ю. Карпычев, Ю.П. Шальнова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 16-23. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_16

BIG DATA CONCEPTUAL MODEL**V.Yu. Karpychev**

ORCID: 0000-0001-8527-2600 e-mail: kavlyr@yandex.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***Yu.P. SHal'nova**

ORCID: 0000-0002-1953-3734 e-mail: julia.shalnova@gmail.com

ПАО «Sberbank»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Big data conceptual model is proposed; it is abstract and generalized, but it allows us to understand the essences of the modeled object, and to serve as the basis for development of big data models for various subject areas. Purpose of the conceptual model is to conduct technical and economic research focused on improving the efficiency (monetization), and reducing the risks of implementing the big data technologies in the context of lack of information, undetermined and incorrect application of tasks. Big data processing problem is formulated. Features and difficulties of its formulation are shown. A set of parameters that make up the big data model, and criteria for its formation are proposed. Pilot and iterative nature of the developed model is noted.

Key words: big data, conceptual model, energy of neutrons, big data features, economic efficiency.

FOR CITATION: Karpychev V.Yu., SHal'nova Yu.P. Big date conceptual model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 16-23. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_16

Введение

Понятие «большие данные» исследовано во множестве научных работ. В качестве рабочего в данной статье будем использовать определение консалтинговой компании *Gartner*: «большие данные – это большой объем, высокая скорость и/или большое разнообразие информационных активов, которые требуют *экономически эффективных* (курсив наш) инновационных форм обработки информации, позволяющих улучшить понимание, принятие решений и автоматизацию процессов» [1]. Большие данные используются в различных задачах [2], в том числе, для добычи (*mining*) скрытой в больших данных информации (*hidden pattern*). Важно заметить, что существующие и скрытые в больших данных закономерности, взаимосвязи и тенденции изначально не предназначаются для выявления и использования. Укрупненно обработка больших данных включает этапы сбора, предподготовки, анализа и интерпретации данных [3,4]. В силу различных причин, не рассматриваемых в настоящей статье, внедрение в деятельность организации технологии больших данных является весьма высокорисковой и затратной инновацией. При этом этапы сбора и предподготовки данных не только в значительной мере определяют успешность проекта, но и вносят значительный вклад (до 70 % [5]) в затраты на его осуществление, хотя предназначение проекта реализуется на стадии анализа данных [6].

Серьезных научных исследований, направленных на повышение эффективности начальных стадий проектов больших данных, в отечественной специальной литературе не представлено. Существующие примеры внедрения технологий больших данных носят исключительно эксклюзивный (абсолютная индивидуальность конкретных решений) и проприетарный характер. Этот фактор накладывает ограничения на тиражирование внедренных проектов. Перечисленные детерминанты обуславливают актуальность исследований стадий постановки задачи и предподготовки больших данных, в том числе, в части обеспечения эффективности технологии и ее доступности заказчикам. При этом начальные этапы проектирования часто выполняются в условиях неопределенности требований к системе больших данных, что исключает использование аналитических, алгоритмических или качественных решений. Подобного рода исследования можно провести моделированием функционала и структурно-параметрических характеристик систем больших данных. Однако в силу рассмотренных выше особенностей, обобщенные модели больших данных до настоящего времени не созданы.

Таким образом, актуализируется задача разработки концептуальной модели больших данных, которая, с одной стороны, является абстрактной и достаточно обобщенной: отсутствуют особенности и детали конкретных решений по большим данным. С другой стороны, концептуальная модель должна быть основой для разработки частных моделей больших данных для различных предметных областей. Данное требование означает, что целью построения концептуальной модели больших данных в рассматриваемом контексте является использование ее для анализа и синтеза экономических, а также технических и управленческих решений.

Цели обработки больших данных

В работе [7] задача создания информационных систем формализована простой записью (1):

$$G = F(D). \quad (1)$$

Применительно к системе больших данных: G – результат (цель) обработки множества входных данных D ; F – функционал системы больших данных.

Обычно исходные данные D и требуемый результат G задаются предметным специалистом. Разработчик информационной системы должен определить и материализовать в аппаратно-программных решениях ее функционал. Постановка задачи, как мы отмечали, явля-

ется очень важным этапом, так как корректность и адекватность ее формулировки определяет успешность проекта больших данных, а ошибки и неточности ведут, в лучшем случае, к экономическим потерям. Для постановки задачи обработки больших данных, как правило, должны существовать осознанные потребность или необходимость в получении результата G . Данные есть прямое следствие выбранной цели. Невозможно обрабатывать большие данные до того, как будет определена цель.

Однако при разработке систем больших данных типичной является ситуация, в которой ни множество данных D , ни цель (назначение) G системы четко не определены. Более того, возможна ситуация, когда и потребность (цель) не определена (существует, но не осознаваема). В этом случае используются специальные методы анализа больших данных.

Формирование множества больших данных

Постановку задачи (1) следует начинать с формулирования цели G обработки больших данных. Наличие цели G позволяет сформировать множество больших данных D . Эту процедуру можно формализовать записью (2):

$$G \rightarrow D = \{d_1, \dots, d_m\}, \quad (2)$$

где d_i принадлежит множеству предметно-ориентированных данных D .

Выполнение процедуры (2) проводится предметными специалистами с учетом семантической принадлежности (релевантности) элемента d_i к предметной области и степени его влияния на достижение цели G (важности). Цели также определяют источники и методы анализа данных.

Решение задачи (2) сопряжено с трудностями в части определения:

- важности и источников некоторых данных;
- объема, релевантности и качества скрытой в исходном множестве D информации.

Существует также не рассматриваемая в настоящей статье проблема определения сигнальных признаков элемента d_i . В данном случае *сигнал* – это формальный признак, который косвенно характеризует потенциальную полезность скрытой информации для целей обработки больших данных. Можно согласиться, что «найти данные для анализа – это отчасти наука, отчасти исследовательская работа и отчасти предположения» [8]. Эта особенность постановки задачи (1) во многом определяет успешность проекта больших данных.

Семантика и синтаксис больших данных

В общем случае содержание, смысл и назначение фрагментов объективного мира находят отражение в некоторых воспринимаемых человеком материальных сущностях: речи, тексте (символы), изображениях, аудио- и видеофайлах. При этом предполагается, что семантика информации доступна для восприятия и обработки человеком непосредственно или с использованием специального инструментария (в настоящей статье – автоматизированные информационные технологии). При таком подходе работа с большими данными предполагает экспертные: постановку цели G , формирование множества D и определение методов обработки. Непосредственную обработку исходных данных и обнаружение скрытой в них информации осуществляет ЭВМ. Поэтому определяющее значение для создания системы больших данных имеет понятие «семантическая единица» [9] (СЕ), под которой мы понимаем неделимую, однозначно определяемую смысловую сущность d_i независимо от ее организации, формы представления и технической реализации. Другими словами, мы отождествляем понятия семантической единицы и элемента множества данных d_i , обеспечивая тем самым человеко-машинный интерфейс.

При таком подходе под большими данными D можно понимать множество семантических единиц $D = \{d_i\}$, детерминированных G , т.е., отвечающих условию (2). Таким образом, задача (2) может быть интерпретирована как спецификация множества СЕ. Как было отме-

чено ранее, концепция больших данных предполагает автоматизированную обработку доступной для человеческого восприятия семантики. Теоретически эта задача должна решаться путем формализации семантической информации (СЕ). Однако это очень сложная задача. «При формализации изучаемым объектам, их свойствам и отношениям ставятся в соответствие некоторые устойчивые, хорошо обозримые и отождествимые материальные конструкции, дающие возможность выявить и зафиксировать существенные стороны объектов» [10]. Поэтому далее под семантикой данных будем понимать формальное описание смысла данных. Степень формализации семантики данных можно использовать для отнесения их к категориям структурированных, полуструктурированных и неструктурированных данных [6].

Структурирование – это выделение в информации важных для достижения цели G СЕ и фиксация связей между ними. Для подготовки и анализа структурированных данных существует хорошо развитый математический аппарат. Для идентификации СЕ используются:

- *имя* – условное обозначение;
- *значение* – параметр, характеризующий свойства сущности, обозначаемой СЕ;
- *тип* – множество значений СЕ, сгруппированных по определенным признакам и в соответствии с перечнем допустимых преобразований.

В неструктурированных данных СЕ и связи не идентифицированы. Существует множество видов (форматов) неструктурированных данных: текстовые, числовые, графическая информация, аудио и видеофайлы. Поэтому для автоматизированной обработки неструктурированных данных используются схема описания предметной области и правила определения релевантных ей данных (онтология). Схема должна содержать СЕ и связи между ними. Семантические единицы определяются набором специальных правил. Связи также должны быть поименованы и могут содержать различные атрибуты, описывающие, например, способ связи. Следует отметить, что одни и те же данные могут рассматриваться как структурированные или неструктурированные в зависимости от предметной постановки задачи. Так, результаты измерения температуры за период времени можно представить в виде таблицы, текста, чисел, графики, видеоряда и т.д.

Кроме семантической составляющей, в модели больших данных следует отразить синтаксическую адекватность, т.е., «формально-структурные характеристики информации, не затрагивающие ее смыслового содержания» [11]. Характеристики физически представляются конкретными форматами файлов, которые в силу исторических и технических причин практически исключают возможность инвариантной обработки в ЭВМ.

Интеграция данных

Аналізу больших данных обычно предшествует их интеграция, которая в общем случае заключается в объединении данных разнородных источников. Разнородность проявляется в отличиях форматов данных и их схемах. Результат интеграции – единое представление полного и непротиворечивого множества данных, обеспечивающее их обработку [12]. Практическая интеграция подмножеств, структурированных и неструктурированных данных в настоящее время сопряжена с техническими трудностями. Поэтому анализ данных обычно проводят раздельно и, соответственно, получают скрытые данные (закономерности), присутствующие этим подмножествам. Однако концепция больших данных не допускает подобных упрощений: анализ структурированных и неструктурированных данных из различных источников должен быть проведен совместно. Для этого неструктурированные данные должны быть структурированы и приведены к единому формату. Интеграция данных возможна на синтаксическом, логическом и семантическом уровнях.

Синтаксическая модель интеграции предполагает приведение данных из различных источников к единому формату физического представления. Логический уровень интеграции обеспечивает оперирование данными различных источников (например, объектных баз данных, веб-сайтов и т.д.) в терминах единой глобальной схемы. На семантическом уровне ин-

теграции данные имеют семантически значимое единое представление в рамках онтологии предметной области (например, пересечение понятийных баз разных источников). При интеграции данных на синтаксическом и логическом уровнях семантические свойства данных не учитываются. Видимо, поэтому некоторые исследователи говорят о двух уровнях интеграции: синтаксическом и семантическом [13].

Примером интеграции структурированных и неструктурированных данных может быть задача «Аналитика телефонных переговоров» со следующими целями:

- выявление трендов телефонного трафика (структурированная информация);
- распознавание содержания отдельных коммуникаций (неструктурированная информация);
- выделение новой (скрытой) информации на множестве структурированных и неструктурированных данных.

В табл. 1 приведены наборы возможных семантических единиц, выделяемых на подмножествах, структурированных D^1 и неструктурируемых данных потока телефонных звонков D^2 .

Таблица 1.

Интеграция структурированных и неструктурированных данных

Table 1.

Integration of structured and unstructured data

| Аудиоаналитика (телефонные звонки, например IP-телефонии) | | |
|---|---|---|
| | Стандартный статистический анализ на структурируемой информации, D^1 | Семантический анализ на неструктурируемой информации (речи), D^2 Полнотекстовое распознавание речи (робот) |
| Семантические единицы, d_i | Количество, длительность, стоимость, входящие, исходящие, переадресация, нет дозвона, неприятые коммуникационные данные и др. | Речевые шаблоны (вариации конкретных слов), в том числе, тишина более 5 с, например, слова из словаря на 500 слов для оценки эмоций/трендов |
| Цель G | Интегрированные данные: взаимосвязь речевых шаблонов со структурированными данными | |

В научной литературе описаны методы интеграции данных. Консолидация данных включает извлечение (extract) данных из источников, преобразование (transform) и загрузку (load) их в хранилище. При федерализации данные извлекают из разнородных источников при поступлении внешних запросов. Распространение данных предполагает их передачу (копирование) в оперативном режиме [14,15]. Параметр «метод интеграции данных» также может быть включен в концептуальную модель больших данных.

Иные параметры больших данных

Одним из предназначений предлагаемой концептуальной модели может быть исследование экономических характеристик технологии больших данных. Для этого модель целесообразно расширить рядом параметров. Кратко рассмотрим их.

Режим обработки данных. С технологической точки зрения, обработку данных кратко можно определить как любое преобразование данных при решении конкретной задачи, которое может происходить в различных режимах: пакетном, реального масштаба времени, разделения времени и др. [16]. Выбор режима определяется характеристиками источников данных, информационной системой обработки данных и решаемых в ней задач, включая задачу (1). При этом режим обработки данных детерминирует время, стоимость и другие важные «нетехнологические» характеристики системы обработки больших данных.

Темпоральные (временные) характеристики данных. В модели больших данных для некоторых задач следует включать темпоральные характеристики: момент, период, интервал [17]. Эти характеристики отражают как предметно, так и технологически значимые особенности систем больших данных, например:

- различные моменты создания данных и завершения их обработки (время заключения сделки и расчет продавца с покупателем при биржевой торговле);
- асинхронное время работы процессов обработки данных (в различных часовых поясах);
- различные временные интервалы работы с данными у параллельно выполняемых процессов;
- загрузка данных с временной задержкой, «задним числом» (в том числе пакетная передача данных);
- различные временные модели интегрируемых данных (дискретное и интервальное время) и др.

Эти временные особенности обработки данных прямо влияют на экономические характеристики систем больших данных.

Планируемый вид анализа данных. В отечественной и зарубежной специальной литературе отмечена вариативность анализа данных [18,19] (табл. 2). Вид анализа для конкретной задачи (1) следует определять на стадии ее постановки.

Таблица 2.

Виды анализа данных

Table 2.

Types of data analysis

| Вид анализа | Характеристика вида анализа (пример) |
|-------------------------------|---|
| Описательный (Descriptive) | Аналитика произошедших событий (статистический анализ телефонных коммуникаций) |
| Диагностический (Diagnostic) | Выявление зависимостей различных событий и факторов (повременной объем телефонного трафика, ограничение доступа к услуге связи в определенное время) |
| Прогнозный (Predictive) | Определение трендов на основе имеющихся данных, включая оценку вероятности возможных событий (отказ в обслуживании при определенных сочетаниях количества и длительности телефонных коммуникаций) |
| Предписывающий (Prescriptive) | Определение возможных сценариев поведения системы при изменении множества исходных данных и условий задачи (изменение телефонного трафика при изменении тарифной политики) |

Технология *Data Mining*, предназначенная для нетривиального обнаружения в данных скрытой, ранее неизвестной, доступной для интерпретации и практически полезной информации [20], оперирует описательными и предсказательными классами моделей анализа, которые формализуют задачу (1). Методы *Data Mining*, соответствующие модели анализа, определяют требования к характеристикам исходных данных D , например, тип данных: численный, качественный и др. [4,21]. Это означает, что в концептуальную модель больших данных следует включить параметр «Предполагаемый метод анализа».

Принадлежность данных. Источники данных, как указывалось, детерминированы целью G и уникальны для каждой задачи (1). Поэтому при ее постановке всегда возникает вопрос об источниках в контексте обладания правами собственности на данные, хотя с точки зрения гражданского права данные (информация) не являются объектом правоотношений [22]. В нашей модели данные рассматриваются как экономический объект, который может быть описан такими характеристиками, как цена приобретения или стоимость хранения в зависимости от принадлежности данных. Эта экономико-правовая характеристика данных мо-

жет принимать значения: внутренние и внешние данные. *Внутренние данные* – это созданные или приобретенные данные, хранящиеся в организации, которые она может использовать по своему усмотрению.

Право собственности на *внешние данные* принадлежит третьим лицам (сторонним организациям). Доступ и использование внешних данных ограничены какими-либо условиями, например, по критерию возмездности можно выделить условно-бесплатные и коммерческие данные. В концептуальную модель больших данных также могут быть включены иные известные характеристики информации, например, достоверность, качество, толерантность данных и др. [18].

Заключение

Предложенная концептуальная модель больших данных включает набор параметров, влияющих на технические и экономические характеристики технологии больших данных. Предполагается проведение экономических исследований, направленных на повышение эффективности технологий больших данных.

Представленная версия модели является пилотной. При разработке конкретных (частных) решений модель может менять структуру, постепенно формируя типовую онтологию больших данных.

Библиографический список

1. Glossary Gartner. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data> (дата обращения: 12.02.2020).
2. McKinsey Global Institute. Big data: The next frontier for innovation, competition and productivity. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/big-data-the-next-frontier-for-innovation> (дата обращения: 10.10.2020).
3. **García, S.** Big data preprocessing: methods and prospects / S. García, S. Ramírez-Gallego, J. Luengo et al. // Big Data Anal. 2016. 1, 9. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1186/s41044-016-0014-0> (дата обращения: 15.03.2020).
4. **Kantardzic, M.** Data mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms / M. Kantardzic // Wiley. Hoboken, 2020. – 661 с.
5. IBM. The biggest data challenges that you might not even know you have. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/blogs/watson/2016/05/biggest-data-challenges-might-not-even-know/> (дата обращения: 12.10.2020).
6. **Vozábal, M.** Tools and Methods for Big Data Analysis / M. Vozábal. – Pilsen: University of West Bohemia, 2016. – 134 с.
7. **Шальнова, Ю.П.** Монетизация больших данных: технико-экономический анализ драйверов роста и издержек / Ю.П. Шальнова // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47. № 3. С. 491-500.
8. **Ohlhorst, F.** Big Data Analytics Turning Big Data into Big Money / F. Ohlhorst. – Wiley, 2013. – 176 с.
9. ГОСТ Р ИСО 15531-1-2008: Промышленные автоматизированные системы и интеграция. Данные по управлению промышленным производством. Часть 1. Общий обзор. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
10. **Ивин, А.А.** Словарь по логике / А.А. Ивин, А.Л. Никифоров. – М.: Туманит, ВЛАДОС, 1997. – 384 с.
11. Информатика: концептуальные основы. – М.: Маросейка, 2008. – 464 с.
12. **Dong, X.L.** Big Data Integration / X.L. Dong, D. Srivastava. – Morgan&Claypool, 2015. – 178 с.
13. **Черняк, Л.** Интеграция данных: синтаксис и семантика // Открытые системы. СУБД. 2009. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2009/10/11170978/> (дата обращения: 12.10.2020).
14. **White, C.** Data Integration: Using ETL, EAI, and EII Tools to Create an Integrated Enterprise / C. White // DM Review. 2005. № 11. С. 25-43.

15. **Кресов, А. А.** Принципы интеграции данных в сфере недропользования / А.А. Кресов, В.В. Уваров // Вестник кибернетики. 2010. № 10. С. 83-89.
16. **Шепелев, К.В.** Анализ режимов автоматизированной обработки данных / К.В. Шепелев [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 12. С. 48-53.
17. **Jensen, C.S.** Temporal Database Management / C.S. Jensen. – Aalborg University, 2000. – 1323 с.
18. **Anderson, C.** Creating a Data-Driven Organization / C. Anderson. – O'Reilly Media, 2015. – 302 с.
19. **Gerber, D.** 4 Types of Data Analytics / D. Gerber // Oracle AI and Data Science Blog. [Электронный ресурс]. URL: <https://blogs.oracle.com/datascience/4-types-of-data-analytics> (дата обращения: 15.09.2020).
20. **Frawley, W.** Knowledge Discovery in Databases: An Overview / W. Frawley, G. Piatetsky-Shapiro, C. Matheus // AI Magazine. 1992. С. 213-228.
21. **Барсегян, А.А.** Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP. / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 384 с.
22. **Карпычев, В.Ю.** Информация как объект гражданских правоотношений. В сб: Актуальные проблемы частного и публичного права / В.Ю. Карпычев, М.В. Карпычев // Всерос. научно-практ. конф. (Волгоград, 27 октября 2017 г.). Волгоград, ВАМВД России. – С. 73-76.

*Дата поступления
в редакцию: 05.12.2020*

УДК 519.16

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_24

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ-УПАКОВКИ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Ю.В. МахонинаORCID: 0000-0002-9130-4100 e-mail: mahonina-1999@mail.ru

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

Е.А. НеймаркORCID: 0000-0002-0938-3576 e-mail: elena.neimark@itmm.unn.ru

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

Представлен комбинированный подход к решению задачи раскроя-упаковки, основанный на эволюционно-генетическом алгоритме. Рассмотрена двумерная задача прямоугольного гильотинированного раскроя без поворота, сводимая к задаче о камнях и являющаяся NP-полной. Решение предполагает минимизацию длины рассекаемого материала с фиксированной высотой и неограниченной длиной. Данный тип задачи применим на различных производствах, где требуется сокращение расходов листового сырья (металлические детали, ткани и др.). Исследована скорость сходимости алгоритма на разных типах фигур; рассмотрены случаи с преобладанием в выборке квадратных или прямоугольных фигур. Приведены результаты вычислительного эксперимента, показавшие эффективность предложенного гибридного алгоритма. Приоритет прямоугольных фигур дает незначительное преимущество, и быстрая сходимость, по сравнению с выборкой квадратных фигур, почти не встречается. Наиболее разнообразные варианты дает мутация типа «сальтация», уменьшающая риск схождения алгоритма.

Ключевые слова: задача раскроя-упаковки, эволюционно-генетический алгоритм, гибридный алгоритм.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Махонина, Ю.В. Решение задачи раскроя-упаковки с помощью комбинированного эволюционно-генетического алгоритма / Ю.В. Махонина, Е.А. Неймарк // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 24-31. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_24

CUTTING-PACKING PROBLEM SOLUTION USING A COMBINED EVOLUTIONARY-GENETIC ALGORITHM

Yu.V. MakhoninaORCID: 0000-0002-9130-4100 e-mail: mahonina-1999@mail.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

E.A. NeymarkORCID: 0000-0002-0938-3576 e-mail: elena.neimark@itmm.unn.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Нижний Новгород, Россия

Abstract. Combined approach to the cutting-packing problem solution based on an evolutionary-genetic algorithm, is presented. A two-dimensional problem of rectangular guillotined cutting without rotation, which is reduced to the «problem of stones» and is NP-complete, is considered. The solution involves a minimization of length of dissected

material with a fixed height and unlimited length. This type of problem is applicable in various industries where it is necessary to reduce consumption of sheet materials (metal parts, fabrics, etc.). Algorithm convergence rate on various types of figures is traced; cases with a predominance of square or rectangular figures in the sampling are considered. Results of computational experiments showing the proposed hybrid algorithm effectiveness are presented. Priority of rectangular figures gives a slight advantage and rapid convergence almost does not occur, compared to the square figures sampling. The most diversified variations are given by a «saltation» type mutation, which reduces the risk of algorithm convergence.

Key words: cutting-packing problem, evolutionary-genetic algorithm, hybrid algorithm.

FOR CITATION: Makhonina Yu.V., Neymark E.A. Cutting-packing problem solution using a combined evolutionary-genetic algorithm. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 24-31.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_24

Введение

Задача раскроя-упаковки относится к классу NP-трудных проблем оптимизации, поэтому необходима разработка эвристических методов, позволяющих получать квазиоптимальные решения за полиномиальное время. В общем случае и ограничения, и функция цели для задачи нерегулярного размещения плоских геометрических объектов являются нелинейными [1]. К таким задачам относятся: задачи оптимального раскроя материала на заготовки произвольной формы, решаемые при производстве изделий в машиностроительной, авиастроительной, текстильной, кожевенной, и многих других отраслях промышленности; задачи компоновки: грузов в контейнеры, двигателей, радиоэлементов на платах и т.д.; задачи распределения, проектирование кристаллов и процессоров [2]. Среди множества различных факторов, определяющих классы моделей раскроя-упаковки, выделяют следующие основные характеристики: мерность областей, вид назначения, ассортимент объектов, оптимизация однопараметрическая или многопараметрическая, размерность объектов и областей, геометрия объектов [3].

В данной работе рассматривается двумерная задача раскроя, прямоугольный гильотинный раскрой, без поворота. Она сводится к задаче о камнях и является NP-полной. Существует несколько способов решения задач раскроя-упаковки: методы аппроксимации и декомпозиции, эвристические методы, точные методы и генетические алгоритмы. Представлено решение минимизации длины рассекаемого материала с фиксированной высотой и неограниченной длиной, с помощью комбинированного эволюционно-генетического алгоритма для ускорения поиска оптимального решения. Данный тип задач применим на различных производствах, где требуется сокращение расходов листового сырья (металлические детали, ткани, и т.д.)

Доказательство NP-полноты задачи раскроя

Для доказательства NP-полноты задачи раскроя рассмотрим два этапа [4].

1. Докажем NP-полноту рассматриваемой задачи.

Можно построить полиномиальный алгоритм проверки подтверждения V . На вход V подается пара $\langle \alpha, c \rangle$, где α – исходные данные задачи, $c = \langle x_i, y_i \rangle i = 1 \dots n$

x_i, y_i – координаты левого верхнего угла.

Условие проверки допустимости решения:

1. Проверить, что данное размещение не пересекает область раскроя.

2. Удостовериться, что все фигуры не пересекаются между собой по оси X и по оси Y.

Это можно сделать с помощью сравнения отрезков длин и ширин фигур по осям.

Сложность проверки допустимости решения:

$$O(n) + O(n^2) = O(n^2)$$

2. Докажем полиномиальную сводимость задачи о камнях к нашей задаче.

Задача о камнях полиномиально сводится к задаче раскроя:

v_1, \dots, v_n – веса камней,

$\sum_{i=1}^n v_i = 2V$ – камни можно разделить на две кучи равного веса.

Построим сведение к задаче раскроя.

Пусть i – ая заготовка имеет размеры: длина = 1, ширина = v_i .

Тогда: $A = 2, B = 3V, n = n, a_i = 1, b_i = v_i$

Итог: задача о камнях полиномиально сводится к задаче раскроя.

Цель работы

Целью работы является исследование скорости сходимости алгоритма на разных типах фигур. Рассматриваются случаи с преобладанием в выборке квадратных или прямоугольных фигур. Для проведения исследования требуется:

- 1) написать генератор тестовых задач с возможностью выбора типа преобладающих фигур;
- 2) написать программу, реализующую генетический алгоритм для задачи раскроя бесконечной ленты (в ней будут использоваться разные комбинации генетических операторов, адаптированных к задаче);
- 3) проработать и написать для облегчения визуального восприятия результатов решения его графическое отображение;
- 4) провести эксперимент на трех типах выборок;
- 5) проанализировать результаты эксперимента и сделать выводы о возможностях алгоритма.

Содержательная постановка задачи

Дана область раскроя (лента) $M = \{m_y\}$, где m_y задает высоту ленты (области раскроя), по оси x ограничений нет. Дано множество двумерных геометрических фигур $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ количеством N . Каждая фигура задается высотой и шириной. Расположение каждого элемента A_i в области раскроя определяется следующими параметрами: x_{mini} , y_{mini} , где x_{mini} – проекция самой левой точки фигуры в некоторой системе координат; y_{mini} – проекция самой нижней точки в некоторой системе координат.

Задача раскроя материала формулируется следующим образом: необходимо выбрать некоторое количество геометрических объектов и уложить их на поверхность ленты M , добиваясь уменьшения свободного пространства ленты и уменьшения длины, занимаемой всеми фигурами. При этом размещение должно удовлетворять следующим ограничениям:

•максимальная точка в размещении по высоте не должна превышать высоту ленты: $max x_i \leq m_y$, где l_i – наибольший занятая координата по y для всех x_i ;

•элементы не должны накладываться друг на друга:

$$f_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j, \dots, x_n, y_n) \geq 0$$

$$i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n$$

•элементы не должны выходить за границы поля:

$$\begin{cases} y_{mini} \geq 0 \\ y_{mini} \leq m_y \end{cases}$$

Описание метода решения

В качестве метода решения алгоритма предлагается использовать эволюционно-генетический алгоритм [5]. Ниже будут представлены способы кодирования особей и основные операторы, реализованные в данном алгоритме.

Первая популяция генерируется случайным образом, жадные стратегии в данном случае не имеют смысла [6]. Для реализации генетического алгоритма особью предполагается считать любое размещение заданных предметов на полосе, удовлетворяющее условию задачи. Пусть все предметы пронумерованы (рис. 1). Тогда хромосома – это перечисление всех номеров предметов в некотором порядке, отражающем их размещение. Физические координаты размещения предметов на полосе можно получить, выложив предметы на полосу в порядке их перечисления в хромосоме по некоторому правилу декодирования [5].

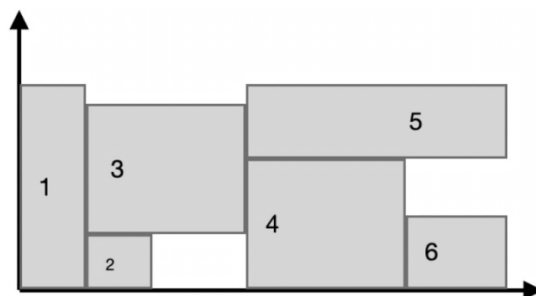


Рис. 1. Особь

Fig. 1. Individual

Стратегия – эволюционно-поколенческая модифицированная. В первом поколении генерируется K особей, далее происходит отбор пары с наилучшей приспособленностью, затем после скрещивания отбираются в следующее поколение снова K особей из смешанной популяции родителей и потомков. Происходит остановка алгоритма, если четыре раза повторяется наилучшая приспособленность в поколении. Данная стратегия используется для сохранения лучших геномов. В качестве критерия оптимизации рассматривается длина полосы, занятая размещением предметов. Условие проверки допустимости решения:

- 1) проверить, что данное размещение не пересекает область раскроя;
- 2) удостовериться, что все фигуры не пересекаются между собой по оси X и по оси Y ; это можно сделать с помощью сравнения отрезков длин и ширины фигур по осям.

Сложность проверки допустимости решения:

$$O(n) + O(n^2) = O(n^2)$$

Математическая модель

$$\begin{cases} x_{mini} \geq 0 \\ y_{mini} \geq 0 \\ y_{mini} + a_i \leq m_y \\ \begin{cases} x_{mini} + b_i \leq x_{mini+1} \\ y_{mini} + a_i \leq y_{mini+1} \end{cases} \end{cases}$$

$L(x)$ – координата правого края последней выступающей фигуры справа по оси X

$$L(x) \rightarrow \min$$

Описание основных операторов генетического алгоритма

Кодирование: перестановочное.

Функция приспособленности: декодирование с получением итоговой длины в условных единицах.

Проверка допустимости: встроена в процесс декодирования на основании работы декодера.

Начальная популяция: перестановки фигур генерируются случайным образом, фигуры в перестановке не повторяются.

Репродукция: отбираются два лучших экземпляра из начальной популяции.

Кроссовер: два типа:

- 1) двухточечный кроссовер;
- 2) РМХ.

Мутация: два типа:

- 1) сальтация;
- 2) инверсия.

Селекция: два типа:

- 1) β -турнир;
- 2) ранговая селекция.

Отбор осуществляется из смешанной популяции мутантов, детей и родителей (т.е., вся начальная популяция).

Условие остановки: после четырех повторений одного и того же значения экстремума, считается, что локальный экстремум найден. Цикл останавливается.

Декодирование производится с помощью вычисления «оффсета» (рис. 2) от начала ленты при добавлении каждой фигуры. «Оффсет» стал равным 5 в клетках, где ширина, закрываемая фигурой или фигурами, равна 5. Декодер выдает итоговую длину, занятую фигурами. Также есть функция получения координат расположения фигур на ленте.

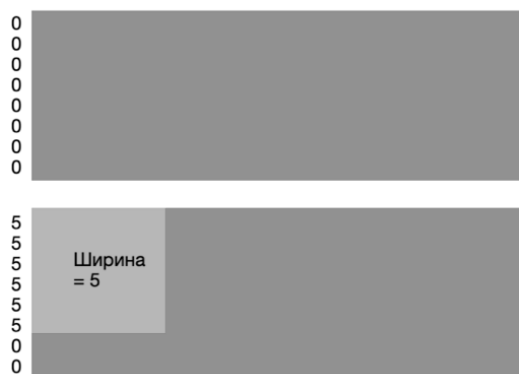


Рис. 2. Вычисление оффсета

Fig. 2. Offset calculation

Описание генератора фигур

Генератор фигур – программа, записывающая в файл исходные данные: ширину ленты, количество фигур, длину и ширину каждой фигуры. Из этого файла производится считывание фигур в основную программу с генетическим алгоритмом.

На вход программы подается:

- 1) ширина ленты;
- 2) количество фигур;
- 3) приоритет квадратных фигур.

Если выбрана опция «приоритет квадратных фигур», их количество будет случайным образом вычисляться от трети до половины количества фигур во всей выборке. Если выбрана опция «приоритет прямоугольных фигур», все фигуры в выборке будут прямоугольными. Половина фигур будет иметь длину в диапазоне от значения, равного половине ширины ленты, до значения, равного ширине ленты. Вторая половина фигур будет иметь высоту в диапазоне тех же значений.

Вычислительный эксперимент

Для выяснения эффективности разработанного комбинированного эволюционно-генетического алгоритма был проведен вычислительный эксперимент. Для этого с помощью программно-реализованного генератора фигур были получены выборки в 100 фигур высотой ленты 30 у.е.

1. Первая выборка: фигуры различные: ширина и длина для каждой фигуры задается случайным образом в диапазоне от 1 до числа, равного ширине ленты.

2. Вторая выборка: приоритет квадратных фигур.

3. Третья выборка: приоритет прямоугольных фигур.

Производится пять запусков каждого из восьми набора операторов (табл. 1):

Таблица 1.

Наборы операторов

Table 1.

Sets of operators

| Вариант операторов | Кроссовер | Мутация | Селекция |
|--------------------|-----------|---------|----------|
| 1 | Тип №1 | Тип №1 | Тип №1 |
| 2 | Тип №1 | Тип №1 | Тип №2 |
| 3 | Тип №1 | Тип №2 | Тип №1 |
| 4 | Тип №1 | Тип №2 | Тип №2 |
| 5 | Тип №2 | Тип №1 | Тип №1 |
| 6 | Тип №2 | Тип №1 | Тип №2 |
| 7 | Тип №2 | Тип №2 | Тип №1 |
| 8 | Тип №2 | Тип №2 | Тип №2 |

Отбирается лучший вариант из 5 запусков с минимальной длиной раскраиваемого материала и отображается на ленте (рис. 3). Также отображается зависимость длины раскраиваемого материала от времени работы алгоритма.

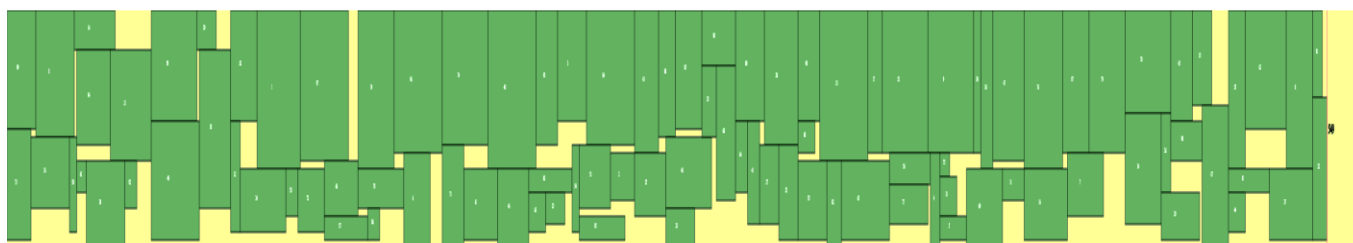


Рис. 3. Расположение 100 фигур на ленте с первым набором операторов.
Выборка с различными фигурами

Fig. 3. Arrangement of 100 figures on tape with the first set of operators.
Sampling with various figures

Таблица 2.

Результаты работы алгоритма

Table 2.

Algorithm outputs

| Вариант операторов | Тип фигур 1 Различные фигуры | | Тип фигур 2 Приоритет квадратных | | Тип фигур 3 Приоритет прямоугольных | |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| | Минимальная длина ленты | Средняя длина ленты | Минимальная длина ленты | Средняя длина ленты | Минимальная длина ленты | Средняя длина ленты |
| 1 | 549 | 563 | 1140 | 1174 | 811 | 832 |
| 2 | 568 | 575 | 1139 | 1157 | 831 | 858 |
| 3 | 563 | 575 | 1135 | 1168 | 839 | 878 |
| 4 | 556 | 567 | 1151 | 1165 | 859 | 870 |
| 5 | 556 | 567 | 1137 | 1151 | 832 | 856 |
| 6 | 551 | 561 | 1134 | 1150 | 810 | 854 |
| 7 | 556 | 574 | 1165 | 1176 | 845 | 883 |
| 8 | 561 | 571 | 1178 | 1182 | 839 | 873 |

Таблица 3.

Число циклов алгоритма при лучших запусках с минимальной длиной.

Сходимость алгоритма при различных вариантах операторов

Table 3.

Number of algorithm cycles for best runs with minimum length.

Algorithm convergence with variations of operators

| Вариант операторов | Тип фигур 1 Различные фигуры | Тип фигур 2 Приоритет квадратных | Тип фигур 3 Приоритет прямоугольных |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | 18 | 26 | 24 |
| 2 | 7 | 16 | 19 |
| 3 | 9 | 19 | 21 |
| 4 | 12 | 15 | 14 |
| 5 | 15 | 21 | 21 |
| 6 | 20 | 16 | 35 |
| 7 | 17 | 11 | 13 |
| 8 | 11 | 6 | 15 |

Из графиков зависимости длины от времени течения алгоритма можно отметить следующее.

1. Выборка фигур с прямоугольным приоритетом дает более крутые графики. Но алгоритм в таком случае выполняется дольше, несмотря на небольшую разницу в промежуточных значениях текущих экстремумов.

2. Для выборки с приоритетом квадратных фигур можно отметить длительность выполнения алгоритма, графики более пологие.

3. Мутация типа «сальтация» дает более разнообразные варианты и уменьшает риск схождения алгоритма. По полученным данным (табл. 3) среднее число циклов алгоритма при сальтации = 20, при инверсии = 14.

Выводы

Приоритет прямоугольных фигур дает незначительное преимущество, и быстрая сходимость почти не встречается в сравнении с выборкой квадратных фигур. Восьмой вариант операторов на выборке с квадратными фигурами сходится за 6 шагов, и экстремум меняется 1 раз. Так как в выборке с прямоугольными фигурами подобного результата на последнем варианте набора операторов нет, выборка с квадратным приоритетом более сложна для нахождения локального экстремума, возможно, требуется иной подход (другие наборы операторов, другое условие остановки). По полученным данным сделан вывод: мутация типа «сальтация» дает более разнообразные варианты и уменьшает риск схождения алгоритма. Дальнейшие исследования могут быть проведены в следующих направлениях:

- 1) исследование результатов выборки с разбросом по размерам фигур на данном алгоритме (маленькие фигуры и большие, сильно превосходящие в размерах);
- 2) рассмотрение и добавление других типов мутаций в оператор;
- 3) изучение зависимости итогового результата от величины разброса начальной популяции.

Заключение

Рассмотрена NP-трудная задача по поиску оптимального размещения фигур в задаче раскроя. Представлен гибридный подход к ее решению. Приведены результаты вычислительного эксперимента, показавшие эффективность предложенного гибридного алгоритма.

Библиографический список

1. **Гладков, Л.А.** Биоинспирированные методы в оптимизации / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, П.В. Сороколетов. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
2. **Петренко, С.В.** Оптимизация размещения двумерных геометрических объектов на анизотропном материале с использованием методов математического программирования / С.В. Петренко. – Уфа, 2005.
3. **Канторович, Л.В.** Расчет рационального раскроя промышленных материалов / Л.В. Канторович, В.А. Залгаллер. – Л.: Лениздат, 1951. – С. 199.
4. **Батищев, Д.И.** Вычислительная сложность экстремальных задач / Д.И. Батищев, Д.И. Коган. – Н. Новгород: ННГУ, 1994.
5. **Подлазова, А.В.** Генетические алгоритмы на примерах решения задач раскроя // Проблемы управления. 2008. №2. С. 57-63.
6. **Неймарк, Е.А.** Улучшение качества начальной популяции эволюционно-генетического алгоритма для задачи коммивояжера // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 50. 2017. С. 69-73.

Дата поступления

в редакцию: 30.11.2020

УДК 517.977

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_32

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕСТКОГО РОТОРА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

А.В. МухинORCID: 0000-0003-2402-7016 e-mail: myhin-aleksey@yandex.ru

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

Рассмотрена задача оптимальной стабилизации жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках. Для решения задачи формируется линейный стационарный закон управления по принципу обратной связи для линеаризованной системы. Рассмотрены два подхода к решению задачи: стабилизация по состоянию и стабилизация по выходу полного порядка. Результаты, полученные в первом подходе, являются вспомогательными и используются для сопоставительного анализа. Основным результатом, с точки зрения возможности практического использования, получен в рамках второго подхода, где в качестве измеряемых параметров рассматривались токи в цепях электромагнитов. В качестве критерия оптимальности использовалась обобщенная H_∞ -норма линеаризованной системы, позволяющая учесть как внешнее возмущение, так и начальное отклонения ротора. Для вычисления параметров обратной связи использовался аппарат линейных матричных неравенств. Представлены результаты математического моделирования динамики вращающегося ротора. Приведены оценки качества переходных процессов в системе.

Ключевые слова: линейные матричные неравенства, методы выпуклой оптимизации, обобщенная H_∞ -норма, ротор, управление.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мухин, А.В. Математическое моделирование процесса стабилизации жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 32-42. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_32

STABILIZATION PROCESS MATHEMATICAL MODELING FOR RIGID ROTOR THAT ROTATES IN ELECTROMAGNETIC BEARINGS

A.V. MukhinORCID: 0000-0003-2402-7016 e-mail: myhin-aleksey@yandex.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The problem of optimal stabilization of a rigid rotor rotating in electromagnetic bearings is considered. To solve the problem, a linear stationary control law is formed, according to the feedback principle for a linearized system. Two approaches for the problem solution are considered: stabilization on condition, and stabilization on full order output. Results obtained in the first approach are auxiliary and are used for comparative analysis. Basic result, from the viewpoint of the possibility of practical use is obtained within limits of the second approach, where electromagnet circuit currents were considered as measured parameters. As an optimality criterion, generalized H_∞ -norm of the linearized system was used; it allowed us to take into account both the external excitation and initial deviation of the rotor. To calculate the feedback parameters, the system of linear matrix inequalities was used. Results of rotating rotor dynamics mathematical modeling are presented. Quality estimations of transient phenomena in the system are given.

Key words: linear matrix inequalities, convex optimization methods, generalized H_∞ norm, rotor, control.

FOR CITATION: Mukhin, A.V. Stabilization process mathematical modeling for rigid rotor that rotates in electromagnetic bearings / A.V. Mukhin // Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 32-42. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_32

Введение

Электромагнитные подшипники представляют большой практический интерес для целого ряда промышленных применений. Преимуществом таких подшипников, в частности, является отсутствие физического контакта и, как следствие, отсутствие механического трения, что, в свою очередь, позволяет существенно увеличить срок эксплуатации и КПД по сравнению с традиционными механическими аналогами. Вместе с тем, одной из наиболее актуальных задач для электромагнитных подшипников является оптимальное управление динамикой ротора. Решению этой задачи посвящено немало количество как отечественных, так и зарубежных работ [1-4]. В большинстве из них рассматриваются линеаризованные системы, а в качестве основного метода синтеза стабилизирующих управлений используется аппарат линейных матричных неравенств.

В настоящей работе представлено решение задачи стабилизации ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках. Основным результатом является решение задачи стабилизации по выходу полного порядка, когда измерению доступна только часть компонентов вектора состояния. В качестве вспомогательной задачи рассматривалась стабилизация ротора по состоянию. В качестве показателя качества переходных процессов использовалась обобщенная H_∞ -норма системы, позволяющая учитывать влияние внешних возмущений и ненулевых начальных условий [1]. Для реализации указанных задач использовались техника линеаризации исходных дифференциальных уравнений, аппарат линейных матричных неравенств [5,6], а также методы теории выпуклой оптимизации, реализованные в виде стандартных команд пакета программ *MATLAB* [7].

Математическая модель вращающегося ротора

Схема, описывающая вращение ротора в магнитном поле, создаваемом четырьмя парами электромагнитов, представлена на рис. 1 [2].

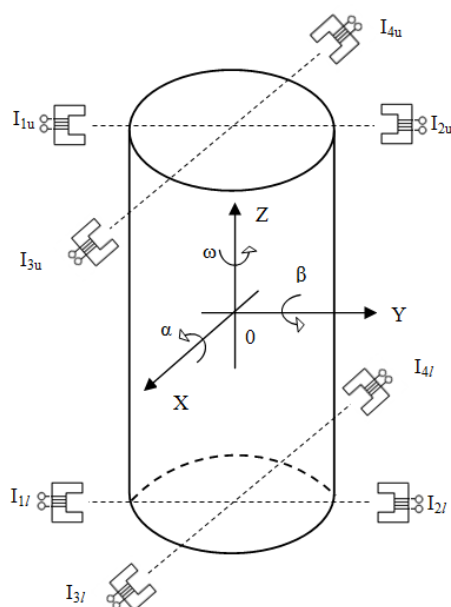


Рис. 1. Схема вращающегося ротора

Fig. 1. Rotating rotor diagram

Предполагается, что сверху и снизу также расположены магниты, которые удерживают ротор в центре системы. Таким образом, механическая система представляет собой вывешенное с помощью эффекта левитации жесткое тело, которое вращается в вертикальной

плоскости. Исходная нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающая такое движение в магнитном поле, записывается в следующем виде [2] (1):

$$\begin{aligned} J\ddot{\alpha} &= -l_0(F_2^u - F_1^u) + l_0(F_2^l - F_1^l) - J_z\omega\dot{\beta}, \\ J\ddot{\beta} &= l_0(F_3^u - F_4^u) - l_0(F_3^l - F_4^l) + J_z\omega\dot{\alpha}, \\ m\ddot{x} &= F_3^u - F_4^u + F_3^l - F_4^l, \\ m\ddot{y} &= F_2^u - F_1^u + F_2^l - F_1^l, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y – координаты центра масс ротора;

α, β – углы поворота ротора относительно осей X и Y, соответственно;

l_0 – расстояние от центра масс ротора до верхнего и нижнего подшипников;

m – масса ротора;

J, J_z – главные моменты инерции ротора;

ω – угловая частота вращения ротора относительно оси Z.

Пары электромагнитных сил, действующих со стороны электромагнитов, определяются следующими соотношениями [2] (2).

$$\begin{aligned} F_2^u - F_1^u &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{I_{2u}^2}{(S_0 - y_u)^2} - \frac{I_{1u}^2}{(S_0 + y_u)^2} \right], \\ F_2^l - F_1^l &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{I_{2l}^2}{(S_0 - y_l)^2} - \frac{I_{1l}^2}{(S_0 + y_l)^2} \right], \\ F_3^u - F_4^u &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{I_{3u}^2}{(S_0 - x_u)^2} - \frac{I_{4u}^2}{(S_0 + x_u)^2} \right], \\ F_3^l - F_4^l &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{I_{3l}^2}{(S_0 - x_l)^2} - \frac{I_{4l}^2}{(S_0 + x_l)^2} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где I_{ij} – сила тока в соответствующем электромагните;

L_0 – индуктивность каждого электромагнита;

S_0 – зазор в электромагните;

x_i, y_i – смещения ротора в электромагнитных подшипниках.

Смещения ротора связаны с переменными x, y, α, β следующими формулами (3):

$$x_u = x + \beta l_0, x_l = x - \beta l_0, y_u = y - \alpha l_0, y_l = y + \alpha l_0. \quad (3)$$

Представим силу тока в каждом подшипнике в виде суммы постоянной (I_0) и переменной (i_k) составляющих (4):

$$\begin{aligned} I_{1u} &= I_0 + i_1, I_{2u} = I_0 - i_1, I_{1l} = I_0 + i_2, I_{2l} = I_0 - i_2, \\ I_{3u} &= I_0 - i_3, I_{4u} = I_0 + i_3, I_{3l} = I_0 - i_4, I_{4l} = I_0 + i_4. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив уравнения (4) в уравнения (2), а затем уравнения (2) в (1), с учетом соотношений (3) получим систему нелинейных дифференциальных уравнений следующего вида (5):

$$\begin{aligned} J\ddot{\alpha} &= l_0 \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{(I_0 - i_2)^2}{(S_0 - y_l)^2} - \frac{(I_0 + i_2)^2}{(S_0 + y_l)^2} - \frac{(I_0 - i_1)^2}{(S_0 - y_u)^2} + \frac{(I_0 + i_1)^2}{(S_0 + y_u)^2} \right] - J_z\omega\dot{\beta}, \\ J\ddot{\beta} &= l_0 \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{(I_0 - i_3)^2}{(S_0 - x_u)^2} - \frac{(I_0 + i_3)^2}{(S_0 + x_u)^2} - \frac{(I_0 - i_4)^2}{(S_0 - x_l)^2} + \frac{(I_0 + i_4)^2}{(S_0 + x_l)^2} \right] + J_z\omega\dot{\alpha}, \\ m\ddot{x} &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{(I_0 - i_3)^2}{(S_0 - x_u)^2} - \frac{(I_0 + i_3)^2}{(S_0 + x_u)^2} + \frac{(I_0 - i_4)^2}{(S_0 - x_l)^2} - \frac{(I_0 + i_4)^2}{(S_0 + x_l)^2} \right], \\ m\ddot{y} &= \frac{L_0 S_0}{2} \left[\frac{(I_0 - i_1)^2}{(S_0 - y_u)^2} - \frac{(I_0 + i_1)^2}{(S_0 + y_u)^2} + \frac{(I_0 - i_2)^2}{(S_0 - y_l)^2} - \frac{(I_0 + i_2)^2}{(S_0 + y_l)^2} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

После линеаризации в окрестности положения равновесия (I_0, S_0) и перехода к безразмерным величинам система примет вид (6):

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} &= \lambda(i_1 - i_2) + 2\lambda\alpha - \rho\dot{\beta}, \\ \ddot{\beta} &= \lambda(i_4 - i_3) + 2\lambda\beta + \rho\dot{\alpha}, \\ \dot{x} &= -(i_3 + i_4) + 2x, \\ \dot{y} &= -(i_1 + i_2) + 2y.\end{aligned}\quad (6)$$

Необходимо дополнить эту систему уравнениями для токов i_k . Для этого запишем уравнения Кирхгофа для электрических цепей электромагнитов в линеаризованном виде (7):

$$\begin{aligned}i_1 &= (\dot{y} - \dot{\alpha}) - \mu i_1 + u_1, \\ i_2 &= -(\dot{y} + \dot{\alpha}) - \mu i_2 + u_2, \\ i_3 &= (\dot{x} + \dot{\beta}) - \mu i_3 + u_3, \\ i_4 &= -(\dot{x} - \dot{\beta}) - \mu i_4 + u_4.\end{aligned}\quad (7)$$

Комбинация систем (6) и (7) дает полную систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках.

Для составления системы ОДУ первого порядка введем следующие обозначения: $x_1 = \alpha$, $x_2 = \beta$, $x_3 = x$, $x_4 = y$, $x_5 = \dot{\alpha}$, $x_6 = \dot{\beta}$, $x_7 = \dot{x}$, $x_8 = \dot{y}$, $x_9 = i_1$, $x_{10} = i_2$, $x_{11} = i_3$, $x_{12} = i_4$. Тогда объединенная линейная система ОДУ примет следующий эквивалентный вид (8):

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_5, \\ \dot{x}_2 &= x_6, \\ \dot{x}_3 &= x_7, \\ \dot{x}_4 &= x_8, \\ \dot{x}_5 &= \lambda(x_9 - x_{10}) + 2\lambda x_1 - \rho x_6, \\ \dot{x}_6 &= \lambda(x_{12} - x_{11}) + 2\lambda x_2 + \rho x_5, \\ \dot{x}_7 &= -(x_{11} + x_{12}) + 2x_3, \\ \dot{x}_8 &= -(x_9 + x_{10}) + 2x_4, \\ \dot{x}_9 &= (x_8 - x_5) - \mu x_9 + u_1, \\ \dot{x}_{10} &= -(x_8 + x_5) - \mu x_{10} + u_2, \\ \dot{x}_{11} &= (x_7 + x_6) - \mu x_{11} + u_3, \\ \dot{x}_{12} &= -(x_7 - x_6) - \mu x_{12} + u_4.\end{aligned}\quad (8)$$

Параметры, входящие в систему уравнений (8) для рассматриваемого объекта равны: $\lambda=5.12$, $\mu=0.065$ и $\rho=2$.

Перед тем как непосредственно перейти к постановке задачи, необходимо отметить, что измерение всех компонент вектора состояний на практике весьма затруднительно и в ряде случаев может быть технически нереализуемой задачей. В связи с этим, целесообразно рассмотреть наиболее вероятный с практической точки зрения вариант, когда измерению доступна только определенная часть компонент вектора состояний, некоторая выборка. Будем считать, что измерению доступны только токи в цепях электромагнита, т.е., компоненты вектора состояний x_9 , x_{10} , x_{11} , x_{12} . При этих условиях введем для системы (8) уравнения измеряемого выхода для соответствующих компонент вектора состояний (9):

$$y_i = x_{i+8} + w_{i+8}, \quad i = \overline{1,4}, \quad (9)$$

w_i – погрешность измерения i -й компоненты вектора состояний.

Постановка задачи управления

Запишем систему в матрично-векторной форме для управляемой системы с учетом внешних возмущений, к которым относятся отброшенные при линеаризации нелинейные члены, а также погрешности, которые возникают при измерении токов (10):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u, \quad x(0) = x_0 \\ y &= C_2 x + D_2 w, \end{aligned} \quad (10)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_{12})^T \in R^{n_x}$ – вектор-функция состояния системы;
 $w = (w_1, w_2, \dots, w_{12})^T \in R^{n_w}$ – вектор-функция возмущений;
 $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T \in R^{n_u}$ – вектор-функция управления по току;
 $y = (y_1, y_2, \dots, y_4)^T \in R^{n_y}$ – измеряемый выход.

Будем считать, что возмущение представляет собой ограниченную в пространстве L_2 функцию с соответствующей нормой (11):

$$\|w\|^2 = \int_0^\infty |w|^2 dt < \infty. \quad (11)$$

Отметим, что оптимальное подавление таких возмущений, а именно возмущений с ограниченной энергией, достигается с использованием H_∞ -управления. Считаем, что оно является непрерывной или кусочно-непрерывной функцией. Также будем считать, что начальное положение ротора отлично от нуля и представляет собой начальное возмущение. Наряду с измеряемым выходом $y(t)$, введем в рассмотрение целевой выход $z \in R^{n_z}$, описываемый следующей формулой (12):

$$z = C_1 x + D_1 u. \quad (12)$$

В качестве количественной характеристики целевого выхода будем считать L_2 -норму (13):

$$\|z\|^2 = \int_0^\infty z^T z dt = \int_0^\infty (x^T C_1^T C_1 x + x^T C_1^T D_1 u + u^T D_1^T C_1 x + u^T D_1^T D_1 u) dt. \quad (13)$$

Минимизация функционала (13) позволяет ограничить не только величину управления, но также и величину вектора состояний. За счет подбора матриц можно варьировать компоненты измеряемого и целевого выходов. Матрицы, входящие в системы уравнений (10)-(12) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix}, \text{ где } A_{11} = A_{13} = A_{31} = 0_{4 \times 4}, A_{12} = I_{4 \times 4}, A_{22} = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & \rho G \end{pmatrix}, \\ A_{21} &= \begin{pmatrix} 2\lambda I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 2I_{2 \times 2} \end{pmatrix}, A_{23} = \begin{pmatrix} \lambda & -\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & \lambda \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, A_{32} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \\ A_{33} &= -\mu I_{4 \times 4}; \\ B_1 &= \begin{pmatrix} 0_{4 \times 8} & 0_{4 \times 4} \\ I_{8 \times 8} & 0_{8 \times 4} \end{pmatrix}; B_2 = \begin{pmatrix} 0_{8 \times 4} \\ I_4 \end{pmatrix}; C_2 = (0_{8 \times 8} \quad I_{4 \times 4}); D_2 = (0_{8 \times 8} \quad I_{4 \times 4}); \\ C_1 &= \begin{pmatrix} I_{12} \\ 0_{4 \times 12} \end{pmatrix}; D_1 = \begin{pmatrix} 0_{12 \times 4} \\ I_4 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Квадрат нормы целевого выхода с учетом матриц C_1 и D_1 будет равен (13*):

$$\|z\|^2 = \int_0^\infty (\sum_{i=1}^{12} x_i^2 + \sum_{i=1}^4 u_i^2) dt. \quad (13^*)$$

Отметим, что матрица A не является гурвицевой, следовательно, положение равновесия системы (10) является неустойчивым.

Будем различать два вида возмущений: начальное возмущение, когда $x(0) = x_0 \neq 0$ и внешнее возмущение, определяемое ранее введенным вектором возмущений. Поскольку на объект могут действовать возмущения обоих видов, целесообразно ввести обобщенный уровень гашения возмущений [1] (14):

$$J(u) = \sup_{\|w\|^2 + \rho_1^2 |x_0|^2 \neq 0} \frac{\|z\|}{[\|w\|^2 + \rho_1^2 |x_0|^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

где ρ_1 – весовой коэффициент.

Функционал (14) позволяет учесть возмущения обоих видов и поэтому, будет рассматриваться в дальнейшем в качестве основного. Теперь сформулируем две задачи, связанные с этим функционалом. Первая задача синтеза управления в предположении измерения полного состояния системы носит вспомогательный характер. С практической точки зрения эта задача не представляет собой особого интереса и используется в дальнейшем для сопоставительного анализа.

Задача 1. Для системы (10)-(12) найти закон управления в форме линейной обратной связи по состоянию вида (15):

$$u = \theta x, \quad (15)$$

где $\theta \in R^{n_u \times n_x}$.

Предполагается, что в каждый момент времени известны значения всех компонент вектора состояний с высокой степенью точности.

Задача 2. Для системы (10)-(12) найти управление по измеряемому выходу в виде линейного динамического регулятора вида (16):

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= A_r x_r + B_r u \\ u &= C_r x_r + D_r y, \end{aligned} \quad (16)$$

где $x_r \in R^{n_x}$ – состояние регулятора.

Систему уравнений (16) можно представить в виде одного эквивалентного уравнения (16*):

$$\dot{u} = C_r A_r x_r + C_r B_r u + D_r \dot{y}. \quad (16^*)$$

Компоненты вектора управления можно представить в следующем виде (17):

$$u_i = \sum_{j=1}^{n_x} C_r^{ij} x_j + \sum_{j=1}^{n_y} D_r^{ij} y_j, \quad i = \overline{1, n_u}. \quad (17)$$

Результаты именно этой задачи представляют наибольший практический интерес.

Синтез обобщенных H_∞ -оптимальных законов управления

Подход, используемый для решения сформулированных задач, предложен и подробно расписан в работе [5]. Кратко изложим конечные результаты, которые позволят решить поставленные задачи.

Синтез обобщенного H_∞ -управления по состоянию. Уравнение замкнутой системы с учетом введения обратной связи вида $u = \theta x$ примет следующий вид (18):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + B_2\Theta)x + B_1w, \quad x(0) = x_0 \\ z &= (C_1 + D_1\Theta)x = C_c x, \end{aligned} \quad (18)$$

где $A_c = A + B_2\Theta$ – матрица замкнутой системы.

Для объекта (17) выполняется неравенство $J(u = Qx) < \gamma$ тогда и только тогда, когда линейные матричные неравенства (19):

$$\begin{pmatrix} XA_c + A_c^T X^T & XB_c & C_c^T \\ B_c^T X^T & -\gamma^2 I_{n_w} & 0_{n_w \times n_z} \\ C_c & 0_{n_z \times n_w} & -I_{n_z} \end{pmatrix} < 0, \quad X < \gamma^2 \rho^2 I_{n_x}, \quad (19)$$

разрешимы относительно матрицы $X = X^T$.

Если расписать все составные матрицы, входящие в первое неравенство (19), затем умножить слева и справа на блочно-диагональную матрицу $\text{diag}(X^{-1}, I_{n_w}, I_{n_z})$ и ввести обозначения $X^{-1} = Y$ и $Z = \Theta Y$, а также применить лемму Шура ко второму неравенству, то получим следующие неравенства (20):

$$\begin{pmatrix} AY + Y^T A^T + B_2 Z + Z^T B_2^T & B_1 & Y C_1^T + Z^T D_1^T \\ B_1^T & -\gamma^2 I_{n_w} & 0_{n_w \times n_z} \\ C_1 Y + D_1 Z & 0_{n_z \times n_w} & -I_{n_z} \end{pmatrix} < 0 \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} Y & I_{n_x} \\ I_{n_x} & \gamma^2 \rho^2 I_{n_x} \end{pmatrix} > 0 \quad (21)$$

Если неравенства (19), (20) разрешимы относительно матриц $Y = Y^T$ и Z , то параметры обобщенного H_∞ -управления по состоянию находятся как $\Theta = ZY^{-1}$. Для определения оптимального значения функционала (14), необходимо найти точную нижнюю грань значений γ , при которой неравенства (20) и (21) разрешимы относительно $Y = Y^T > 0$, Z и $\gamma^2 > 0$. Такая задача успешно решается с использованием стандартной команды пакета MATLAB.

Синтез обобщенного H_∞ -управления по выходу. Объединим уравнения динамического регулятора (16) с соотношениями для управляемого объекта (10) и введем новую переменную $x_c = \text{col}(x, x_r)$. Тогда уравнения замкнутой системы, выраженные через x_c и w , примут вид (22):

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c w, \quad x_c(0) = \text{col}(x_0, 0) \\ z &= C_c x_c + D_c w, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{где } A_c = \begin{pmatrix} A + B_2 D_r C_2 & B_2 C_r \\ B_r C_2 & A_r \end{pmatrix}; B_c = \begin{pmatrix} B_1 + B_2 D_r D_2 \\ B_r D_2 \end{pmatrix}; C_c = (C_1 + D_1 D_r C_2 \quad D_1 C_r); D_c = D_1 D_r D_2.$$

Вычисление матрицы регулятора основывается на условии $J(Q) < \gamma$. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы линейные матричные неравенства (23):

$$\begin{pmatrix} XA_c + A_c^T X^T & XB_c & C_c^T \\ B_c^T X^T & -\gamma^2 I_{n_w} & D_c^T \\ C_c & D_c & -I_{n_z} \end{pmatrix} < 0, \quad X_{11} < \gamma^2 \rho^2 I_{n_x}, \quad (23)$$

были разрешимы относительно положительной симметрической блочной матрицы X , которую можно представить в виде $X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{pmatrix}$.

Технология решения состоит в следующем. С помощью серии матричных преобразований, учитывая блочную структуру матрицы X , необходимо привести неравенство (23) к стандартному линейному матричному неравенству следующего вида (24):

$$\Psi + P^T \Theta^T Q + Q^T \Theta P < 0. \quad (24)$$

Это неравенство разрешимо тогда и только тогда, когда разрешимы следующие неравенства [5] (25):

$$W_P^T \Psi W_P < 0, \quad W_Q^T \Psi W_Q < 0 \quad (25)$$

где W_P и W_Q – ядра матриц P и Q соответственно, т.е., $PW_P = 0$ и $QW_Q = 0$.

При выполнении всех необходимых матричных преобразований в соответствии с указанной выше технологией неравенства (25) примут вид (26):

$$\begin{pmatrix} N_1^T & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{11}A + A^T X_{11} & X_{11}B_1 & C_1^T \\ B_1^T X_{11} & -\gamma^2 I_{n_w} & 0_{n_w \times n_z} \\ C_1 & 0_{n_z \times n_w} & -I_{n_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} N_2^T & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{11}A^T + AY_{11} & Y_{11}C_1^T & B_1 \\ C_1 Y_{11} & -I_{n_z} & 0_{n_z \times n_w} \\ B_1^T & 0_{n_w \times n_z} & -\gamma^2 I_{n_w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_2 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (27)$$

где Y_{11} – левый верхний блок положительной симметрической матрицы $Y = X^{-1}$. Столбцы матриц N_1 и N_2 образуют базисы ядер матриц $(C_2 \ D_2)$ и $(B_2^T \ D_1^T)$ соответственно.

Поскольку матрицы X и Y должны быть взаимобратными, необходимо выполнение следующего неравенства [5] (28):

$$\begin{pmatrix} X_{11} & I_{n_x} \\ I_{n_x} & Y_{11} \end{pmatrix} \geq \quad (28)$$

Для существования обобщенного H_∞ -управления по выходу при заданном параметре γ необходимо и достаточно, чтобы неравенства (26)-(28), а также неравенство (29):

$$X_{11} < \gamma^2 \rho^2 I_{n_x}, \quad (29)$$

были разрешимы относительно положительных симметрических матриц X_{11} и Y_{11} .

Если матрицы X_{11} и Y_{11} найдены, матрица X может быть восстановлена по формуле [5] (30):

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{11} - Y_{11}^{-1} \\ X_{11} - Y_{11}^{-1} & X_{11} - Y_{11}^{-1} \end{pmatrix} \quad (30)$$

Наконец, матрица параметров регулятора Θ находится из линейного матричного неравенства (24) с помощью стандартной команды пакета MATLAB. Отметим, что матрица $X \in R^{2n_x \times 2n_x}$ представляет собой матрицу ограничивающего эллипсоида, в котором заключен вектор x_c .

Результаты численных расчетов

Прежде чем приступить к решению поставленных задач, необходимо преобразовать исходную нелинейную систему уравнений (5) к безразмерному виду. Для этого подставим соотношения (3) и (4) в систему (5) и получим следующую систему дифференциальных уравнений (31):

$$\ddot{\alpha} = \frac{\lambda}{4} \left[-\frac{(1-i_1)^2}{(1-y+\alpha)^2} + \frac{(1+i_1)^2}{(1+y-\alpha)^2} + \frac{(1-i_2)^2}{(1-y+\alpha)^2} - \frac{(1+i_2)^2}{(1+y+\alpha)^2} \right] - \rho \dot{\beta},$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\beta} &= \frac{\lambda}{4} \left[\frac{(1-i_3)^2}{(1-x-\beta)^2} - \frac{(1+i_3)^2}{(1+x+\beta)^2} - \frac{(1-i_4)^2}{(1-x+\beta)^2} + \frac{(1+i_4)^2}{(1+x-\beta)^2} \right] + \rho\dot{\alpha}, \\
\ddot{x} &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-i_3)^2}{(1-x-\beta)^2} - \frac{(1+i_3)^2}{(1+x+\beta)^2} + \frac{(1-i_4)^2}{(1-x+\beta)^2} - \frac{(1+i_4)^2}{(1+x-\beta)^2} \right], \\
\ddot{y} &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-i_1)^2}{(1-y+\alpha)^2} - \frac{(1+i_1)^2}{(1+y-\alpha)^2} + \frac{(1-i_2)^2}{(1-y+\alpha)^2} - \frac{(1+i_2)^2}{(1+y+\alpha)^2} \right].
\end{aligned} \tag{31}$$

Тогда нелинейная система дифференциальных уравнений примет следующий вид (32):

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_5, \dot{x}_2 = x_6, \dot{x}_3 = x_7, \dot{x}_4 = x_8, \\
\dot{x}_5 &= \frac{\lambda}{4} \left[-\frac{(1-x_9)^2}{(1-x_4+x_1)^2} + \frac{(1+x_9)^2}{(1+x_4-x_1)^2} + \frac{(1-x_{10})^2}{(1-x_4+x_1)^2} - \frac{(1+x_{10})^2}{(1+x_4+x_1)^2} \right] - \rho x_6, \\
\dot{x}_6 &= \frac{\lambda}{4} \left[\frac{(1-x_{11})^2}{(1-x_3-x_2)^2} - \frac{(1+x_{11})^2}{(1+x_3+x_2)^2} - \frac{(1-x_{12})^2}{(1-x_3+x_2)^2} + \frac{(1+x_{12})^2}{(1+x_3-x_2)^2} \right] + \rho x_5, \\
\dot{x}_7 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-x_{11})^2}{(1-x_3-x_2)^2} - \frac{(1+x_{11})^2}{(1+x_3+x_2)^2} + \frac{(1-x_{12})^2}{(1-x_3+x_2)^2} - \frac{(1+x_{12})^2}{(1+x_3-x_2)^2} \right], \\
\dot{x}_8 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-x_9)^2}{(1-x_4+x_1)^2} - \frac{(1+x_9)^2}{(1+x_4-x_1)^2} + \frac{(1-x_{10})^2}{(1-x_4+x_1)^2} - \frac{(1+x_{10})^2}{(1+x_4+x_1)^2} \right], \\
\dot{x}_9 &= (x_8 - x_5) - \mu x_9 + u_1, \\
\dot{x}_{10} &= -(x_8 + x_5) - \mu x_{10} + u_2, \\
\dot{x}_{11} &= (x_7 + x_6) - \mu x_{11} + u_3, \\
\dot{x}_{12} &= -(x_7 - x_6) - \mu x_{12} + u_4.
\end{aligned} \tag{32}$$

Приведем результаты численных расчетов в графическом виде. Расчет включал в себя вычисление матрицы X , вычисление матриц параметров регулятора и замкнутой системы, а затем решение системы (31). Для решения систем дифференциальных уравнений использовались одношаговые явные методы Рунге-Кутты четвертого и пятого порядков.

Обобщенное H_∞ -управление по состоянию. Положим, что здесь и далее весовой коэффициент в функционале равен $\rho_1=0,05$. Подставим найденный закон управления вида (15) в систему (31). Матрица параметров регулятора имеет размерность $\theta \in R^{4 \times 12}$. Графики зависимостей углов поворота ротора относительно осей X и Y $x_1(t)$ и $x_2(t)$ показаны на рис. 2, 3.

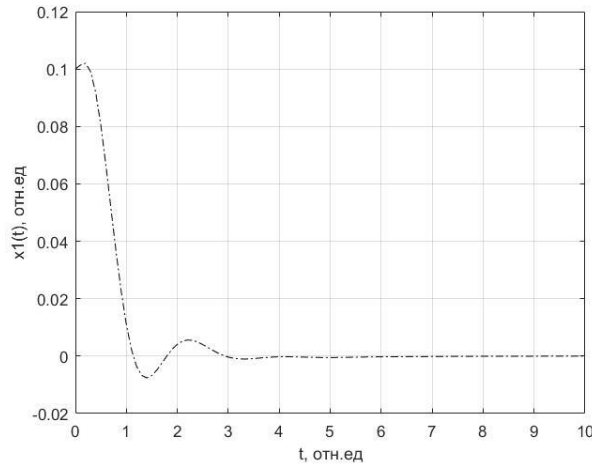


Рис. 2. Зависимость угла поворота относительно оси X от времени

Fig. 2. Angle of rotation relative to X-axis dependence on time

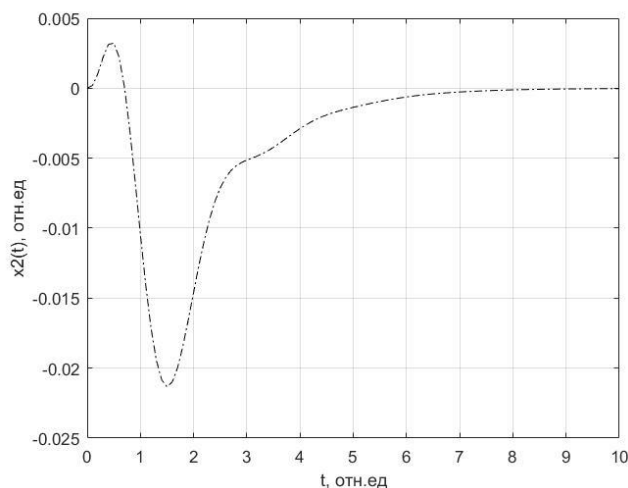


Рис. 3. Зависимость угла поворота относительно оси Y от времени

Fig. 3. Angle of rotation relative to Y-axis dependence on time

Обобщенное H_∞ -управление по выходу полного порядка. Как отмечалось выше, считаем, что измерению доступны только токи в цепях электромагнита. Матрица параметров регулятора представляет собой матрицу $\Theta \in R^{16 \times 16}$, а матрица замкнутой системы $A_c \in R^{24 \times 24}$. Подставим найденный регулятор вида (16) в систему (32). Графики $x_1(t)$ и $x_2(t)$ представлены на рис. 4,5.

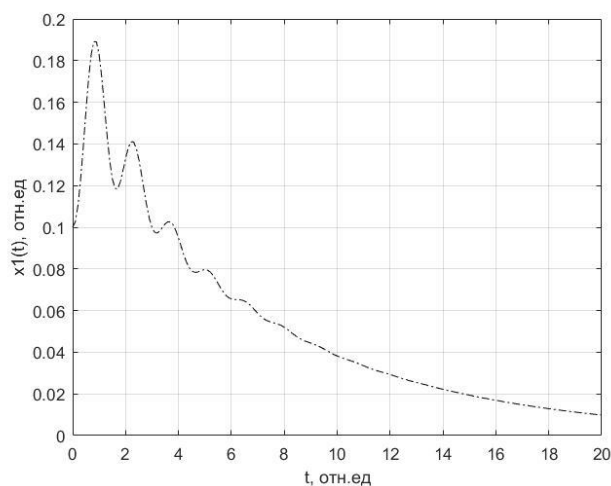


Рис. 4. Зависимость угла поворота относительно оси X от времени

Fig. 4. Angle of rotation relative to X-axis dependence on time

Количественной оценкой качества переходного процесса данного закона управления является отношение действительных частей максимального и минимального собственных чисел матрицы замкнутой системы A_c , т.е., величина $\eta = \frac{Re(\lambda_{max})}{Re(\lambda_{min})}$ [1]. Чем меньше отношение, тем, соответственно, лучше качество переходных процессов. Для данного закона управления имеем $\eta_{out}=7,86$. Аналогичная величина для управления по состоянию составила $\eta_{state}=5,9$. На основании этих значений можно сделать вывод о высоком качестве переходных процессов.

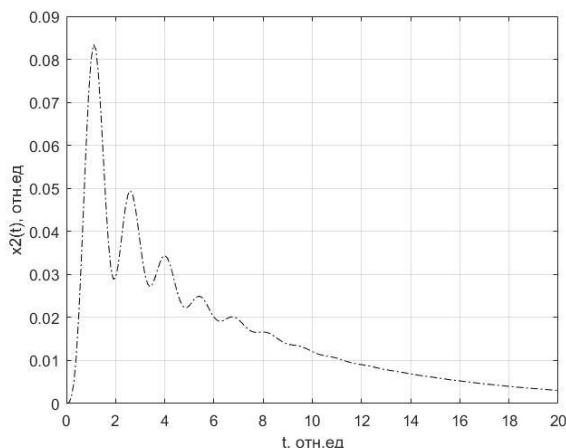


Рис. 5. Зависимость угла поворота относительно оси Y от времени

Fig. 5. Angle of rotation relative to Y-axis dependence on time

Заключение

Рассмотрена задача стабилизации вертикально вращающегося ротора в электромагнитных подшипниках. Построен линейный динамический регулятор полного порядка на основе измерений токов в цепях электромагнитов. Для учета влияния возмущений и погрешности измерений рассматривалась ограниченная в L_2 -норме функция. В качестве показателя качества переходных процессов использовалась обобщенная H_∞ -норма системы, позволяющая учитывать влияние как внешних возмущений, так и ненулевых начальных условий. В качестве основного математического инструмента использовался аппарат линейных матричных неравенств. Проведенные численные эксперименты показали, что, измеряя только токи в цепях электромагнитов, можно синтезировать закон управления по выходу с высоким качеством переходных процессов.

Автор благодарит профессора кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа ИТММ Д.В. Баландина за консультацию и ценные замечания.

Библиографический список

1. 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.
2. Баландин, Д.В. Управление движением вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках / Д.В. Баландин, М.М. Коган // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 5. С. 3-17.
3. Davoodi, M. H_2 - and H_∞ -Dynamic Output Feedback Control of a Magnetic Bearing System via LMIs / M. Davoodi, P.K. Sedgh, R. Amirifar // Proc. American Control Conf. Washington, USA, 2008. P. 2522–2527.
4. Yang, Yifei Optimal Control and H_∞ Output Feedback Design Options for Active Magnetic Bearing Spindle Position Regulation / Yifei Yang, Huangqiu Zhu // J. Networks. 2013. V. 8. P. 1624-1631.
5. Баландин, Д.В. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007.
6. Boyd, S. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory / S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan. Philadelphia: SIAM, 1994.
7. Gahinet, P. The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide / P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali. – Natick, MA: The MathWorks, Inc., 1995.

*Дата поступления
в редакцию: 11.12.2020*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 539.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОНОВ

А.А. Басов

ORCID: 0000-0002-9249-1788 e-mail: basov-aa@ya.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Г.М. Соколова**

ORCID: 0000-0002-3193-2391 e-mail: sokolovagm@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Яшина**

ORCID: 0000-0002-5641-7521 e-mail: alla.nic.yashina@gmail.com

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

Анализируется возможность исследования характеристик нейтронов и процессов их распространения в веществе без использования радиоактивных препаратов и дорогостоящего радиометрического оборудования. Поставленная задача решается созданием виртуального практикума с применением имитационного компьютерного моделирования исследуемых процессов. Это позволяет, с одной стороны, организовать практикум по физике элементарных частиц при разумных материальных затратах, с другой – создает возможность наглядного представления явлений микромира. Предлагается виртуальный эксперимент по изучению процесса распространения нейтронов в веществе. В результате определяется сечение их поглощения, а также энергия нейтронов, испускаемых источником. Разработан виртуальный лабораторный комплекс для исследования важных характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом; наблюдается хорошая корреляция с натурными экспериментами.

Ключевые слова: физика элементарных частиц, нейтроны, радиоактивные препараты, энергия нейтронов, сечение рассеяния и поглощения, взаимодействие нейтронов с веществом, компьютерное моделирование, виртуальный лабораторный комплекс.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Басов, А.А. Компьютерное моделирование натурального эксперимента по определению характеристик нейтронов / А.А. Басов, Г.М. Соколова, А.Н. Яшина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 43-49. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

COMPUTER SIMULATION OF NEUTRONS PARAMETERS DETERMINATION FULL-SCALE EXPERIMENT

A.A. Basov

ORCID: 0000-0002-9249-1788 e-mail: basov-aa@ya.ru

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

G.M. Sokolova

ORCID: **0000-0002-3193-2391** e-mail: **sokolovagm@gmail.com**

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

A.N. Yashina

ORCID: **0000-0002-5641-7521** e-mail: **alla.nic.yashina@gmail.com**

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

Abstract. The possibility of studying neutron parameters and processes of propagation therefore in a substance without use of radioactive preparations and expensive radiometric equipment, is analyzed. The posed problem is solved by creating a virtual practicum which involves computer simulation of the processes under study. This makes it possible, on the one hand, to organize a workshop on elementary particle physics at reasonable material costs, and on the other hand, it creates the possibility of microcosm phenomena visual representation. A virtual experiment is proposed to study the process of neutron propagation in substance. As a result, cross section of absorption therefore is determined, as well as energy of neutrons emitted by the source. Virtual laboratory complexes are developed to study important parameters of neutrons and interaction therefore with substances. A good correlation with full-scale experiments is observed.

Key words: particle physics, neutrons, scattering and absorption cross section, energy of neutrons, radioactive products, interaction of neutrons with the substance, computer simulation, virtual laboratory complex.

FOR CITATION: Basov A.A., Sokolova G.M., Yashina A.N. Computer simulation of neutrons parameters determination full-scale experiment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №2. P. 43-49.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

Цель предлагаемой работы – показать, что в ряде случаев сложный натуральный физический эксперимент можно осуществить, заменив его компьютерной моделью, имитирующей лабораторные установки. В частности, это касается исследования характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом. Знание характеристик источников нейтронов и процессов взаимодействия нейтронного излучения с веществом необходимо не только при разработке физических основ реакторов, но и при разработке ядерно-физических приборов для обеспечения безопасности, методов анализа вещества, методов нейтронного каротажа и многих других прикладных нейтронных технологий.

В рамках исследований субатомной структуры материи физические явления, происходящие на сверхмалых расстояниях за сверхмалые времена, можно изучать только по столкновениям и распадам атомных ядер и элементарных частиц. Как правило, в этих процессах принимают участие частицы высоких энергий. В частности, оценка нижней границы энергии нейтронов, с помощью которых можно исследовать строение атомных ядер, дает величину порядка 30 МэВ. Поэтому в ядерной физике вопрос о методах измерений имеет принципиальное значение. Частицы с высокой энергией могут настолько нарушить ход исследуемых процессов, что недостижимой окажется нужная точность измерения, или оно вообще утратит смысл. Кроме того, при наличии нейтронного излучения всегда существует вероятность активации изотопов элементов, из которых состоят окружающие вещества. В большинстве случаев активация окружающих тел проявляется в виде появления в их составе короткоживущих радиоактивных изотопов. Для предупреждения нежелательного облучения персонала в процессе работы необходимо предусмотреть проверку уровня мощности гамма-излучения, исходящего от элементов установки. Поэтому создание и использование лабораторной базы таких исследований сопряжено с большими материальными затратами.

Для изучения столкновений микрочастиц необходимо иметь стабильно работающий источник частиц-снарядов, мишени с заранее известными свойствами и регистрирующее устройство для частиц, являющихся продуктами столкновений.

Работа источников нейтронов может быть основана на различных ядерных реакциях.

1. В генераторах быстрых нейтронов используются т.н. термоядерные реакции (d,d) и (d,t) . Реакция (d,n) сводится к «переходу» протона из бомбардирующего дейтрона в бомбардируемое ядро, в результате чего освобождается нейтрон. Энергия реакции равна разности энергии связи протона в конечном ядре и в дейтроне. Энергия связи протона (и нейтрона) в дейтроне очень мала – 2,23 МэВ. В большинстве других ядер энергия связи нейтрона значительно выше, поэтому для многих ядер энергия реакции (d,n) положительна и такие реакции могут наблюдаться уже при небольших энергиях падающих дейтронов.

2. Источники на основе реакции деления. В таких источниках нейтроны, испускаемые радионуклидными источниками, возникают вследствие протекания в материале источника различных ядерных реакций. Наиболее распространенные из них – реакции спонтанного деления и (α,n) . (α,n) – источники нейтронов представляют собой комбинацию источника α -частиц (радий, полоний, плутоний) с элементом, у которого малая энергия связи нуклонов. В результате взаимодействия α -частицы с таким ядром получают поток нейтронов. Спектр нейтронов (α,n) -источника непрерывен, энергия нейтронов меняется от 0,1 до 12 МэВ.

3. Большинство важных в прикладном отношении нейтронных реакций наиболее интенсивно идет при низких энергиях нейтронов, например, нейтронография, медицина, исследование фундаментальных симметрий взаимодействия, активационный анализ изотопов и т.д. В связи с этим, необходимо замедлить нейтроны. Нейтрон теряет энергию при рассеянии на ядрах. При неупругом рассеянии происходит возбуждение ядра, с которым произошло столкновение нейтрона; часть кинетической энергии нейтрона превращается во внутреннюю энергию ядра-мишени. При упругом рассеянии кинетическая энергия нейтрона переходит (частично или полностью) в кинетическую энергию ядра-мишени, возбуждения последнего не происходит. Известно, что наибольшие потери энергии нейтрон претерпевает при упругом рассеянии на легких ядрах. Поэтому в качестве замедлителя используется вода или парафин. Таким образом, нейтроны замедляются до энергий порядка электрон-вольт.

В качестве мишеней используются ядра и частицы с достаточно большим временем жизни (не менее нескольких минут), т.е., стабильные и достаточно долго живущие ядра. Принципиальная трудность измерений характеристик микрочастиц состоит в том, что детектор – это макросистема, воздействие на которую со стороны микрочастицы является очень слабым. Для преодоления этой трудности конструкция детекторов такова, что слабое воздействие используется только для стимуляции вторичных процессов, формирующих сигнал макроскопической величины. Для этого рабочее пространство детектора заполняется веществом в метастабильном состоянии, для изменения которого достаточно малых возмущений, производимых микрочастицей. Чтобы зарегистрировать нейтральные частицы, в частности – нейтроны, используют реакции с участием атомных ядер, протекающие с образованием заряженных частиц (в основном, электронов) и γ -квантов, которые впоследствии обнаруживаются. При этом, как правило, наиболее важной оказывается ионизационная способность этих частиц. В частности, регистрирующим устройством может быть счетчик Гейгера или сцинтилляционный детектор. Нейтроны, уловленные сцинтилляционным детектором, возбуждают кристаллическую структуру, которая переизлучает фотон. Фотон попадает в фотоэлемент. Детектор может регистрировать как число вылетевших в результате фотоэффекта электронов, так и их энергию.

Таким образом, в ядерных исследованиях методические вопросы весьма существенны в связи с тем, что экспериментальные комплексы очень сложны и дороги. Они, как правило, потребляют много энергии и нуждаются в обслуживании квалифицированными специали-

стами многих профилей. Поэтому создание и использование лабораторной базы таких исследований сопряжено с большими интеллектуальными и материальными затратами.

Для исследования результатов взаимодействия нейтронов с веществом можно использовать установку, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

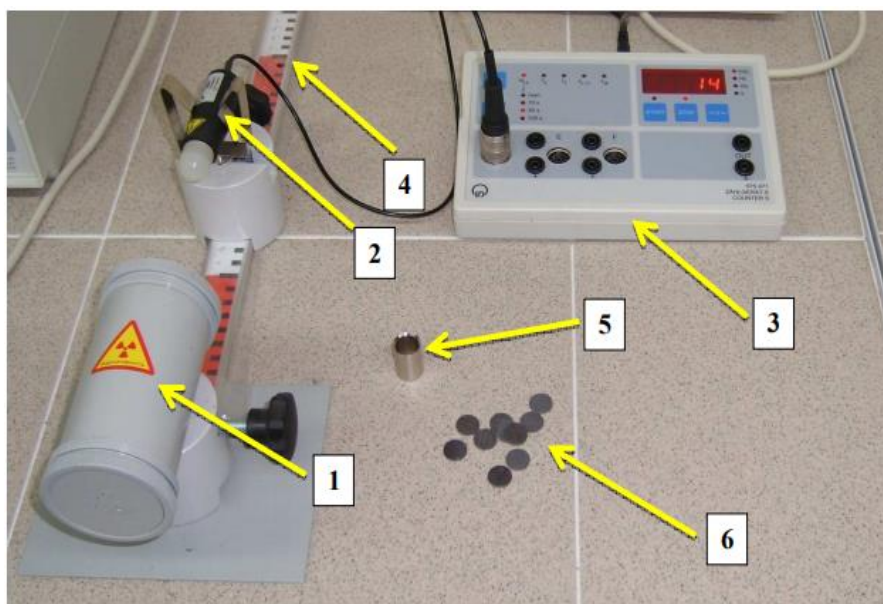


Рис. 1. Схема установки

- 1 – контейнер с радиоактивным препаратом;
 2 – сцинтилляционный детектор с фотоумножителем;
 3 – пересчетное устройство с индикатором режима работы (счетчик импульсов и индикатор времени); 4 – линейка;
 5 – кювета для исследуемых материалов; 6 – исследуемые пластины

Fig. 1. Installation diagram

- 1 – container with radioactive preparation; 2 – scintillation detector with photomultiplier;
 3 – scaling unit with operating mode indicator (pulse counter and time indicator);
 4 – ruler; 5 – cuvette for tested materials; 6 – tested plates

Источник представляет собой таблетку из диоксида плутония с радионуклидом плутоний-238 и слоя порошка бериллия. Плутониевый источник α -частиц окружен бериллием, у которого малая энергия связи нуклонов. В результате поглощения α -частиц бериллием получают поток нейтронов. Нейтроны, получаемые в таком источнике, имеют широкий энергетический спектр с энергией нейтронов до 5 МэВ. Далее они замедляются в органическом замедлителе до энергий порядка электрон-вольт. Испускаемые источником нейтроны проходят через фильтры (6) из пластин исследуемого материала и регистрируются детектором (2). Импульсы от детектора через формирователь поступают на счетный прибор (3). Аналогичные исследования проводятся, например, в лабораториях НИЯУ МИФИ [1]. В рамках данных работ экспериментально определяются угловые и энергетические характеристики источников нейтронов, исследуются характеристики взаимодействия нейтронов с веществом, проводятся эксперименты по изучению наведенной быстрыми нейтронами активности. Используются изотопные источники и компактные генераторы нейтронов. Экспериментальная база включает в себя современное радиометрическое и спектрометрическое оборудование, в том числе – уникальное спектрометрическое оборудование, разработанное в НИЯУ МИФИ [1]. Поскольку для постановки экспериментов с источниками радиоактивных излучений требуется дорогостоящее оборудование и радиоактивные препараты, для работы с кото-

рыми необходимо соблюдение норм радиационной безопасности (НРБ) [2–8], что часто бывает затруднительным, возможен другой подход к решению поставленной задачи.

Бурное развитие в последнее время информационных технологий привело к созданию компьютерных моделей экспериментальных установок. Такое моделирование, с одной стороны, создает возможность наглядного представления о явлениях, происходящих в микромире, а с другой – позволяет получить результаты, достаточно хорошо коррелирующие с натурным экспериментом. Данный подход, в частности, является весьма продуктивным при создании лабораторий физического практикума в вузах. Позволяя расширить круг рассматриваемых задач и сократить продолжительность выполнения измерений в эксперименте, он способствует лучшему усвоению изучаемого вопроса и особенно актуален при изучении характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом. Блок-схема виртуальной установки эксперимента по взаимодействию нейтронов с атомами некоторого вещества приведена на рис. 2.

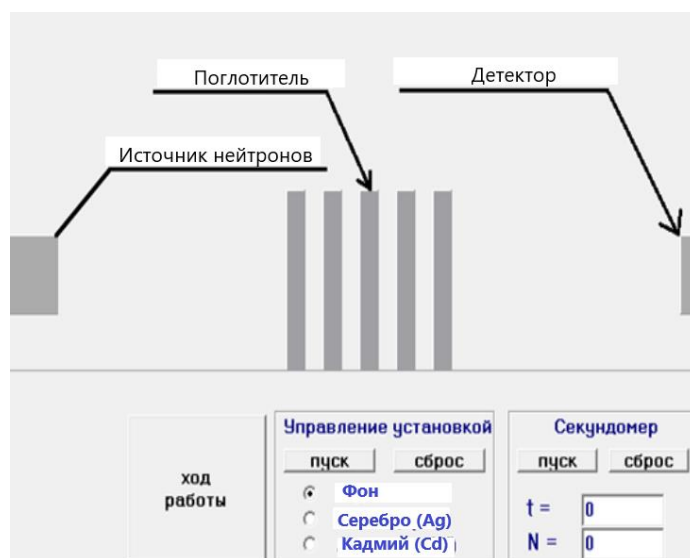


Рис. 2. Блок-схема виртуальной установки

Fig. 2. Virtual installation flow chart

При загрузке исполняемого файла в рабочем окне появляется изображение схемы установки: «источника нейтронов», таймера и регистрирующего устройства. Выполняется имитация установки пластин поглотителя. Расчетная часть программы позволяет выбирать материал и толщину пластинки, поглощающей нейтроны. Программа позволяет задавать толщину мишени от 10 до 50 см. Количество частиц, зарегистрированных счетчиком, моделируется в соответствии с законом поглощения излучения веществом, поскольку учитывается экспоненциальная зависимость числа выбывающих из потока частиц от материала поглотителя. Для этого в программе задается, что толщина пластинки-поглотителя обратно пропорциональна коэффициенту поглощения в данном материале. Таким образом, показания счетчика зависят от материала и толщины пластинок, поставленных между источником и детектором.

Поскольку на нейтроны не действуют кулоновские силы, они взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов. За счет такого взаимодействия они либо поглощаются, либо изменяют направление движения (рассеиваются). Поэтому полное сечение взаимодействия нейтрона с ядром складывается из двух слагаемых. При уменьшении энергии нейтронов сечение упругого рассеяния, которое пропорционально площади сечения ядра, остается примерно постоянным на уровне нескольких барн, а сечение радиационного захвата растет по закону $1/V$, где V – скорость налетающего нейтрона. Таким образом, для тепловых нейтронов основной характеристикой является сечение поглощения. Нейтроны, испускаемые ис-

точником, проходят через систему фильтров и регистрируются детектором, показания которого отображаются на схеме. В предложенной работе фильтры представляют собой пластины, изготовленные из серебра и кадмия ($^{107}_{47}\text{Ag}$ и $^{113}_{48}\text{Cd}$). Зарегистрировав количество нейтронов, испущенных источником, и число нейтронов, прошедших сквозь пластины, можно найти коэффициент поглощения. В работе также учитывается естественный фон. Для этого регистрируют показания детектора в отсутствии работы источника.

Число нейтронов, поглощенных слоем вещества, при прохождении поглотителя толщиной dx , пропорционально dx и числу нейтронов N , падающих на слой вещества dx . Таким образом, изменение числа нейтронов в пучке равно (1):

$$dN = -\mu N dx \quad (1)$$

Коэффициент поглощения $\mu = n\sigma$, где n – концентрация ядер поглотителя, σ – сечение поглощения. Концентрацию ядер можно найти как $n = \frac{\rho N_A}{M}$, где ρ – плотность материала поглотителя, M – его молярная масса, N_A – число Авогадро.

Из равенства (1) следует, что коэффициент поглощения равен относительному изменению нейтронного пучка при прохождении слоя единичной толщины (2):

$$\mu = \frac{dN}{N dx} \quad (2)$$

При интегрировании выражения (1) получим (3)-(4):

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N} \quad (4)$$

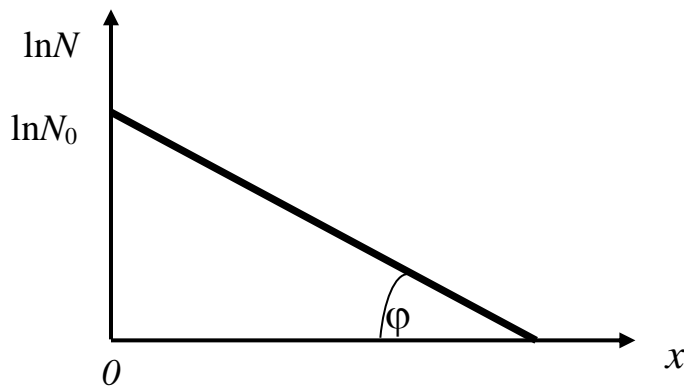


Рис. 3. График для определения коэффициента поглощения

Fig. 3. Graph for absorption coefficient determination

Из соотношения (4) следует, что, построив в полулогарифмическом масштабе график зависимости числа зарегистрированных импульсов от толщины поглотителя (рис. 3), можно найти коэффициент поглощения по тангенсу угла наклона линии графика к оси x , а используя его значение – сечение поглощения (5):

$$\sigma = \frac{\mu M}{\rho N_A} \quad (5)$$

При малых энергиях нейтронов сечение поглощения обратно пропорционально их скорости. Тогда, используя данные для соотношения между сечением поглощения σ_T и энергией E_T для тепловых нейтронов [9], можно найти энергию E нейтронов, испускаемых заданным источником (6):

$$\sigma = \sigma_T \frac{V_T}{V} = \sigma_T \sqrt{\frac{E_T}{E}}, \quad E = E_T \left(\frac{\sigma_T}{\sigma} \right)^2. \quad (6)$$

При построении модели использована программа, разработанная с помощью среды *Visual Studio 2017*, а также *Net Framework* и включенной библиотеки *Windows Forms*. Графический интерфейс реализован с помощью методов из библиотеки *Windows Forms*, вычислительные алгоритмы написаны на языке *C#* для *NET Framework 4.5*, что позволяет запускать данную программу на версиях ОС *Windows* (начиная с *Windows XP*) и *Linux*.

Рассматриваемая программа позволяет выбирать различные поглощающие материалы и толщину пластинок. Для уменьшения статистической погрешности необходимо набрать достаточное количество зарегистрированных детектором нейтронов. Это достигается увеличением времени проведения эксперимента. По предложенной методике были сделаны, в частности, оценки энергии и сечения поглощения нейтронов для $^{107}_{47}\text{Ag}$, которые показали хорошую корреляцию с натурным экспериментом [10].

Заключение

Предложенный виртуальный практикум с применением имитационного компьютерного моделирования исследуемых процессов дает возможность исследовать характеристики нейтронов и их взаимодействие с веществом без использования радиоактивных препаратов и дорогостоящего радиометрического оборудования. Не заменяя традиционные методы исследования, применение компьютерных моделей в физическом практикуме открывает новые перспективы решения исследовательских и прикладных задач в области ядерной физики. Целесообразно внедрение этих технологий в процесс обучения студентов физических специальностей в условиях невозможности проведения натуральных экспериментов.

Библиографический список

1. **Кадилин, В.В.** Взаимодействие нейтронов с веществом / В.В. Кадилин, Е.В. Рябева, В.Т. Само-садный // Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ.
2. **Антонова, И.А.** Определение энергии нейтронов по протонам отдачи / И.А. Антонова, А.Н. Бояркина, Н.Г. Гончарова и др. // Практикум по ядерной физике. Учеб. пособие для студ. естеств. спец. вузов. М., МГУ, 1988. Лаб. работа 10. – С. 145.
3. **Schneider, W.** Kernphysik Unterricht mit einer Neutronenquelle // Math. und naturwiss. Unterricht. Vol.12. № 6.1959. С 255-262.
4. **Veit, J.J.** Use of a neutron generator in an undergraduate laboratory / J.J. Veit, R.H. Lindsay // «Amer. J. phys.». Vol. 36. № 5. 1968. P. 432-440.
5. **Кадилин, В.В.** Взаимодействие нейтронов с веществом / В.В. Кадилин, Е.В. Рябева, В.Т. Само-садный // Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011.
6. **Мухин, К.Н.** Экспериментальная ядерная физика. Т.2 / К.Н. Мухин. – СПб. Лань, 2009.
7. **Авданина, Э.А.** Практикум по взаимодействию ионизирующих излучений с веществом / Э.А. Авданина, А.Р. Барткевич, М.Д. Дежурко и др. – Минск: БГУ, 2014. [Электронный ресурс]: URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/149155>.
8. **Рябева, Р.Ф.** Прикладная нейтронная физика: Лабораторный практикум / Е.В. Рябева, Р.Ф. Ибрагимов, В.В. Кадилин – М.: Буки Веди, 2019. – 110 с.
9. Справочник по ядерной физике под ред. Л.А. Арцимовича// ФИЗМАТЛИТ, М. 1963.
10. **Minor, T.C.** Undergraduate experiment to find nuclear sizes by measuring total cross sections for fast neutrons/ T.C. Minor, F.D Martin., H.E Montgomery, u.a // Amer. J. Phys. 1969. 37. № 6. P. 649.

*Дата поступления
в редакцию: 20.10.2020*

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ И ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

И.С. Худяков

ORCID: **0000-0002-6375-9124** e-mail: **ilia.kh@nstuedu.com**

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

Г.Н. Власичев

ORCID: **0000-0003-2705-1900** e-mail: **vlas@mts-nn.ru**

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

Представлен обзор основных проектов реакторных установок малой мощности, проанализированы основные тенденции их развития, а также современные конструктивные решения; изложены основные физические принципы реакторов данного типа. Рассмотрены эксплуатационные, производственные, конструктивные и строительно-монтажные особенности, обосновывающие экономическую эффективность реакторов малой мощности в современных реалиях. Объектом исследования выступают проекты маломощных и модульных реакторов, реализуемые как в России, так и за рубежом. Рассмотрены четыре основных типа установок: с реакторами на легкой воде, с реакторами на быстрых нейтронах, с высокотемпературными реакторами с графитовым замедлителем и различными видами реакторов с жидкосолевым теплоносителем. Сделан вывод о превалировании в настоящее время водо-водяных реакторов, а также реакторов на быстрых нейтронах, что коррелирует с тенденциями в области энергетических реакторов большой мощности. В зарубежных проектах интенсивно развиваются высокотемпературные газоохлаждаемые и жидкосолевыми реакторы малой мощности.

Ключевые слова: реакторы малой мощности, реакторы на легкой воде, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, жидкосолевыми реакторы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Худяков, И.С. Обзор современных тенденций и основных конструктивных решений для реакторных установок малой мощности / И.С. Худяков, Г.Н. Власичев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2. С. 50-59. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_50

OVERVIEW OF CURRENT TRENDS AND BASIC DESIGN SOLUTIONS FOR LOW-POWER REACTOR PLANTS

I.S. Khudyakov

ORCID: **0000-0002-6375-9124** e-mail: **ilia.kh@nstuedu.com**

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

G.N. Vlasichev

ORCID: **0000-0003-2705-1900** e-mail: **vlas@mts-nn.ru**

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

Abstract. Overview of basic projects of low-power reactor plants is presented, basic trends of development therefore, as well as modern design solutions are analyzed, and the basic physical principles of reactors of this type are outlined. Operational, production, design, construction and installation features that validate feasibility of economic efficiency of low-power reactors in modern realities are considered. Subjects of the study are projects of low-power and modular reactors implemented both in Russia and abroad. Four main types of plants are considered: those with light water reactors, those with fast neutron reactors, those with high-temperature graphite-moderated reactors, and various

types of reactors with liquid-salt coolant. It is concluded that pressurized water reactors, as well as fast neutron reactors currently prevail, which correlates with trends in the field of high-power reactors. High-temperature gas-cooled and liquid-salt low-power reactors are intensively developed in foreign projects.

Key words: low-power reactors, light water reactors, high-temperature gas-cooled reactors, fast reactors, molten salt reactors.

FOR CITATION: Khudyakov I.S, Vlasichev G.N. Overview of current trends and basic design solutions for low-power reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №2. P. 50-59.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_50

Введение

В настоящее время в атомной энергетике наблюдается тенденция к разработке маломощных реакторных установок (РУ). Это обусловлено как значительной потребностью в обслуживании небольших электрических сетей около 4 ГВт, так и высокими капитальными затратами на крупные энергетические реакторы. Ядерные энергетические установки малой мощности также широко распространены на судах.

Согласно определению МАГАТЭ, под реакторами малой мощности понимают реакторы мощностью до 300 МВт (электрических), средней мощности – до 700 МВт (электрических). В совокупности они обозначаются как малые и средние реакторы (SMRs – *small and medium reactors*). В то же время аббревиатура SMR чаще всего применяется для обозначения «малых модульных реакторов» (*small modular reactor*), которые проектируются для серийного производства, а также как элемент ядерной энергетической установки высокой мощности. Подкатегория реакторов сверхмалой мощности (vSMRs – *very small reactors*) представляет собой объединение реакторов мощностью до 15 МВт (электрических); они имеют большое значение для удаленных регионов. Существует несколько сценариев размещения реакторных установок малой мощности: отдельно или в виде модулей в составе более крупного комплекса, также есть возможность наращивания в случае необходимости мощности энергетического комплекса. В настоящее время существует запрос на разработку маломощных реакторных установок, с возможностью работать автономно для удаленных регионов. Маломощные установки рассматриваются в качестве объекта для более оптимальных капиталовложений по сравнению с установками большой мощности, большая стоимость которых приводит к долгой окупаемости установки при существующей стоимости электроэнергии. Еще одной причиной интереса к маломощным реакторным установкам является возможность легкой установки на заброшенных площадках, где располагаются выведенные из эксплуатации угольные электростанции – более чем 90 % из них имели мощность до 500 МВт (электрических). В США угольные электростанции (на данный момент выводимые из эксплуатации) в 2010-2012 гг. имели в совокупности мощность в среднем 97 МВт (электрических), а ожидающие вывода из эксплуатации до 2025 г. – в среднем 145 МВт.

В данной работе рассматриваются в основном передовые проекты – те, которые либо строятся впервые, либо находятся на стадии проектирования; большинство еще только разрабатывается. Рассмотрены четыре основных типа установок: с реакторами на легкой воде, с реакторами на быстрых нейтронах, с высокотемпературными реакторами с графитовым замедлителем и различными видами реакторов с жидкосолевым теплоносителем. Первый тип реакторов наиболее безопасен, однако второй может быть спроектирован с меньшими габаритами в силу меньшего давления в теплоносителе. Разработки маломощных реакторов в западных странах хорошо финансируются частными инвесторами, включая небольшие компании. Участие подобных инвесторов свидетельствует о значительном сдвиге от осуществляемых под руководством правительства, а также финансируемых им ядерных исследований и разработок к проектам, которые реализуются под руководством частных предпринимателей с четкими целями, часто связанными с интересами общественности. Часто они подразумевают внедрение доступной экологически чистой энергии без выбросов углекислого газа.

В отчете Института энергетической политики Чикагского университета за 2011 г. для Министерства энергетики США [1] сказано, что малые реакторы могут значительно снижать финансовые риски, связанные с электростанциями большой мощности, потенциально позволяя малым реакторам эффективно конкурировать с другими источниками энергии. Июньский отчет 2016 г. Министерства энергетики г. Онтарио выделяет девять основных концепций малых реакторов мощностью до 25 МВт (электрических) для удаленных внесетевых районов. Все проекты находятся на среднем уровне готовности, но ожидается, что они будут конкурентоспособны по отношению к дизельному топливу. Два проекта – интегральные водяные энергетические реакторы, электрической мощностью 6,4 и 9 МВт; три – высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), 5, 8 и 16 МВт; два – быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (БН), 1,5/2,8 и 10 МВт; один – быстрый реактор со свинцовым теплоносителем, 3-10 МВт; один – реактор с жидкосольевым теплоносителем, 32,5 МВт. Четыре проекта из указанных имеют электрическую мощность до 5 МВт [2].

В целом ожидается, что современные маломощные энергетические реакторы, особенно модульные, будут иметь значительную простоту конструкции, малые сроки строительства и более низкую стоимость при серийном производстве в пределах одного завода. Многие подобные реакторы также проектируются с большим числом пассивных систем безопасности и с широким использованием саморегулирования. Также при проектировании для большинства реакторов предусматривается возможность подземного размещения, что дает высокую защищенность от террористических атак и снижает вероятность попадания радиоактивных веществ в атмосферу. В докладе специального комитета Американского ядерного общества за 2010 г. отмечено, что большинство необходимых или, по крайней мере, разумных норм безопасности, используемых в реакторах большой мощности, можно не принимать во внимание при проектировании маломощных реакторов. Это в значительной степени связано с большим отношением их площади поверхности к объему (и тепловой мощности) по сравнению с реакторами большой мощности. Следовательно, большинство разработок для систем безопасности, включая системы отвода тепла в больших реакторах, в реакторах малой мощности не требуются.

В то же время необходимо отметить, что основной проблемой для маломощных реакторов является лицензирование, поскольку стоимость лицензии на разработку, строительство и эксплуатацию сопоставима со стоимостью для реакторов большой мощности. Отчет Всемирной ядерной ассоциации за 2015 г. [3], посвященный стандартизации лицензирования маломощных реакторов и унификации требований нормативного регулирования, объясняет их огромный потенциал рядом факторов:

- в связи с их малыми размерами, данные реакторы могут быть полностью собраны на заводе-изготовителе, а затем установлены модуль за модулем, с гарантированным повышением эффективности и качества сборки;
- экспорт в страны со слабыми энергосетями и небольшим опытом в освоении ядерной энергетики, представляется возможным в связи с малыми габаритами и особенностями пассивных систем безопасности;
- размеры, эффективность строительства и системы пассивной безопасности (использующиеся в меньших количествах) могут привести к упрощению финансирования по сравнению с более крупными установками;
- достижение «экономии серийного производства» для конкретного проекта малого реактора в дальнейшем еще сильнее сократит расходы.

Помимо этого, Всемирная ядерная ассоциация отмечает следующие характеристики малых реакторов:

- малую мощность, компактность и обычно большее использование пассивных элементов, (меньшую зависимость от активных систем безопасности и дополнительных насосов, а также источников переменного тока);

- компактность, дающую возможность реализовать помодульное изготовление (в пределах одного завода), что также позволяет внедрить более высокие стандарты качества;
- снижение количества радиоактивных веществ, которые выбрасываются в атмосферу в случае аварии, и пониженную концентрацию накопленных радиоактивных нуклидов в реакторе, обусловленную меньшей мощностью;
- потенциальную возможность размещения под водой или под землей, обеспечивающую повышенную защиту реакторных установок от природных (например, землетрясений или цунами) или техногенных (например, падение самолета) катастроф;
- модульную конструкцию и размеры, позволяющие иметь несколько блоков на одной площадке;
- возможность демонтажа реакторного модуля либо вывода его из эксплуатации «на месте» после окончания срока службы.

Рассматриваются следующие возможные варианты применения маломощных реакторных установок [3]:

- электро- и теплоснабжение в труднодоступных и удаленных районах;
- научные и прикладные исследования студентов вузов ядерного направления;
- подготовка специалистов, работающих на АЭС (дает возможность подробно смоделировать условия работы на АЭС по сравнению с существующими тренажерами);
- электро- и теплоснабжение в странах, где нет собственной атомной энергетики или научно-технический уровень не может обеспечить постройку собственных станций (при эксплуатации длительное время в режиме саморегулирования).

В 2009 г. в Международном проекте по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам МАГАТЭ был сделан вывод, что в мире к 2030 г. будут работать 96 маломощных модульных реакторов (в настоящее время насчитывается более 125 работающих реакторов малой и средней мощности – электрической мощностью до 700 МВт и 17 – в процессе постройки в 28 странах, общей электрической мощностью 57 ГВт). Также МАГАТЭ развивает проект о многозадачном малом реакторе на легкой воде с интегральными парогенераторами и естественной циркуляции теплоносителя. В 2003 г. Министерство энергетики США опубликовало доклад о разработке такого реактора [2].

Основные проекты маломощных реакторных установок

Далее рассматриваются основные проекты маломощных и модульных реакторов, реализуемые как в России, так и за рубежом. По данным отчета МАГАТЭ «Разработка маломощных и модульных ядерных реакторов» [4] и Всемирной ядерной ассоциации, во многих странах (Россия, США, Канада, Япония и др.) активно используются ядерные установки малой мощности, параллельно идет процесс их разработки, проектирования и строительства. Далее приведена информация, позволяющая продемонстрировать современные проекты в области реакторов малой мощности.

В табл. 1 приведен список маломощных реакторных установок, эксплуатируемые в настоящее время.

Таблица 1.

Маломощные реакторные установки, находящиеся в эксплуатации

Table 1.

Low-power reactors in operation

| Название | Мощность | Тип реактора | Компания и страна-разработчик |
|----------|----------|----------------------------|--|
| CNP-300 | 300 MWe | PWR | SNERDI/CNNC, Pakistan & China |
| PHWR-220 | 220 MWe | PHWR | NPCIL, India |
| EGP-6 | 11 MWe | LWGR | at Bilibino, Siberia (cogen, soon to retire) |
| KLT-40 | 35 MWe | PWR | OKBM, Russia |
| KLT-40S | 35 MWe | PWR | OKBM, Russia |
| RITM-200 | 50 MWe | Integral PWR, civil marine | OKBM, Russia |

В табл. 2 представлены строящиеся реакторные установки.

Таблица 2.

Строящиеся маломощные реакторные установки

Table 2.

Low-power reactors under construction

| Название | Мощность | Тип реактора | Компания и страна-разработчик |
|----------|----------|----------------------------|-------------------------------|
| CAREM-25 | 27 MWe | Integral PWR | CNEA & INVAP, Argentina |
| HTR-PM | 210 MWe | Twin HTR | INET, CNEC & Huaneng, China |
| ACP50S | 60 MWe | PWR | CGN, China |
| RITM-400 | 60 MWe | Integral PWR, civil marine | OKBM, Russia |

В табл. 3 представлены реакторные установки, которые находятся на финальных стадиях проектирования.

Таблица 3.

Маломощные реакторные установки на финальных стадиях проектирования

Table 3.

Low-power reactors at final design stages

| Название | Мощность | Тип реактора | Компания и страна-разработчик |
|---------------------|----------|--------------|-----------------------------------|
| VBER-300 | 300 MWe | PWR | OKBM, Russia |
| NuScale | 60 MWe | Integral PWR | NuScale Power + Fluor, USA |
| SMR-160 | 160 MWe | PWR | Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canada |
| ACP100/Linglong One | 125 MWe | Integral PWR | NPIC/CNPE/CNNC, China |
| SMART | 100 MWe | Integral PWR | KAERI, South Korea |
| BWRX-300 | 300 MWe | BWR | GE Hitachi, USA |
| PRISM | 311 MWe | Sodium FNR | GE Hitachi, USA |
| ARC-100 | 100 MWe | Sodium FNR | ARC with GE Hitachi, USA |
| Integral MSR | 192 MWe | MSR | Terrestrial Energy, Canada |
| BREST | 300 MWe | Lead FNR | RDIPE, Russia |
| RITM-200M | 50 MWe | Integral PWR | OKBM, Russia |

В табл. 4 представлены проекты реакторных установок, находящиеся на ранних стадиях разработки.

Таблица 4.

Маломощные реакторные установки на ранних стадиях разработки

Table 4.

Low-power reactors at early stages of development

| Название | Мощность | Тип реактора | Компания и страна-разработчик |
|---------------------|----------|--------------|-------------------------------|
| EM2 | 240 MWe | HTR, FNR | General Atomics (USA) |
| VK-300 | 300 MWe | BWR | NIKIET, Russia |
| AHWR-300 LEU | 300 MWe | PHWR | BARC, India |
| CAP200 LandStar-V | 220 MWe | PWR | SNERDI/SPIC, China |
| SNP350 | 350 MWe | PWR | SNERDI, China |
| ACPR100 | 140 MWe | Integral PWR | CGN, China |
| IMR | 350 MWe | Integral PWR | Mitsubishi Heavy Ind, Japan |
| Westinghouse SMR | 225 MWe | Integral PWR | Westinghouse, USA |
| mPower | 195 MWe | Integral PWR | BWXT, USA |
| Rolls-Royce SMR | 220+ MWe | PWR | Rolls-Royce, UK |
| PBMR | 165 MWe | HTR | PBMR, South Africa |
| HTMR-100 | 35 MWe | HTR | HTMR Ltd, South Africa |
| Xe-100 | 75 MWe | HTR | X-energy, USA |
| SVBR-100 | 100 MWe | Lead-Bi FNR | AKME-Engineering, Russia |
| Westinghouse LFR | 300 MWe | Lead FNR | Westinghouse, USA |
| TMSR-SF | 100 MWt | MSR | SINAP, China |
| PB-FHR | 100 MWe | MSR | UC Berkeley, USA |
| Integral MSR | 192 MWe | MSR | Terrestrial Energy, Canada |
| Moltex SSR-U | 150 MWe | MSR/FNR | Moltex, UK |
| Moltex SSR-W global | 150 MWe | MSR | Moltex, UK |
| Thorcon MSR | 250 MWe | MSR | Martingale, USA |
| Leadir-PS100 | 36 MWe | Lead-cooled | Northern Nuclear, Canada |

Физические и конструктивные особенности различных типов реакторных установок малой мощности

Рассмотрим более подробно типы реакторных установок, которые эксплуатируются, строятся и проектируются в настоящее время. Для начала следует рассмотреть реакторы на легкой воде. Замедлителем и теплоносителем в данных реакторах является обычная вода. Легководные реакторы имеют наименьший технологический риск, поскольку они во многом похожи на работающие сегодня энергетические реакторы большой мощности и реакторы, используемые в судовых установках. Реакторы на легкой воде в основном работают на топливе, обогащенном менее чем на 5 % по урану-235, с интервалами между перегрузками топлива не более 6 лет, и нормативные барьеры к постройке подобных реакторов фактически наименьшие среди всех типов маломощных реакторов.

Опыт эксплуатации в США маломощных реакторов на легкой воде заключался в постройке небольших военных электростанций (в основном, с реакторами типа PWR), например, РМ-2А мощностью 10 МВт тепловых и 1,56 МВт электрических в Кэмп Сенчури на севере Гренландии. Он работал в 1960-1964 гг. на высокообогащенном урановом топливе. Другим был реактор РМ-3А мощностью 9 МВт тепловых, 1,75 МВт электрических (нетто), действовавший в проливе Мак-Мердо в Антарктиде в 1962-1972 гг. Он использовал высокообогащенное урановое топливо и перегружался один раз в 1970 г. Это были результаты программы разработок сухопутных войск в области ядерной энергетики для создания маломощных реакторов от 0,1 до 40 МВт. Данная программа продолжалась вплоть до 1977 г. В 2010 г. проект легкоразвертываемых реакторов для выработки электроэнергии (*DEER*) был запущен в серийное производство компанией *Radix Power & Energy*. Реакторы этого проекта планируются сделать портативными и герметичными, способными работать в диапазоне от 10 до

50 МВт электрических, и они должны будут использовать топливо, применяемое в исследовательских реакторах *Triga*.

Некоторые успешные наработки по маломощным реакторам были взяты из национальной программы, запущенной в 1950-х гг. Одной из них была АЭС *Big Rock Point* с реактором кипящего типа мощностью 67 МВт электрических, действовавшим в течение 35 лет до 1997 г. Комиссия по ядерному регулированию США фокусируется на маломощных легководных реакторах с использованием традиционного топлива типа *B&W*, *Westinghouse*, *NuScale* и *Holtec*, включая интегральные типы (*B&W*, *Westinghouse*, *NuScale*). В США крупные инженерно-строительные компании приняли активное участие в двух проектах: *Fluor* в *NuScale* и *Bechtel* в *B&W mPower* [5]. Помимо этого, комиссия намерена в полной мере использовать знания и опыт других стран по проектам без использования легкой воды, она предусматривает ключевую роль в будущих международных регулирующих инициативах. В проектах КЛТ, ВВЭР и *Holtec* маломощные реакторные установки имеют обычные корпуса высокого давления и внешние парогенераторы (петлевая схема). В других проектах в основном используется система подачи пара внутри корпуса высокого давления («интегральная» конструкция *PWR*).

На данный момент существуют три новые концепции, которые можно рассматривать в качестве альтернативы традиционным наземным атомным электростанциям. Первым проектом является плавучая атомная теплоэлектростанция (*FNPP*), разработанная в России с двумя реакторами КЛТ-40С, аналоги которых применяются на ледоколах. Она была сдана в промышленную эксплуатацию 22 мая 2020 г. Среди аналогичных разработок можно выделить китайский проект *ACP100* с маломощным реактором, а также французскую подводную электростанцию *Flexblue* с реактором мощностью 50-250 МВт электрических. Реакторы на быстрых нейтронах обладают более высокой топливной экономичностью и имеют более длинную топливную кампанию, но для них необходимо разработать новое техническое обоснование безопасности. Они не имеют замедлителя, обладают большим потоком нейтронов и обычно охлаждаются жидким металлом: натрием, свинцом или сплавом свинец-висмут с высокой проводимостью и температурой кипения. Оба теплоносителя могут использоваться при давлении, сопоставимом с атмосферным, что упрощает проектирование и снижает стоимость. Их высокотемпературная работа обеспечивает высокий термодинамический КПД. Также стоит отметить, что у этих теплоносителей есть существенные ограничения: натрий легко воспламеняется и бурно реагирует с водой, в свою очередь, свинец или сплав свинец-висмут не реагируют с водой, но при этом подвержены коррозии. Реакторы на быстрых нейтронах работают при давлении в первом контуре на уровне атмосферного и имеют пассивные функции безопасности. Это устраняет необходимость сопутствующих расходов на дополнительные узлы и резервные системы безопасности, необходимые другим устройствам для защиты от утечки теплоносителя. По аналогии с водо-водяными реакторами, у большинства быстрых натриевых реакторов автоматическое регулирование мощности достигается благодаря обратной связи по реактивности – ослабление потока теплоносителя приводит к более высокой температуре активной зоны, что замедляет реакцию деления. Быстрые реакторы обычно используют регулирующие стержни из карбида бора.

Маломощные реакторы на быстрых нейтронах предназначены для заводского изготовления и транспортируются на место на грузовике, поезде или барже, а затем отправляются обратно или в региональный центр ядерного топливного цикла в конце срока службы. Обычно их устанавливают под землей и, соответственно, большое отношение площади поверхности к объему имеет хороший потенциал для пассивной системы охлаждения. Утилизация возможна для целой единицы после удаления топлива для переработки, а также без отделения отработавшего топлива в хранилище. На данный момент существуют две альтернативы для жидкого металла в качестве теплоносителя: газ и соль. *General Atomics* анонсировала концепцию быстрого реактора с газовым теплоносителем – модель *Energy Multiplier (EM2)*. Эта концепция также реализуется по программе «*Generation IV*» на строящемся

французском проекте быстрого газового реактора *ALLEGRO*. Жидкосолевой теплоноситель применяется в концепции быстрого реактора с расплавленным хлоридом, разработанной *Southern Company Services* в США в сотрудничестве с *TerraPower*, Национальной лабораторией Ок-Ридж и *EPRI* [6]. Также свинцовая версия стабильного солевого реактора *Moltex* работает на быстрых нейтронах. Весьма популярными проектами маломощных реакторов также являются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Они используют графит в качестве замедлителя (за исключением реакторов на быстрых нейтронах), а также гелий, диоксид углерода или азот в качестве теплоносителя первого контура. Английский усовершенствованный газоохлаждаемый реактор – единственный ВТГР, который использует CO_2 в качестве теплоносителя первого контура. Данный тип реакторов является чрезвычайно перспективным, особенно в свете планов США по созданию АЭС нового IV поколения (*NGNP*) и запуска Китайского проекта *HTR-PM*. В проектах *NGNP* предполагается использовать топливо в виде кернов, прочный корпус реактора и гелиевый теплоноситель. Три проекта ВТГР, в частности, *PBMR*, *GT-MHR* и *SC-HTGR Areva*, были претендентами для проекта *NGNP* следующего поколения реакторов в США. В 2012 г. был избран *Areva*. Однако, несмотря на опыт нескольких инновационных реакторов, построенных в 1960-1970-х гг., и программу «*Generation IV*», финансирование правительством США проекта *NGNP* на данный момент практически прекратилось, и технологическое лидерство перешло к Китаю. Единственным действующим проектом ВТГР является китайский *HTR-PM*.

На сегодняшний день активно ведется разработка современных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР), такие реакторы смогут достигать температуры гелия до 700-950 °С и, в конечном итоге, до 1000 °С. Их применение возможно либо в качестве источников тепла использованием дополнительных теплообменников (по типу АСТ), либо для генерации пара во втором контуре через парогенераторы или непосредственно для приведения в действие газового цикла Брайтона для получения электричества с термическим КПД почти 50 % (эффективность увеличивается примерно на 1,5 % при каждом приращении на 50 °С). Но пониженный интерес к проведению прямого брайтонского цикла обусловлен очень высоким технологическим риском. Опасность заключается в том, что трение топлива приводит к образованию радиоактивной графитовой пыли. Разработанные в последнее десятилетие технологии и инновации в металлургии делают ВТГР заметно практичнее, чем в прошлом, однако высокая надежность компонентов топлива и реакторов возможна только благодаря прямому циклу работы.

Топливо для этих реакторов находится в форме микротовзлов – частиц диаметром менее миллиметра. Каждый микротовзл содержит в себе ядро (около 0,5 мм) оксикарбида урана (или диоксид урана), при этом уран обогащен до 20 % U-235. Ядро окружено слоями углерода и карбида кремния, что обеспечивает локализацию продуктов деления, которые стабильны до более чем 1600 °С. Эти частицы могут быть расположены в блоках, представляющих собой шестигранные призмы или сферы из графита. Каждый блок содержит более 15 000 частиц топлива. Получается бóльший объем использованного топлива (в 20 раз), чем при той же мощности в реакторе на легкой воде, из-за того, что шаровой тепловыделяющий элемент представляет собой в основном графит и содержит менее одного процента урана. Тем не менее, используемое топливо в целом менее радиоактивно и дает меньше остаточных тепловыделений из-за более глубокого выгорания топлива.

ВТГР могут потенциально использовать смешанное ториевое топливо, такое как высокообогащенный или низкообогащенный уран с Th, U-233 с Th и Pu с Th. Большая часть опытов по использованию ториевого топлива была проведена на ВТГР [7]. ВТГР от природы безопасны в силу отрицательного температурного коэффициента реактивности (реакция деления замедляется по мере увеличения температуры) и пассивного отвода остаточных тепловыделений. Дополнительным преимуществом ВТГР является то, что они не требуют строительства защитной оболочки, достаточно малы, что позволяет реализовать фабричное изготовление, и обычно устанавливаются ниже уровня земли. Также стоит рассмотреть жидкосо-

левые реакторы, использующие расплавленные фторидные соли в качестве теплоносителя первого контура при низком давлении. Литиево-бериллиевый фторид и фторид лития остаются жидкими до 1400 °С без нагнетания давления, что заметно контрастирует с параметрами PWR, который работает при температуре около 315 °С и давлении 160 атм. В большинстве конструкций топливо растворяется в теплоносителе первого контура.

В течение 1960-х гг. США разработали концепцию жидкосолевого реактора в качестве основного резервного варианта для реактора-бридера на быстрых нейтронах и создали небольшой прототип ядерного реактора с мощностью 8 МВт тепловых – экспериментального на расплавах солей, разрабатываемого в Ок-Ридже в течение четырех лет до 1969 г. (программа MSR – 1957-1976 гг.) В настоящее время возобновляется интерес к данной концепции в Японии, России, Китае, Франции и США. Также одним из шести проектов *Generation IV*, выбранным для дальнейшего развития, является реактор с жидкосолевым теплоносителем (*MSR*). Обычно в *MSR* топливо представляет собой расплавленную смесь солей лития и фторида бериллия (FLiBe) с обогащенными (до 33 %) растворенными тетрафторидами U-235 или U-233 урана (UF₄). Литий, используемый в солях первого контура, должен в основном состоять из Li-7, так как Li-6 образует тритий при делении под воздействием нейтронов, а Li-7 имеет очень маленькое сечение активации. Это означает, что природный литий нужно обогащать, а это дорогостоящий процесс. Чистый Li-7 обычно не используется в солях теплоносителя второго контура. Но даже при обогащенном литии образуется немного трития, и его необходимо выводить из теплоносителя. Активная зона состоит из неохлажденного графитового замедлителя, где поддерживается поток соли при температуре от 700 до 860 °С и при низком давлении. Возможны гораздо более высокие температуры, но экспериментально это еще не подтверждено.

В реакторах данного типа подразумевается трехконтурная схема: тепло переносится от первого контура к соли второго контура, а затем идет на генерацию пара в третьем. В силу специфической активной зоны основные конструктивные решения у жидкосолевых реакторов отличаются от решений для реакторов на быстрых нейтронах с металлическим теплоносителем. При применении небольшого количества графитового замедлителя реактор может быть надтепловым (промежуточный спектр нейтронов), а коэффициент воспроизводства – меньше единицы. Торий может быть растворен с ураном в виде однокомпонентной (гомогенной) жидкости. Двухжидкостные или гетерогенные *MSR* будут использовать соль, богатую торием во втором контуре, в отдельности от топливной соли, содержащей делящийся уран, и могут работать в качестве реактора-размножителя. Во всех случаях используются соли во втором контуре. Продукты деления растворяются в топливной соли и могут непрерывно удаляться или регенерировать в процессе работы и заменяться делящимся ураном или, возможно, Th-232 или U-238. Актиниды остаются в реакторе до тех пор, пока они не распадутся или не превратятся в высшие актиниды, которые могут делиться. Жидкое топливо имеет отрицательный температурный коэффициент реактивности и устойчиво отрицательный пустотный коэффициент реактивности, что обеспечивает пассивную безопасность. Если температура топлива увеличивается, реактивность уменьшается. Таким образом, *MSR* обладает значительной маневренностью, когда увеличение теплоотдачи приводит к повышению температуры теплоносителя. Первичное регулирование реактивности осуществляется с помощью циркуляции теплоносителя, за счет чего изменяется температура топливной соли в активной зоне, тем самым меняя реактивность из-за сильного отрицательного коэффициента реактивности. *MSR* работает при атмосферном давлении, устраняя риск разгерметизации и выброса летучих радиоактивных веществ.

Другие интересные особенности топливного цикла *MSR* включают в себя: высокоактивные отходы, содержащие только продукты деления, следовательно, имеющие малый период полураспада (меньше актинидов образуются из U-233, чем в топливе с U-235); небольшое количество радиоактивных материалов для военного использования (Pu-242 является доминирующим изотопом Pu); высокая температура, обеспечивающая большой термический

КПД; высокое выгорание топлива и, следовательно, низкий расход топлива (французский вариант самовоспроизводства требует 50 кг тория и 50 кг U-238 за миллиард кВт-ч); безопасность, обеспеченная пассивным охлаждением для любого размера реакторной установки. У некоторых есть расхолаживающий плунжер, что позволяет слить соли первого контура под действием силы тяжести в резервуар для сброса, имеющего форму, предотвращающую возникновение критичности. Регулирующие стержни являются также стержнями аварийной защиты.

Концепция MSR реализуется в программе «*Generation IV*» в двух вариантах: один – реактор на быстрых нейтронах с делящимся материалом, растворенным в циркулирующем соляном топливе; второй – с твердыми частицами топлива в графите, а соль используется только как теплоноситель. MSR обычно работают при гораздо более высоких температурах, чем легководные реакторы, по меньшей мере, до 700 °C и, следовательно, потенциально могут быть использованы для выработки тепла.

Заключение

Рассмотрены эксплуатационные, производственные, конструктивные и строительно-монтажные особенности, обосновывающие экономическую эффективность реакторов малой мощности в современных реалиях. Также представлен обзор существующих проектов в области АЭС малой мощности, рассмотрены их основные физические особенности. В настоящее время в этой сфере преобладают водо-водяные реакторы, а также реакторы на быстрых нейтронах, что коррелирует с тенденциями в области энергетических реакторов большой мощности. В зарубежных проектах реакторов малой мощности интенсивно развиваются высокотемпературные газоохлаждаемые и жидкосолевые реакторы.

Библиографический список

1. Robert Rosner and Stephen Goldberg, Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S., Energy Policy Institute at Chicago, The University of Chicago (November 2011) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/ECON-SMRKeytoNuclearPowerDec2011.pdf>, свободный. – Дата обращения: [30.07.2020] - 81 лист.
2. World nuclear association, Small Nuclear Power Reactors (Updated July 2020) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, свободный. – Дата обращения: [30.07.2020]
3. Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors, Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group of the World Nuclear Association (August 2015), [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf, свободный. – Дата обращения: [30.07.2020] - 24 листа.
4. Small and Medium Sized Reactors (SMRs) Development, IAEA, [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CSPS-14-P/CSP-14_part1.pdf, свободный. – Дата обращения: [02.08.2020] - 314 листов.
5. B&W introduces scalable, practical nuclear energy, Babcock & Wilcox press release (10 June 2009); Small Reactors Generate Big Hopes, Wall Street Journal (18 February 2010), Режим доступа: <http://www.nuclearfuelservices.com/about-us/news/news/2009/06/10/BW-introduces-scalable-practical-nuclear-energy>, свободный. – Дата обращения: [02.08.2020]
6. The Advanced High-Temperature Reactor: High-Temperature Fuel, Molten Salt Coolant, and Liquid-Metal-Reactor Plant, Charles Forsberg, Oak Ridge National Laboratory, presented at the 1st International Conference on Innovative Nuclear Energy Systems for Sustainable Development of the World (COE INES-1) held at the Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan (31 October - 4 November 2004), [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/ebdf/ec122da05da688a18470a00c91322f10338a.pdf>, свободный. – Дата обращения: [02.08.2020] - 13 листов.
7. World nuclear association, Thorium (Updated July 2017) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>, свободный. – Дата обращения: [14.09.2020].

Дата поступления

в редакцию: 20.01.2021

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.432

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_60

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ АВТОМОБИЛЯ

Д.А. БутинORCID: 0000-0002-3303-6312 e-mail: danila.butin@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.А. Сергиевский**ORCID: 0000-0003-4944-4254 e-mail: s.sergievskiy@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлена имитационная твердотельная модель поршневого двигателя внутреннего сгорания, созданная для расчета неуравновешенных сил и моментов в режимах частичных и полных нагрузок на всем диапазоне рабочих частот вращения коленчатого вала. Модель реализована в программном пакете *MSC ADAMS View*. Она учитывает кинематику кривошипно-шатунного механизма, массовые и инерционные характеристики подвижных деталей, действие газовых сил на поршень и головку блока, силу трения в цилиндропоршневой группе, а также нагрузку тормозным моментом. Индикаторная диаграмма принималась от аналогичного двигателя. Для моделирования работы на частичных нагрузках с индикаторной диаграммой проводились математические пересчеты с использованием коэффициентов наполнения воздухом и дросселирования. Тормозной момент реализован ПИ-регулятором для поддержания заданного режима и учета непостоянства скорости вращения коленчатого вала. Рассматриваемая модель не учитывает зазоры в ЦПГ, а также вибрации от деталей газораспределительного механизма. Неуравновешенные силы оцениваются по реакциям закрепления двигателя. Для дальнейшего анализа и обработки результаты расчета из временной области преобразовывались в частотную методом быстрого преобразования Фурье.

Ключевые слова: неуравновешенные силы, неуравновешенные моменты, равномерность крутящего момента, двигатель внутреннего сгорания, поршневой двигатель, имитационная модель.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бутин, Д.А. Модель динамического воздействия поршневого двигателя внутреннего сгорания / Д.А. Бутин, С.А. Сергиевский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2. С. 60-67.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_60

DYNAMIC IMPACT MODEL OF RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINE FOR DESIGN ANALYSIS OF VEHICLE VIBRATION

D.A. ButinORCID: 0000-0002-3303-6312 e-mail: danila.butin@nntu.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Sergievsky

ORCID: 0000-0003-4944-4254 e-mail: s.sergievskiy@nntu.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Simulation solid-state model of reciprocating internal combustion engine is presented, designed to calculate unbalanced forces and torques in partial and full load modes at the entire range of operating speeds of the crankshaft. The model is implemented in *MSC ADAMS View* software package. It takes into account the kinematics of crank mechanism, mass and inertia characteristics of moving parts, action of gas forces on piston and block head, friction force in cylinder-piston group, as well as the load of braking torque. An indicator diagram was taken from a similar engine. To simulate partial load operation with an indicator diagram, mathematical calculations were performed using the air filling and throttling coefficients. Braking torque is implemented by a PI-controller to maintain the set mode and to take into account the variability of crankshaft rotation speed. The model under consideration does not take into account the gaps in cylinder-piston group (CPG), as well as vibrations from parts of the gas distribution mechanism. Unbalanced forces are evaluated by engine fixation reactions. For further analysis and processing, the calculation results were converted from time domain to frequency domain by the fast Fourier transformation method.

Key words: unbalanced forces, unbalanced moments, uniform torque, internal combustion engine, piston engine, simulation model.

FOR CITATION: Butin D.A., Sergievskiy S.A. Dynamic impact model of reciprocating internal combustion engine for design analysis of vehicle vibration. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №2. P. 60-67.

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_60

I. Введение

Поршневой бензиновый двигатель остается основным источником энергии в сегменте легких коммерческих автомобилей. Кроме полезной работы, двигатели внутреннего сгорания создают экологическое загрязнение как в виде выбросов отработавших газов, так и в виде шумового и вибрационного загрязнения окружающей среды. Неуравновешенные силы и моменты являются основным источником шума и вибраций, оказывая негативное воздействие на водителя и пассажиров. Снижение шума выступает одной из главных задач современных производителей автомобилей, решаемой путем построения сложных моделей и многоэтапных расчетов [1,2]. В теории динамики двигателей основным источником неуравновешенных сил являются силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого и второго порядка и центробежная сила вращающихся неуравновешенных масс, также оценивается неравномерность крутящего момента. Но при работе двигателя с нагрузкой в виде трансмиссии его динамика несколько сложнее упрощенной теоретической модели. Неуравновешенными силами двигателя также выступают боковые силы, действующие в контакте поршня и стенки цилиндра, газовая сила, действующая на головку блока и не компенсирующаяся силой действующей на дно поршня. Крутящий момент на маховике двигателя непостоянен, и это вызывает колебания скорости вращения коленчатого вала, способствуя дополнительным вибрациям.

II. Объект и предмет исследования

Статья посвящена имитационной модели для исследования неуравновешенных сил и моментов двигателя поршневого двигателя, позволяющей проводить исследования вибраций при стационарных режимах работы. *Объектом исследования* является бензиновый поршневой четырехцилиндровый четырехтактный двигатель внутреннего сгорания *УМЗ Evotech 3.0*, работающий в составе с навесным оборудованием и коробкой передач. Цель создания модели – расчет неуравновешенных сил и моментов двигателя с учетом кинематики кривошипно-шатунного механизма, массо-инерционных характеристик деталей, действия газовых сил на поршни и головку блока цилиндров, влияния боковой силы от поршня на

стенку цилиндра, неравномерности крутящего момента и скорости вращения коленчатого вала.

II. Расчеты

Расчет неуравновешенных сил и моментов двигателя проводился при помощи имитационной динамической модели, разработанной в программном пакете *MSC ADAMS View*. Модель приводится в движение газовыми силами, поэтому позволяет исследовать неуравновешенные силы и моменты с учетом колебаний крутящего момента и скорости вращения. В модели двигателя нет виброопор, анализ неуравновешенных сил производился по реакциям жесткого закрепления, которое располагается в центре тяжести (рис. 1). Адекватность массовых и инерционных характеристик модели обеспечиваются точным расчетом по твердотельным моделям.

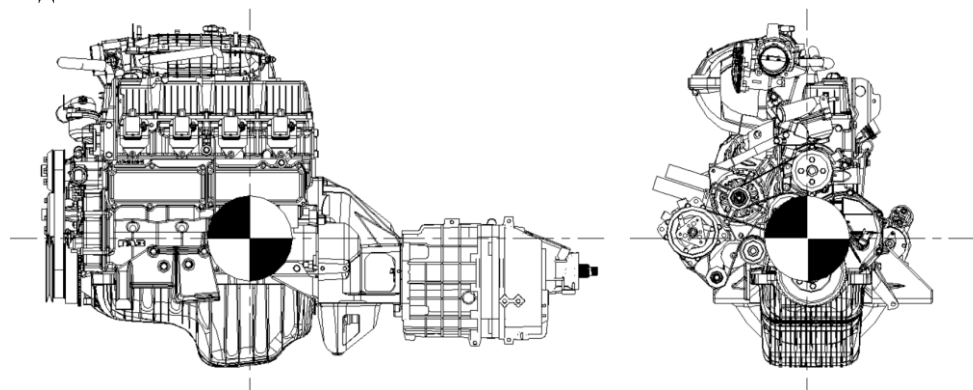


Рис. 1. Схема расположения ЦТ ДВС с навесным оборудованием и КПП

Fig. 1. Layout drawing of CG-ICE (Center-of-Gravity-of-Internal-Combustion-Engine) with attachments and gearbox

Модель двигателя состоит из 11 неупругих тел: блока, четырех поршней и шатунов, коленчатого вала и маховика. В кинематике кривошипно-шатунного механизма используются одноподвижные и двух подвижные цилиндрические шарниры.

От модели двигателя не требуется повышенной точности в результатах крутящего момента или в термодинамических циклах, поэтому использовался упрощенный способ моделирования газовых сил. Газовые силы рассчитывались по графику индикаторного давления в цилиндре. Индикаторное давление можно рассчитать по теории двигателей внутреннего сгорания, либо измерить на действующем двигателе, но в модели использовалась зависимость индикаторного давления в цилиндре от аналогичного бензинового двигателя [3]. Для моделирования работы двигателя при частичных нагрузках использовались два графика давления от поворота коленчатого вала (рис. 2). Первый график давления соответствует циклу без зажигания. Второй график давления отображает изменению давления в цилиндре при включенном зажигании. Сумма графиков соответствует индикаторной диаграмме в цилиндре. Аналогичный способ моделирования индикаторной диаграммы двигателя на частичных нагрузках описывается в [4].

Данный подход не учитывает большое количество факторов, присутствующих в действительном цикле: дросселирование, изменение продолжительности фаз горения и т.п. Но он позволяет исследовать вибрации двигателя при частичных характеристиках, без излишнего усложнения модели. Формула (1) для расчета суммарной индикаторной диаграммы с учетом коэффициентов наполнения и дроссельной заслонки.

$$\sum P_i = P_i^{\text{прокрутки}} + (\mu_V \cdot T \cdot P_i^{\text{зажигания}}), \quad (1)$$

где $\sum p_i$ – индикаторное давление в цилиндре, МПа; $p_i^{\text{прокрутки}}$ – индикаторное давление в цилиндре при прокрутке двигателя без зажигания, МПа; $p_i^{\text{зажигания}}$ – добавочное давление в цилиндре при зажигании, МПа; T – открытость дроссельной заслонки дроссельной заслонки, %; $\mu\nu$ – коэффициент наполнения цилиндра.

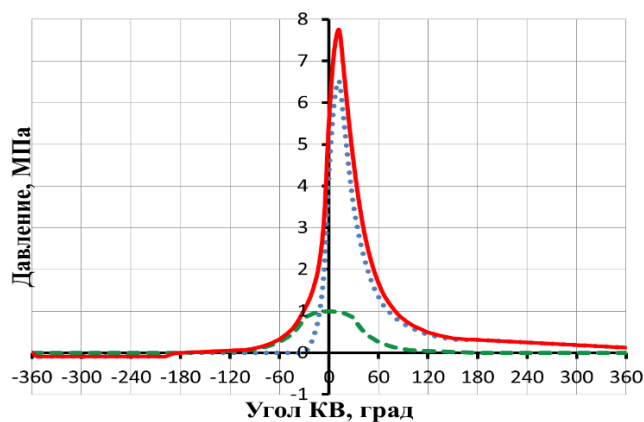


Рис. 2. Графики давлений в цилиндре от поворота коленчатого вала

— суммарное давление при зажигании;
 - - - прокрутка без зажигания;
 давление от зажигания

Fig. 2. Graphs of pressures in the cylinder due to crankshaft rotation

— total ignition pressure;
 - - - idling without ignition;
 ignition pressure

Для учета наполнения цилиндров от скорости вращения коленчатого вала используется зависимость (рис. 3). Открытость дроссельной заслонки учитывается в формуле индикаторного давления коэффициентом дроссельной заслонки.

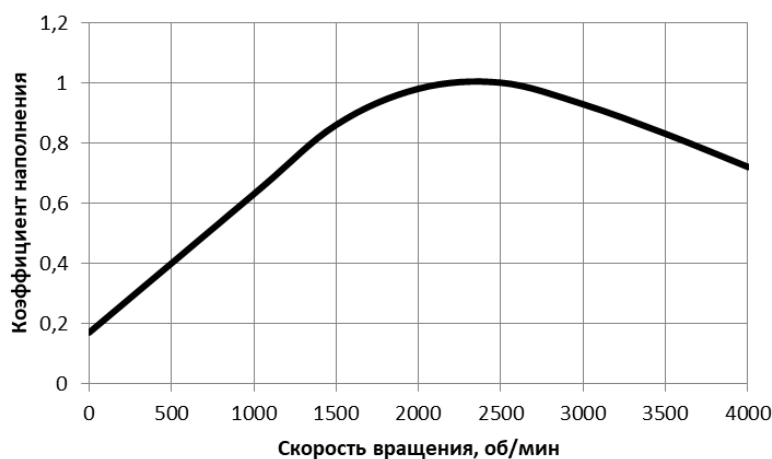


Рис. 3. Зависимость коэффициента индикаторного давления от скорости вращения КВ

Fig. 3. Dependence of indicator pressure coefficient on the crankshaft rotation speed

Газовые силы, действующие на поршень и головку блока, рассчитываются из суммарной индикаторной диаграммы и площади дна поршня. Действие газовых сил на стенку цилиндра не учитывалось, поскольку оно полностью компенсируется и не оказывает влияния на результаты исследования неуравновешенных сил и моментов в данной модели. Также не учитывались источники шума: перекладка поршня, газораспределительный механизм, при-

вод газораспределительного механизма, масляный насос, подшипники в коробке передач, контакт зубьев шестерен и т.п.

В модели учтена сила трения в ЦПГ и преднатяг между поршневыми кольцами и цилиндром. На рис. 4. изображена схема действия силы трения, направленная противоположно движению поршня. У компрессионных колец сложная эпюра распределения давления на стенку цилиндра. В данной модели газовая сила моделировалась силой, приложенной к поршню и головке блока, поэтому преднатяг кольца используется для учета в модели механических потерь, а эпюра распределения давлений никак не влияет. Кроме преднатяга, на поршень действует боковая сила, являющаяся реакцией от шатуна. Коэффициент трения между цилиндром и поршнем в модели принят 0,05 в соответствии со справочной информацией.

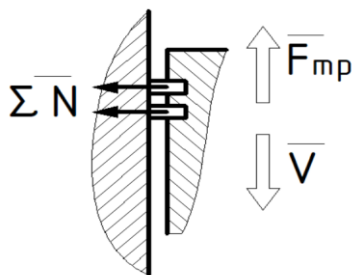


Рис. 4. Сила трения в ЦПГ

Fig. 4. Friction force in CPG

Для моделирования нагрузки используется тормозной момент. Момент прикладывается к маховику и управляется пропорционально-интегральным регулятором. ПИ-регулятор служит для поддержания заданной скорости вращения коленчатого вала, допуская неравномерность вращения, схожую с той, что наблюдается при исследованиях работы двигателя, приводящего в движение автомобиль. Коэффициенты регулятора подбирались итерационно для устойчивой работы двигателя на всех режимах, а также по неравномерности скорости вращения, соответствующей результатам исследования реального двигателя. Неравномерность скорости вращения коленчатого вала вызвана непостоянством газовых сил, а также постоянно изменяющимся плечом действия силы. Для ее уменьшения увеличивают количество цилиндров и увеличивают момент инерции маховика. Для снижения влияния неравномерности скорости, передающейся в трансмиссию, используют специальные механизм – двухмассовый маховик. Он компенсирует неравномерность скорости вращения и крутящего момента двигателя. За счет этого уменьшаются амплитуда неуравновешенных сил от опрокидывающего момента, передающегося через опоры двигателя на кузов автомобиля.

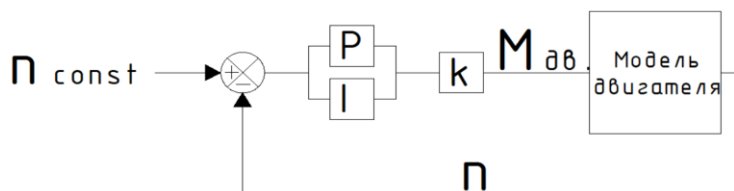


Рис. 5. Схема ПИ регулятора оборотов

n – скорость вращения КВ, об/мин; n_{const} – установочная скорость вращения КВ, об/мин;
 P – коэффициент пропорционального регулятора; I – коэффициент интегрального регулятора;
 k – коэффициент усиления регулятора; $M_{об}$ – тормозной момент, Нм

Fig. 5. Layout of PI-controller of rotation

n – crankshaft rotation speed, rpm; n_{const} – set crankshaft rotation speed, rpm;
 P – coefficient of proportional regulator; I – coefficient of integral regulator;
 k – gain coefficient of regulator; $M_{об}$ – braking torque, Nm

Для примера работы модели представлены результаты расчета работы двигателя на установившемся режиме. Нарастание давлений в цилиндрах соответствует чередованию зажигания исследуемого двигателя. На рис. 6 представлено изменение давлений в цилиндрах от времени.

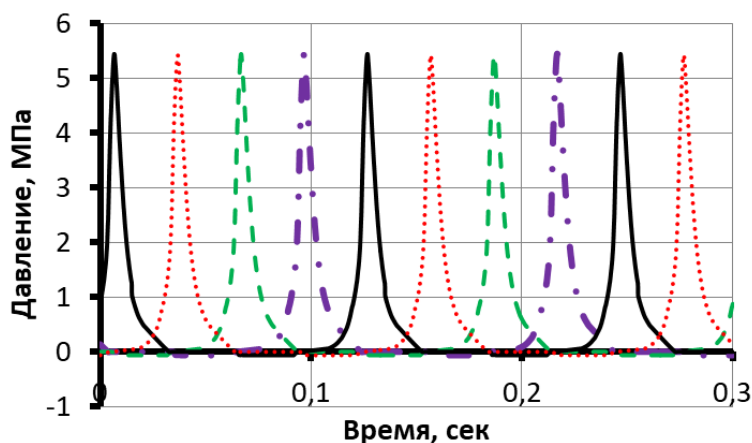


Рис. 6. Диаграмма зависимости давления в каждом цилиндре от угла поворота коленчатого вала

..... 1-й цилиндр; ————— 2-й цилиндр;
 - - - - - 3-й цилиндр; - . - . - 4-й цилиндр

Fig. 6. Dependence diagram of pressure in each cylinder from angle of rotation of the crankshaft от угла поворота коленчатого вала

..... 1 cylinder; ————— 2 cylinder;
 - - - - - 3 cylinder; - . - . - 4 cylinder

Опрокидывающий момент двигателя является крутящим моментом двигателя, но с противоположенным знаком. Этот момент действует в плоскости перпендикулярной оси вращения коленчатого вала. Непостоянное давление в цилиндрах и изменение кинематики кривошипно-шатунного механизма являются причиной непостоянства крутящего момента и скорости вращения коленчатого вала. Непостоянство опрокидывающего момента вызывает вибрации двигателя. Также непостоянство крутящего момента сказывается на скорости вращения коленчатого вала и трансмиссии. Непостоянство вращения трансмиссии вызывают дополнительные вибрации, передающиеся от трансмиссии на кузов автомобиля, но и продольные вибрации, вызванные непостоянством скорости вращения ведущих колес. Поэтому при анализе вибраций двигателя необходимо учитывать особенность нагрузки двигателя. На рис. 7 представлен график скорости вращения коленчатого вала.

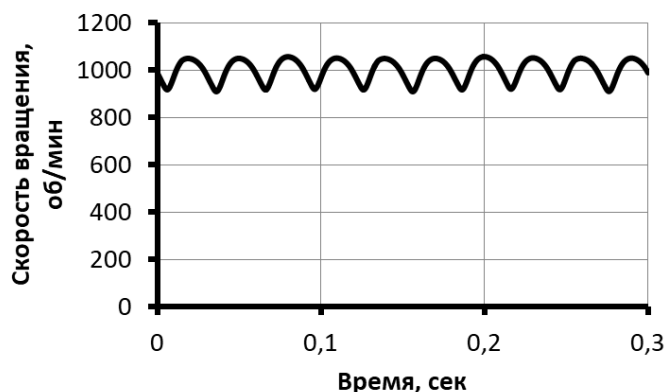


Рис. 7. Скорость вращения КВ

Fig. 7. Crankshaft rotation speed engine torque

На данном режиме работы неравномерность скорости вращения коленчатого вала составляют 15 %. Это соответствует [5]: у исправного двигателя неравномерность вращения не превышают 10-15 %. Следовательно, модель двигателя адекватна, а коэффициенты в ПИ-регуляторе тормозного момента выбраны правильно. График крутящего момента представлен на рис. 8. Неравномерность крутящего момента модели двигателя на выбранном режиме составляет 6,66 %.

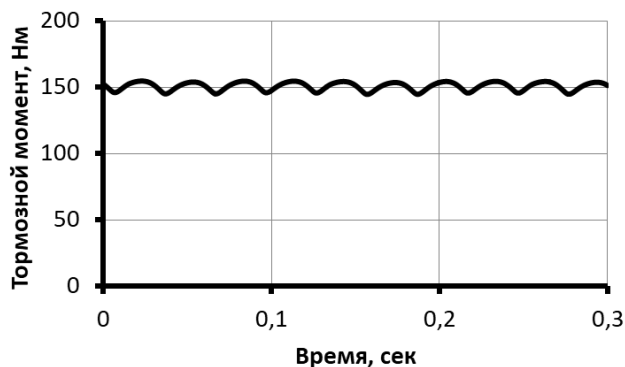


Рис. 8. Крутящий момент двигателя

Fig. 8. Engine torque

График реакции в опоре закрепления двигателя по вертикальной оси представлен на рис. 9. Амплитуда колебаний реакции опоры составляет 1 100 Н; эта неуравновешенная сила передается через виброопоры на кузов автомобиля и вызывает его вибрацию.

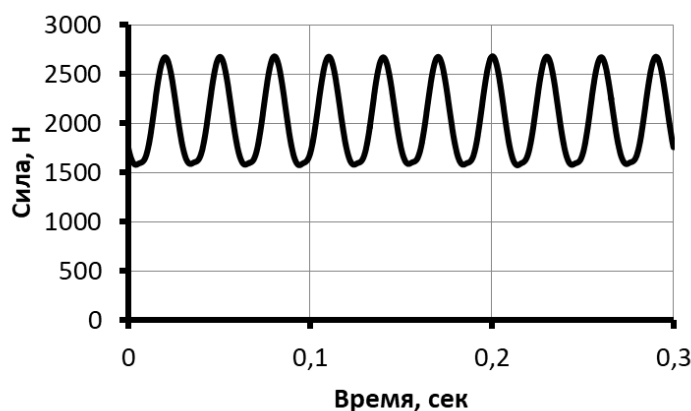


Рис. 9. Реакция опоры закрепления двигателя по вертикальной оси

Fig. 9. Engine fixation support reaction as per the vertical axis

Для преобразования результатов расчета из временной области в частотную, для дальнейшего анализа и обработки использовался модуль *Fast Fourier transform* (FFT) в подпрограмме *ADAMS Post Processor*. Результат исследований вибраций в виде АЧХ и ФЧХ удобен при последующих этапах расчета и анализа вибраций автомобиля.

Выводы

Разработана имитационная модель поршневого четырехцилиндрового четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, учитывающая кинематику КШМ, массоинерционные характеристики подвижных деталей, газовые и термодинамические процессы, особенности нагрузки и механические потери на трении. Газовая сила, действующая на дно поршня и го-

ловку цилиндра, зависит от скорости вращения коленчатого вала и степени открытости дроссельной заслонки. Сила трения учитывается в цилиндропоршневой группе и при сопротивлении вращению в коренных и шатунных шейках. Модель разработана в программном пакете *MSC ADAMS View*. Тормозной момент двигателя управляется с помощью ПИ-регулятора. Модель позволяет рассчитывать неуравновешенные силы двигателя по всем шести степеням свободы относительно точки закрепления. Не учитываются зазоры между цилиндрами и поршнями, поскольку они считаются дополнительными источниками шума и вибраций, их учет планируется при последующих доработках модели. Анализ результатов расчета по неравномерности крутящего момента и скорости вращения коленчатого вала показал адекватную работу двигателя на всех режимах работы.

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. **Андреев, С.С.** Математическая модель вибраций двигателя внутреннего сгорания / С.С. Андреев, Ю.В. Мягков, В.В. Курицын // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. №11-2.
2. **Яманин, А.И.** Исследование вибродинамических характеристик двигателей с отключаемыми цилиндрами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 2. С. 26-34, doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-26-34.
3. **Уханов, Д.А.** Результаты моторных исследований двигателя умз- с биметаллизированными гильзами цилиндров / Д.А. Уханов, И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов // Технические науки. С. 66-70.
4. **Cesare Palestini** Engine crankshaft torsional vibration analysis for anomalies detection [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/32444/master_Palestini_Cesare_2018.pdf?sequence=1 (дата обращения 01.02.2021).
5. **Жеглов, В.Н.** Влияние различных факторов на достоверность диагностирования ДВС по неравномерности вращения коленчатого вала / В.Н. Жеглов, О.Е. Уласевич, А.М. Кудрявцев // Портал научно-практических публикаций [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://portalnp.ru/2015/09/8948> (дата обращения: 11.09.2020).

**Дата поступления
в редакцию: 19.01.2021**

НАТУРНЫЕ ХОДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВОДИТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

С.Б. Верещагин

ORCID: 0000-0003-4588-8368 e-mail: sbver@yandex.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
Москва, Россия

Представлены результаты климатических исследований, демонстрирующих тяжелые условия работы водителя в условиях летних температур. Показано влияние высокой температуры на физиологическое состояние человека, управляющего машиной (увеличение утомляемости, снижение внимания, рост числа ошибок). При этом не всегда климат в кабине можно обеспечить с помощью кондиционера, в силу технической невозможности или экологической небезопасности. Многие проведенные ранее аналогичные исследования были некорректны и не выявили реально опасные факторы. Для выявления воздействия на водителя реальных температурных факторов были проведены ходовые испытания в условиях Московского региона, а также в южных областях России. Для исследований был выбран автомобиль ВАЗ, поскольку он прост и доступен в эксплуатации, а система вентиляции удобна для проведения экспериментов. При этом объем обитаемого отсека (салона) автомобиля соответствует объему современных и перспективных кабин специальных колесных и гусеничных машин, что позволяет полученные результаты температурных исследований считать достоверными. Температурные замеры проводились в зоне головы, груди, живота, бедер и стоп водителя; в большинстве своем они явно превышали допустимые нормы. Перегрев в условиях осенней погоды под действием прямой солнечной радиации также может отрицательно сказаться на состоянии водителя. Исследования параметров влажности, воздействующей на водителя в кабине при движении в условиях высоких температур, отличаются от данных, приведенных ранее другими исследователями. Проведены испытания по определению эффективности работы вентиляции на различных режимах движения машины.

Ключевые слова: климат, температура, влажность, измерения, вентиляция, кабина, салон.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Верещагин, С.Б. Натурные ходовые испытания для изучения климатических факторов, воздействующих на водителя в условиях высоких температур // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2. С. 68-73. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_68

FULL-SCALE RUNNING TRIALS FOR STUDY OF CLIMATIC FACTORS AFFECTING A DRIVER AT HIGH TEMPERATURES

S.B. Vereshchagin

ORCID: 0000-0003-4588-8368 e-mail: sbver@yandex.ru

Moscow Automobile and Road Transport State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Results of climatic studies that demonstrate the hard working conditions of a driver at summer temperatures, are presented. Influence of high temperature on the physiological state of a man driving a vehicle (increased fatigue, decreased attention, increased number of errors) is demonstrated. At that, it is not always possible to provide the climate in the cabin using an air conditioner, due to technical impossibility or environmental insecurity. Many similar studies conducted earlier were incorrect, and they did not reveal really dangerous factors. To identify the impact of real temperature factors on a driver, running trials were conducted in conditions of the Moscow region, as well as in southern regions of Russia. For the research a VAZ car was chosen, because it is simple and easy to operate, and the ventilation system is convenient for conducting experiments. At that, the volume of the habitable (passenger) compartment of the car corresponds to volumes of modern and advanced cabins of special wheeled and tracked vehicles, which allows us to consider reliable the obtained results of temperature studies. Temperature measurements were carried out in the area of the driver's head, chest, abdomen, thighs and feet; for the most part, they clearly exceeded the permissible norms. Overheating in autumn weather conditions under influence of direct solar radiation can also negatively affect a

driver's condition. Studies of humidity parameters affecting a driver in the cabin when moving at high temperatures differ from the data given earlier by other researchers. Tests were carried out to determine the efficiency of ventilation in various modes of vehicle in motion.

Key words: climate, temperature, humidity, dimensions, ventilation, cabin, salon.

FOR CITATION: Vereshchagin S. B. Full-scale running trials for study of climatic factors affecting a driver at high temperatures. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 68-73. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_68

Целью настоящей статьи является определение реальных условий работы водителя в условиях жары и установление закономерностей, влияющих на состояние водителя при различных режимах нагрева обитаемых отсеков, работы вентиляции и уровней влажности. Следует отметить, что не всегда с помощью установки кондиционера можно решить вопросы климата в обитаемых отсеках машины, в ряде случаев эта установка просто технически невозможна. Иногда даже ее работа не может обеспечить комфортное и безопасное нахождение водителя и пассажиров в кабинах и салонах автомобилей. Кроме этого, само применение систем кондиционирования не всегда бывает безопасным для водителя и пассажиров. Может иметь место и переохлаждение людей, находящихся внутри обитаемого отсека, а также опасный для здоровья перепад температур на теле за счет прямого солнечного воздействия и охлаждения воздухом кондиционера. Также при применении кондиционеров может иметь место биологическая опасность за счет присутствия в испарителях вредных бактерий (различных разновидностей «легионеллы»). Соответственно, необходимо выявление закономерностей нарастания и перераспределения температур внутри обитаемых отсеков.

Климату многих регионов России в любой сезон свойственны резкие перепады температуры и влажности. Меняющиеся климатические условия усложняют эксплуатацию техники и затрудняют работу водителей. За последние 70 лет всем производителям колесной и гусеничной техники удалось наладить производство надежных отопителей кабин, которые позволяют обеспечить необходимый микроклимат во внутрикабинном пространстве даже при самых низких температурах окружающей среды. Обеспечить микроклимат при высоких температурах оказалось более сложной задачей. Это связано с тем, что, с одной стороны, конструкции кабин не позволяют защитить внутрикабинное пространство от проникновения прямой солнечной радиации и отвода тепла из обитаемой зоны водителя и пассажиров, а с другой стороны, не всегда применяются эффективные и надежные кондиционерные установки, способные эффективно работать при высоких вибрационных и ударных нагрузках, будучи при этом быть компактными.

Исследования, проведенные в Волгоградской и Ростовской областях по определению причин аварийности, показали [1], что причиной роста аварийности в условиях летней жары являются высокие температуры (выше +26...+30 °С), пагубно действующие на состояние водителей. Многие исследования, направленные на изучение климатических условий в кабинах и обитаемых отсеках автомобилей в условиях жары, опубликованные с 1970-х гг. по настоящее время, были проведены некорректно и не выявили реально опасные факторы температурного воздействия.

Для выявления закономерностей влияния высоких температур на водителя в Москве и Московской области, а также в Волгоградской и Ростовской областях, проводились исследования микроклимата в салоне машины в условиях ее движения. Были получены характеристики влажности, воздействующей на водителя при изменении скорости движения, а также режима работы системы вентиляции. Во время испытаний был применен новый подход, позволяющий получить истинные значения температуры и влажности, отличные от проводимых ранее другими авторами и коллективами. В ходе исследований были опробованы новые методики испытаний, позволившие получить реальные температурно-влажностные характеристики и исследовать работу системы вентиляции салона автомобиля на различных режимах. Южные регионы России были выбраны потому, что в условиях летней жары там

значительно увеличивалось число аварий. К тому же эти регионы удобны для проведения высокотемпературных климатических исследований, поскольку в них 220-260 дней в году бывает ясная безоблачная погода. Такие погодные условия позволяют проводить климатические исследования при стабильных параметрах температуры и влажности от нескольких дней до недели. Ранее в этих областях уже проводились климатические испытания, и полученные при них параметры нуждались в проверке. Также были проведены испытания в условиях Московского региона в весенний и осенний периоды с целью выявления воздействия на водителя повышенных температур в салоне автомобиля.

Климатические испытания по изучению температурных параметров в салоне автомобиля в условиях движения

При проведении исследований использовался легковой автомобиль светлого окраса. Он был выбран по причине простоты использования во время испытаний, удобства манипуляций с системой вентиляции во время экспериментов. Объем обитаемого салона автомобиля соответствует объему современных и перспективных кабин специальных колесных и гусеничных машин. Также применялась сертифицированная измерительная аппаратура для определения температуры и влажности.

Условия испытаний [2]: температура воздуха +31...+33 °С, машина светлого цвета двигалась по направлению на юг (отклонение от направления $\pm 10^\circ \dots 15^\circ$), скорость движения 70...80 км/ч., время измерений с 11.00 до 15.00. Температуры измерялись в зонах: голова водителя, грудь, живот, ноги. В исследованиях, проведенных ранее, температуры, в соответствии с нормативными документами, измерялись только в области голова – грудь. Такие исследования не могли быть достоверными, так как не учитывалось воздействие прямой солнечной радиации на водителя. Многие производители автомобильных кондиционерных установок умышленно скрывают пагубное влияние прямой солнечной радиации на водителей и пассажиров. Также скрываются медицинские данные о том, что перепад температур на поверхности тела человека за счет прямой солнечной радиации и низкотемпературного воздействия кондиционера может вызывать простудные и обострять хронические заболевания.

Таблица 1.

Исследование температуры, воздействующей на водителя и пассажиров при движении транспортного средства

Table 1.

The study of temperatures affecting a driver and passengers when the vehicle is moving

| Зоны измерения температур на рабочем месте водителя | Величины измеренных температур | Внешняя температура (в тени) | Воздействие солнечного света (под воздействием солнца /в тени) |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Голова | +42 °С | +31 °С | в тени |
| Грудь | +39 °С | +31 °С | в тени |
| Живот | +61 °С | +31 °С | под воздействием солнца |
| Бедра | +61 °С | +31 °С | под воздействием солнца |
| Стопы | +31 °С | +31 °С | в тени |

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что замеренные температуры в зоне расположения водителя превышают допустимые нормы его комфортной и безопасной работы [3-7]. Перепады температур в различных зонах на месте водителя связаны с тепловым излучением от крышной панели, температура которой может превышать +52...+54 °С и действием прямой солнечной радиации, воздействующей на зону живота и бедер. Самый холодный воздух скапливается в районе пола салона, поэтому замеренная там температура может не превышать +31 °С. К тому же панели и детали нижней части корпуса машины в ночное время

могут охлаждаться до +16...+18 °С и во время утренних измерений еще не успевают нагреться. К тому же набегающие струи воздуха охлаждают нижнюю часть салона. При оценке тепловых потоков, поступающих в обитаемые отсеки машины, можно сделать вывод, что 70 % тепла, вызывающего повышение температуры в салоне или кабине, поступает через остекление и лишь 30 % – от нагреваемых крышной и боковых панелей.

Опасное тепловое воздействие на человека подразделяют на четыре степени [2]:

- 1-я степень, температура до +40 °С;
- 2-я степень, температура до +50 °С;
- 3-я степень, температура до +60 °С;
- 4-я степень, температура свыше +60 °С.

Исследования роста количества ошибок, совершаемых оператором при росте температуры, показали, что ее повышение с +27 °С до +35 °С может вызывать рост допускаемых ошибок в 10...20 раз. По степени переносимости жары водители, как и все люди, могут подразделяться на три категории: легко, средне и плохо переносящие. Вся приводимая статистика по влиянию повышения температуры на рост количества допускаемых ошибок относится к средней категории. У людей, плохо переносящих жару, статистика роста ошибок с повышением температуры окружающей среды может быть еще более пагубной. Приведенные климатические испытания в Московском регионе в условиях осенней погоды показали, что под воздействием солнечной радиации температура в кабине и салоне транспортного средства способна повысится до опасной величины (табл. 2). При условии ношения водителем сезонной теплой одежды может произойти его перегрев, и при выходе из обитаемого отсека в естественную наружную температуру + 9...+ 13 °С возможно охлаждение организма с последующим возникновением простудного или обострением хронического заболевания.

Таблица 2.

Температура, воздействующая на водителя в салоне автомобиля в условиях осенней солнечной погоды

Table 2.

Temperatures affecting a driver in vehicle interior in conditions of autumn sunny weather

| Место замера температуры | На уровне груди водителя | На уровне живота водителя (воздействует солнечная радиация) | На уровне ног водителя | Температура окружающей среды |
|--------------------------|--------------------------|---|------------------------|------------------------------|
| Величина температуры | + 23 °С | + 34 °С | + 15 °С | + 11 °С |

Испытания по определению уровня влажности в обитаемом отсеке транспортного средства в процессе движения

При испытаниях по определению уровней влажности, влияющих на функционирование водителя, определялись такие величины, как уровень влажности на расстоянии 20 м от шоссе, уровень влажности над поверхностью шоссе, уровень влажности на поверхности одежды на уровне груди, уровни влажности на уровне груди в 3, 5 и 50-60 см от водителя, температура в салоне на уровне груди водителя. Измерения проводились при следующих режимах движения машины: стоянка на обочине, движение по дороге с малой скоростью (скорость 50 км/ч), движение по дороге с большой скоростью (90 км/ч.) По результатам испытаний (табл. 3) можно сделать вывод, что имеющееся мнение о том, что наличие водителя и пассажиров в обитаемом отсеке приводит к повышению влажности в нем, не соответствует действительности. Уровень влажности в салоне может соответствовать наружной влажности (в тени) или при исправно работающей вентиляции быть даже ниже этого уровня.

Таблица 3.

**Уровни влажности, воздействующей на водителя
при различных условиях движения транспортного средства**

Table 3.

Levels of humidity affecting a driver under various conditions of the vehicle in motion

| Скорость движения автомобиля | Стоянка на обочине | Скорость 50 км/ч | Скорость 90 км/ч |
|---|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Наружная температура (тень) | +31 °С | +31 °С | +31 °С |
| Температура в салоне на уровне груди водителя | +42 °С | +40 °С | +40 °С |
| Влажность на поверхности одежды | 62 % | 57...64 % | 58...62 % |
| Влажность в 3 см от поверхности одежды | 37 % | 27...33 % | 28...32 % |
| Влажность в 5 см от поверхности одежды | 35 % | 19...22 % | 19...22 % |
| Влажность в салоне в 50-60 см от водителя | 34 % | 19 % | 19 % |
| Влажность над поверхностью шоссе | 24 % | 24 % | 24 % |
| Влажность на расстоянии 20 м от шоссе | 34 % | 34 % | 34 % |

**Исследование влияния на водителя
режимов работы приточной и вытяжной вентиляций**

В ходе испытаний проводились исследования влияния на водителя режимов работы приточной и вытяжной вентиляций. Машина двигалась по шоссе со скоростью 85...95 км/ч. Состояние водителя оценивалось на основе его личных субъективных ощущений. Выявлено (табл. 4), что наиболее плохо себя чувствует водитель, если отключена вытяжка салона (оценка неудовлетворительно). Отключение притока воздуха оказывает немного меньшее влияние (оценка удовлетворительно).

Таблица 4.

**Исследование влияния режимов работы вентиляции в обитаемом отсеке автомобиля
на внутренний микроклимат и ощущения комфорта водителем**

Table 4.

**Study of influence of ventilation operation modes in habitable compartments
of the vehicle on interior microclimate and on the driver's sense of comfort**

| Режимы работы вентиляции | Температура в салоне на уровне головы водителя | Наружная температура воздуха (в тени) | Субъективная оценка водителем комфорта |
|--|---|--|---|
| Приток воздуха в салон и вытяжка открыты полностью, окно водителя приоткрыто на 30-40 мм | 30,9 °С | 23 °С | Отлично |
| Приток воздуха в салон и вытяжка открыты полностью, окно водителя закрыто | 31,5 °С | 23 °С | Хорошо |
| Приток воздуха закрыт, окно и вытяжная вентиляция открыты | 31,9 °С | 23 °С | Удовлетворительно |
| Приток воздуха и окно закрыты, вытяжка открыта | 32,5 °С | 23 °С | Удовлетворительно |
| Вытяжка и окно закрыты, приток воздуха открыт | 32,5 °С | 23 °С | Неудовлетворительно |

Выводы

1. Температура, замеренная в салоне автомобиля, превышает нормы, при которых возможно безопасное функционирование водителя; наиболее характерно это для зон замера температур, ранее не исследованных.

2. Картина распределения влажности внутри салона отличается от более ранних исследований влажности и имеет распределение, более благоприятное для водителя.

3. При движении автомобиля вытяжная вентиляция оказывает на водителя большее влияние, чем приточная.

Библиографический список

1. **Варламов, В.А.** Что надо знать водителю о себе / В.А. Варламов. – М.: Транспорт, 1990. – 192 с.
2. **Верещагин, С.Б.** Исследование температурного режима и влажности в кабине транспортного средства в условиях жары // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. №3. С. 56-63.
3. **Верещагин, С.Б.** Обеспечение климатических условий в кабинах и обитаемых отсеках специальных колесных и гусеничных машин: монография / С.Б. Верещагин. – М.: МАДИ, 2014. – 99 с.
4. **Михайлов, М.В.** Микроклимат в кабинах мобильных машин / М.В. Михайлов, С.В. Гусева. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.
5. **Вайсман, А.И.** Гигиена труда водителей автомобилей / А.И. Вайсман. – М.: Медицина, 1988. – 187 с.
6. **Багиров, Б.Г.** Человек и жаркий климат (Физиология и гигиена труда) / Б.Г. Багиров. – Ашхабад: БИЛЫМ. 1977. – 64 с.
7. **Кощев, В.С.** Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур / В.С. Кощев, Е.А. Кузнец. – М.: Медицина, 1986. – 255 с.
8. **Малышева, А.Е.** Гигиенические вопросы радиационного теплообмена человека с окружающей средой / А.Е. Малышева. – М.: Медицина, 1963. – 243 с.
9. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. – 75 с.
10. ГОСТ Р 50993-96. Автотранспортные средства. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Требования к эффективности и безопасности. 1996.

*Дата поступления
в редакцию: 09.03.2021*

УДК 629.357

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_74

РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТЯЖЕЛЫХ НЕДЕЛИМЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

К.Б. Евсеев

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb_evseev@bmstu.ru

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

Рассмотрена проблема, связанная с обеспечением транспортной доступности в регионах с неразвитой дорожной сетью, в том числе, в условиях районов Крайнего Севера. Обосновывается актуальность рассматриваемого вопроса и представлены пути решения проблемы, один из которых связан с разработкой новых транспортных средств для перевозки тяжелых неделимых грузов в условиях Крайнего Севера. Разработана иерархия эксплуатационных свойств, характеризующих транспортное средство для перевозки тяжелых неделимых грузов. В зависимости от функционального назначения транспортного средства, при оценке эффективности принятых технических решений учитывается определенная совокупность наиболее значимых эксплуатационных свойств. Выявлены наиболее значимые свойства, характеризующие подвижность, исходя из функционального назначения и условий эксплуатации. Установлено, что дальнейшая сравнительная оценка эффективности применения каждого из вновь разрабатываемых конструктивных исполнений транспортных средств невозможна без использования математического моделирования и комплекса натурно-математического моделирования, позволяющего имитировать движение транспортных средств по статистически заданным трассам.

Ключевые слова: транспортное средство, автопоезд, гусеничный движитель, Крайний Север, иерархия эксплуатационных свойств, неделимый груз, эксплуатационные свойства, подвижность, проходимость, быстрходность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Евсеев, К.Б. Разработка иерархии эксплуатационных свойств транспортных средств для перевозки тяжелых неделимых грузов в условиях крайнего севера // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 74-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_74

DEVELOPMENT OF HIERARCHY OF OPERATIONAL PROPERTIES OF VEHICLES FOR TRANSPORTING OF HEAVY INDIVISIBLE LOADS IN THE FAR NORTH CONDITIONS

K.B. Evseev

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb_evseev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Problems associated with provision of transport accessibility in regions with undeveloped road networks, including transport accessibility in the conditions of the Far North, is identified. Up-to-dateness of the issue under consideration is validated, and ways to solve the problem are presented; one of the ways is related to development of new vehicles for transportation of heavy indivisible loads in conditions of the Far North. Hierarchy of operational properties that characterize a vehicle for transportation of heavy indivisible loads has been developed. Depending on the functional purpose of a vehicle, when evaluating the effectiveness of the technical decisions taken, a certain set of the most significant operational properties is taken into account. The most significant properties that characterize the mobility property are determined, based on the functional purpose and operating conditions. It is established that further comparative evaluation of effectiveness of each of newly developed alternate designs of vehicles is impossible without use of mathematical modeling and complex full-scale mathematical modeling, that allows to simulate the movement of vehicles along statistically specified routes.

Key words: vehicle, road train, caterpillar drive, Far North, hierarchy of performance properties, indivisible cargo, performance properties, mobility, cross-country ability, speed.

FOR CITATION: Evseev K.B. Development of hierarchy of operational properties of vehicles for transporting of heavy indivisible loads in the Far north conditions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 74-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_74

Введение

В настоящее время активно осваиваются богатые полезными ископаемыми районы Крайнего Севера, а также многие другие регионы с неразвитой дорожной сетью. Для добывающих отраслей промышленности здесь возникает ряд проблем, связанных с необходимостью перевозки крупногабаритного оборудования, транспортных контейнеров, строительных материалов и других тяжелых неделимых грузов. Важной проблемой является транспортная доступность в условиях с неразвитой дорожной сетью. Одним из путей решения задачи перевозки тяжелых неделимых грузов в этих регионах является строительство автомобильных и железных дорог, создание соответствующей инфраструктуры, поддержание ее функционирования и т.д. Однако особенностью северных территорий РФ являются суровые климатические условия с большим количеством осадков и резким перепадом температур, поэтому большинство транспортных средств, которые традиционно используются в районах нашей страны для перевозки грузов, не могут здесь эксплуатироваться. Кроме этого, при строительстве автомобильных и железных дорог в районах Крайнего Севера необходимо учитывать следующие особенности эксплуатации: мерзлый грунт, слабонесущие грунты, большое количество снега в зимний период и увеличение объема водных объектов вследствие активного таяния снега в летний период и т.д. Все это приводит к невозможности или экономической нецелесообразности развития дорожной сети в этих регионах. Таким образом, для решения проблемы перевозки тяжелых неделимых грузов в регионах с неразвитой дорожной сетью и в условиях бездорожья требуется разработка специальных транспортных средств (ТС).

Транспортное средство для перевозки тяжелых неделимых грузов, как и любое другое, характеризуется совокупностью различных эксплуатационных свойств: подвижностью, надежностью, технико-экономическими свойствами и др. В зависимости от функционального назначения машины, при оценке эффективности необходимо учитывать определенную совокупность наиболее значимых свойств, приоритет которых определяется условиями эксплуатации. С этой целью необходимо разработать и научно обосновать иерархию эксплуатационных свойств, характерную для рассматриваемых ТС.

Иерархия эксплуатационных свойств транспортных средств для перевозки тяжелых неделимых грузов в условиях Крайнего Севера

Разработкой иерархии эксплуатационных свойств различных ТС и исследованиями их значимости занимались многие ученые и научные школы. Известны работы Ю.Л. Рождественского, А.В. Морозова, В.Н. Наумова, Я.Е. Фаробина, А.С. Литвинова, Л.В. Барахтанова, А.А. Аникина, В.Н. Кравца, В.В. Белякова, М.Я. Дубенского, И.А. Плиева, М.В. Нагайцева, М.Р. Калимулина, А.С. Дьякова и др., а также работы научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Московского политехнического университета, МАДИ, Военной академии бронетанковых войск, ОАО «НИИ Стали», 21 НИИИ (ВАТ) МО РФ, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и др.

Для определения совокупности наиболее значимых свойств, характеризующих ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов, рассмотрим подробно их эксплуатационные свойства и разработаем иерархию свойств для возможности дальнейшей оценки эффективности различных вариантов конструктивно-компоновочного исполнения. ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов характеризуются следующими обобщенными наиболее значимыми эксплуатационными свойствами: по назначению и эксплуатационно-экономическими [1]. В свойство по назначению для данного типа ТС входит только свойство подвижности. К эксплуатационно-экономическим свойствам относятся: грузоподъемность и грузместимость,

безопасность, надежность, эргономичность и свойства, характеризующие экономические показатели (стоимость, уровень унификации, продолжительность этапов жизненного цикла и др.) Разработанная иерархия эксплуатационных свойств содержит четыре уровня эксплуатационных свойств, измерителей и показателей. На рис. 1 представлены верхние два уровня иерархии эксплуатационных свойств, характеризующих ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов.



Рис. 1. Иерархия эксплуатационных свойств верхнего уровня

Fig. 1. Hierarchy of top-level operational properties

Рассмотрим первый и второй уровни иерархии эксплуатационно-экономических свойств, которые представлены на рис. 2.



Рис. 2. Иерархия эксплуатационно-экономических свойств 1 и 2 уровня

Fig. 2. Hierarchy of operational and economic properties of level 1 and 2

Грузоподъемность и грузовместимость ТС характеризуются максимальной допустимой массой перевозимого груза (грузоподъемностью) и максимальным объемом перевозимого груза (грузовместимостью) [2]. Отличительной особенностью рассматриваемых ТС является необходимость перевозки крупногабаритного неделимого груза с заранее известными массой и габаритами, например, транспортный контейнер, который одновременно определяет доступное пространство проектирования для шасси ТС и ограничивает варианты возможных конструктивно-компоновочных решений с учетом требований технического задания (ТЗ): массово-габаритных ограничений, допустимых значений полной массы и осевой нагрузки, а также требований к прочности и жесткости несущей системы и других требований и ограничений. Таким образом, с учетом особенностей назначения и конструктивно-компоновочных ограничений, связанных с массогабаритными параметрами груза, свойство грузоподъемности и грузовместимости можно не рассматривать при оценке значимости эксплуатационных свойств для рассматриваемых ТС.

Безопасность является важнейшим комплексным свойством, от которого непосредственно зависят жизнь и здоровье людей, сохранность автомобилей и грузов, состояние окружающей среды. Согласно разработанной иерархии эксплуатационных свойств, безопасность ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов подразделяется на активную, пассивную и экологическую. К конструктивным мероприятиям, обеспечивающим пассивную безопасность, относятся: сохранение жизненного пространства, снижение инерционных нагрузок в процессе удара, ограничение перемещений людей и грузов, находящихся в ТС, а также конструктивные мероприятия, обеспечивающие внешнюю пассивную безопасность. Перечисленный комплекс мероприятий относится в большей степени к вопросу конструктивного исполнения кабины ТС и к задаче сохранения жизненного пространства, а также обеспечения требуемой жесткости и прочности конструктивных элементов ТС. На текущем этапе развития науки и техники вопросу пассивной безопасности посвящено большое количество работ [3-9], используются известные научные методы и инструменты при оценке пассивной безопасности, поэтому можно говорить о достижимости или невозможности достижения требуемых показателей пассивной безопасности, определенных в ТЗ.

К задачам обеспечения экологической безопасности ТС относятся мероприятия по снижению степени воздействия движителя на грунт, токсичности и дымности выбросов. Требования к содержанию вредных веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС), уровню шума и др. определены техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств». Поэтому будем считать, что узлы и агрегаты, используемые в конструкции рассматриваемых ТС, отвечают этим требованиям, а вопросы взаимодействия движителя с грунтом, которые подробно рассмотрены в работах [10-13], будем принимать во внимание при рассмотрении свойства проходимости. Необходимо также учитывать функциональное назначение рассматриваемых ТС, поэтому вопрос экологической безопасности можно исключить из рассмотрения при анализе значимости показателей эксплуатационных свойств.

Таким образом, при оценке эффективности различных вариантов конструктивно-компоновочных исполнений ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов показатели пассивной безопасности и экологической безопасности считаются одинаково достижимыми или недостижимыми для всех рассматриваемых объектов, поэтому они исключаются из дальнейшего анализа.

Системы активной безопасности направлены на снижение вероятности возникновения непредвиденных аварийных ситуаций. Активная безопасность направлена на повышение эксплуатационных свойств. Она оказывает влияние на свойства устойчивости, управляемости, маневренности и тормозные свойства, тесно связана со свойством подвижности, поэтому вопросы, относящиеся к этим эксплуатационным свойствам, будем рассматривать при анализе комплексного свойства подвижности в контексте его повышения. Остальные требования к освещению, звуковой сигнализации и т.д. рассматривать не будем, поскольку

считаем, что все рассматриваемые объекты им соответствуют. Надежность является комплексным свойством, состоящим из сочетания следующих свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Измерители надежности могут учитывать одновременно несколько свойств, составляющих надежность ТС (комплексные), а могут быть и единичными, которые характеризуют только одно свойство надежности. Как правило, показатели надежности определены заранее требованиями ТЗ, и задача достижения заданных показателей надежности на этапе проектирования является исключительно инженерной задачей. Кроме этого, проблеме обеспечения надежности посвящено большое количество работ [14-16], поэтому будем считать, что на современном уровне развития науки и техники, показатели надежности будут достижимы для всех рассматриваемых объектов. Таким образом, в дальнейшем комплексное свойство надежности для оценки значимости показателей эксплуатационных свойств ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов рассматривать не будем.

Эргономические свойства формируются с учетом повышения эффективности деятельности и сохранения здоровья водителя и членов экипажа ТС за счет создания конструкций, в которых учитывают характеристики пользователей. Эргономические свойства также относятся в большей степени к вопросу конструктивного исполнения кабины и вопросу вторичного подрессоривания, поэтому при анализе значимости эксплуатационных свойств учитывать их не будем. Экономические свойства с учетом функционального назначения шасси будут в большей степени определяться экономическими свойствами перевозимого груза, поэтому показатели стоимости шасси, унификации и продолжительности этапов жизненного цикла, характеризующие экономические свойства, при анализе значимости эксплуатационных свойств учитывать не будем. Таким образом, при комплексном сравнении эффективности вариантов конструктивно-компоновочных исполнений рассматриваемых ТС эксплуатационно-экономические свойства можно исключить из рассмотрения.



Рис. 3. Иерархия комплексного свойства подвижности

Fig. 3. Hierarchy of complex property of mobility

Рассмотрим первый, второй и третий уровни иерархии эксплуатационных свойств, определяемых назначением ТС. Подвижность – это свойство, характеризующее способность ТС преодолевать конечное расстояние за конечное время без дополнительных средств поддержания движения [1]. Вопросу разработки иерархии подвижности транспортных средств посвящено большое количество работ [1, 2, 17, 18]. Иерархическая структурная схема фор-

мирования подвижности ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов как комплексного свойства, определяемого более простыми свойствами: проходимостью, быстроходностью и автономностью, приведена на рис. 3. Эксплуатационное свойство проходимости определяет возможность движения в ухудшенных дорожных условиях и по бездорожью, а также преодоления различных препятствий [19]. Проходимость как комплексное свойство включает более простые: опорную проходимость, профильную проходимость и бродоходимость. Иерархическая структура свойства проходимости представлена на рис. 4.



Рис. 4. Иерархия комплексного свойства проходимости

Fig. 4. Hierarchy of complex property of cross-country ability

Анализируя работы [1,2,17,19,22-24] можно выделить единичные свойства, измерители и показатели опорной проходимости и профильной проходимости ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов, которые представлены в табл. 1 и табл. 2. Бродоходимость определяется глубиной преодолеваемого брода с твердым дном.

Таблица 1.

Измерители свойства опорной проходимости

Table 1.

Meters of flotation property

| Измеритель | Единица измерения |
|---------------------------------------|-------------------|
| Тягово-цепные свойства | |
| Сцепной вес | кН |
| Коэффициент сцепного веса | - |
| Полная сила тяги | кН |
| Свободная сила тяги | кН |
| Коэффициент свободной силы тяги | - |
| Сила тяги на крюке | кН |
| Удельная сила тяги на крюке | - |
| Тягово-скоростные характеристики | - |
| Тягово-энергетические свойства | |
| Мощность ТС | кВт |
| Удельная мощность ТС | кВт/т |

Окончание табл. 1.

| | |
|--|--------------------|
| Тяговая мощность на крюке | кВт |
| Удельная тяговая мощность на крюке | кВт/т |
| Мощность сопротивления качению | кВт |
| Мощность сопротивления движению | кВт |
| Мощность колееобразования | кВт |
| Зависимость мощности сопротивления качению от скорости движения | - |
| Способность движения по снегу | |
| Максимальная глубина снежной целины | м |
| Минимальный радиус поворота без потери проходимости | м |
| Способность движения по ОП со слабой несущей способностью | |
| Давление движителей на ОП | кг/см ² |
| Среднее давление в контакте | кг/см ² |
| Среднее давление по выступам рисунка протектора (трака) | кг/см ² |

Таблица 2.

Измерители свойства профильной проходимости

Table 2.

Meters of profile cross-country property

| Измеритель | Единица измерения |
|---|-------------------|
| Способность к преодолению отдельных препятствий | |
| Максимальная ширина преодолеваемого рва | м |
| Максимальная высота преодолеваемой вертикальной стенки | м |
| Максимальная высота преодолеваемого контрэскарпа | м |
| Способность преодоления уклонов | |
| Максимальный угол преодолеваемого подъёма | градус |
| Максимальный угол преодолеваемого косогора | градус |
| Максимальный угол при движении на спуске | градус |
| Геометрические параметры ТС | |
| Геометрические параметры ТС | |
| Дорожный просвет | мм |
| Передний и задний свесы | мм |
| Углы переднего и заднего свесов | градус |
| Продольный угол проходимости | градус |
| Продольный радиус проходимости | мм |
| Поперечный радиус проходимости | мм |
| Углы гибкости автопоезда в вертикальной и поперечной плоскостях | градус |
| Угол перекоса мостов | градус |
| Коэффициент совпадения следов передних и задних колес | - |
| Маневренность | |
| Минимальный радиус поворота ТС (тягача) | м |
| Минимальное расстояние от центра поворота до оси следа наружного наиболее удаленного колеса | м |
| Габаритный радиус поворота ТС | м |
| Габаритная полоса движения | м |
| Поворотная ширина по следам колес | м |
| Углы гибкости автопоезда в горизонтальной плоскости | градус |

Эксплуатационное свойство быстроходности определяет способность ТС к быстрейшему достижению заданной точки маршрута в пределах, ограниченных проходимостью [1]. Комплексное свойство быстроходности характеризуется рядом более простых свойств, среди которых можно выделить следующие свойства, характерные для рассматриваемых ТС: ди-

намичность, способность двигаться по неровностям пути, управляемость и устойчивость [1]. Иерархическая структурная схема быстроходности приведена на рис. 5. Анализируя работы [1, 2, 17, 19, 22, 23-25], можно выделить основные отдельные свойства, показатели и измерители быстроходности, которые приведены в табл. 3-5.

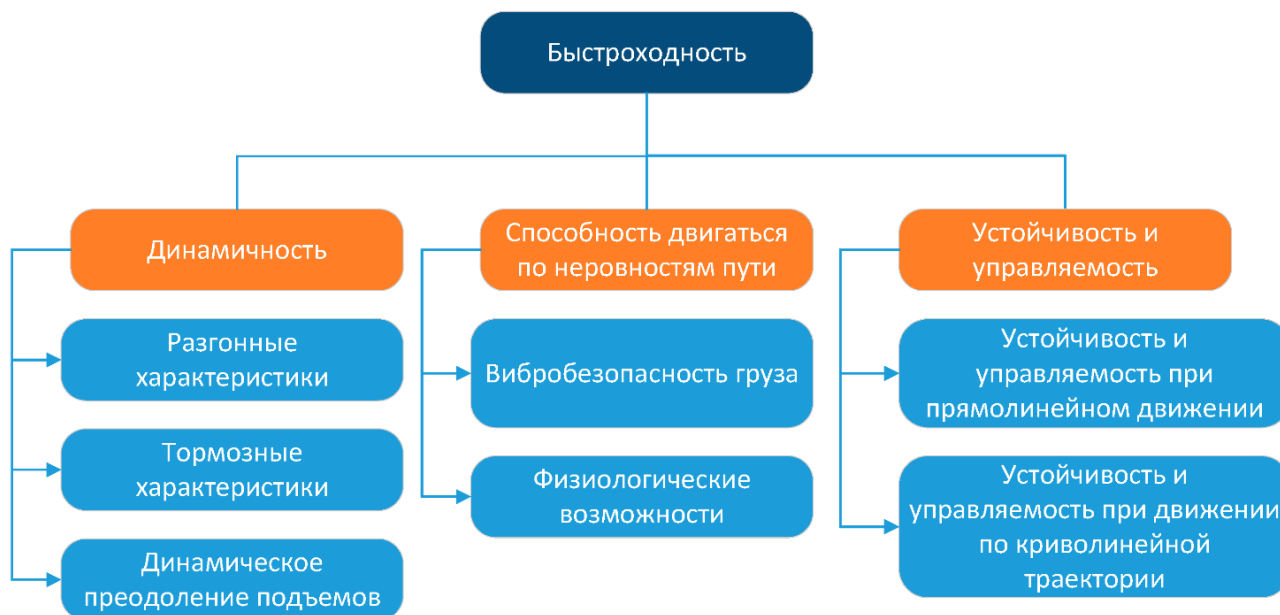


Рис. 5. Иерархия комплексного свойства быстроходности

Fig. 5. Hierarchy of specific speed complex property

Измерители свойства динамичности

Meters of dynamic property

Таблица 3.

Table 3.

| Измеритель | Единица измерения |
|---|-------------------|
| Разгонные характеристики | |
| Максимальная скорость движения | км/ч |
| Удельная мощность | кВт/т |
| Тягово-динамическая характеристика | - |
| Максимальный преодолеваемый коэффициент сопротивления движению | - |
| Время разгона с места до заданной скорости движения | с |
| Путь разгона до заданной скорости движения | м |
| Время прохождения заданного отрезка пути в режиме разгона с места | с |
| Максимальное ускорение при разгоне | м/с ² |
| Тормозные характеристики | |
| Тормозной путь | м |
| Время торможения | с |
| Максимальное замедление при торможении | м/с ² |
| Динамическое преодоление подъемов | |
| Предельная длина подъема определенной крутизны | м |
| Максимальный преодолеваемый коэффициент сопротивления движению | - |

Таблица 4.

Измерители свойства плавности хода

Table 4.

Meters of travelling comfort property

| Измеритель | Единица измерения |
|--|-------------------|
| Способность двигаться с максимальной скоростью по неровностям | |
| Максимальная скорость движения | км/ч |
| Удельная мощность | кВт/т |
| Физиологические возможности | |
| Частота собственных колебаний кузова | Гц |
| Максимальное ускорение на месте водителя (груза) | м/с ² |

Таблица 5.

Измерители свойства устойчивости и управляемости

Table 5.

Meters of stability and controllability property

| Измеритель | Единица измерения |
|--|-------------------|
| <i>Устойчивость и управляемость при прямолинейном движении</i> | |
| Критическая скорость при торможении | км/ч |
| Скорость подруливания | рад/с |
| Критическая скорость автопоезда по влиянию прицепа | км/ч |
| <i>Устойчивость и управляемость при движении по криволинейной траектории</i> | |
| Критическая скорость движения при выполнении маневра «поворот» | км/ч |
| Критическая скорость движения при выполнении маневра «переставка» | км/ч |
| Критические скорости установившегося криволинейного движения по боковому опрокидыванию | км/ч |
| Критические скорости установившегося криволинейного движения по боковому скольжению | км/ч |
| Критические скорости по курсовой и траекторной устойчивости | км/ч |
| Характеристика статической траекторной управляемости | - |
| Чувствительность к повороту рулевого колеса | - |
| Характеристика «рывок руля» | - |
| Характеристика «выход из поворота» | - |
| Характеристика складывания автопоезда при установившемся круговом движении | - |
| Характеристика курсовой устойчивости прицепа | - |

Эксплуатационное свойство автономности определяет способность ТС передвигаться без дополнительных средств поддержания движения [1]. Комплексное свойство автономности характеризуется рядом более простых свойств, среди которых основным свойством является запас хода, который, в свою очередь, подразделяется на более простые: путевой расход топлива (энергии), удельный расход топлива (энергии), емкость топливных баков (аккумуляторных батарей).

Заключение

Разработанная иерархия эксплуатационных свойств может быть использована для определения приоритетов значимости свойств рассматриваемых ТС. Для комплексной оценки эффективности различных возможных конструктивно-компоновочных решений могут быть использованы различные методы, однако наиболее предпочтительным, простым и учитывающим все разнообразие свойств, характеризующих ТС, является метод анализа иерархий. Данный метод предлагается использовать для дальнейшей сравнительной оценки эффективности ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов.

Сопоставляя противоречивость указанных свойств, можно сформировать ряд возможных перспективных технических обликов вновь разрабатываемых ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов. При этом очевидно, что сравнительная оценка эффективности применения каждого допустимого конструктивного исполнения для вновь разрабатываемых ТС не представляется возможной без математического и имитационного моделирования. Также для решения представленной задачи может эффективно применяться комплекс натурно-математического моделирования [26, 27], позволяющий имитировать движение транспортных средств по статистически заданным трассам под управлением «водителя-оператора», находящегося за компьютером, в режиме «реального времени». Для формирования окончательного технического облика вновь разрабатываемых ТС для перевозки тяжелых неделимых грузов и нахождения баланса между его свойствами необходимо в качестве исходных данных иметь перечень задач и технических требований к разрабатываемому ТС.

Библиографический список

1. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка / П.П. Исаков. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
2. **Кравец, В.Н.** Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 156 с.
3. **Багичев, С.А.** Разработка методики расчетно-экспериментальной оценки пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей. Диссертация кандидата технических наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 2013. – 218 с.
4. **Батманов, Э.З.** Интегральная оценка пассивной безопасности легковых автомобилей. Автореферат дис. кандидата технических наук: 05.22.10. – Москва, 2004. – 24 с.
5. **Гончаров, Р.Б.** Методика совершенствования конструкции кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования на базе топологической и параметрической оптимизации для обеспечения требований пассивной безопасности при ударе и минимизации массы. Диссертация кандидата технических наук: 05.05.03. – Москва, 2019. – 161 с.
6. **Зузов, В.Н.** Исследование напряженно-деформированного состояния кузова автобуса применительно к автоматизированному проектированию несущих систем автомобилей. Диссертация кандидата технических наук: 05.05.03. – Москва, 1980. – 183 с.
7. **Зузов, В.Н.** Разработка методов создания несущих систем колесных машин с оптимальными параметрами. Диссертация доктора технических наук: 05.05.03, 01.02.06. – Москва, 2002. – 347 с.
8. **Маркин, И. В.** Разработка методики оценки пассивной безопасности автомобилей и тракторов в отношении ударно-прочностных свойств их кабин на стадии проектирования. Диссертация кандидата технических наук: 05.05.03. – Москва, 2001. – 132 с.
9. **Тумасов, А.В.** Разработка методики расчетной оценки пассивной безопасности кузовов и кабин автомобилей при опрокидывании. Диссертация кандидата технических наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 2008. – 284 с.
10. **Шухман, С.Б.** Метод оценки и расчета разрушающего воздействия полноприводных автомобилей на почвогрунты: учебное пособие / С.Б. Шухман, А.С. Переладов, С.Н. Коркин – М.: Агробизнесцентр, 2010. – 60 с.
11. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин. / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. – Москва: Машиностроение, 1993. – 288 с.
12. **Коркин, С.Н.** Повышение экологической безопасности движения автопоездов в тяжелых дорожных условиях / Коркин С.Н., Курмаев Р.Х. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. № 4 (106). С. 273-279.
13. **Переладов, А.С.** Особенности оценки разрушающего воздействия на грунт полноприводного автомобиля / А.С. Переладов, С.Н. Коркин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. № 1(5). С. 91-96.
14. **Труханов, В.М.** Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла. / В.М. Труханов, А.М. Матвеевко. – Москва: Изд. дом Спектр, 2016. – 663 с.
15. **Лукинский, В.С.** Долговечность деталей шасси автомобиля. / В.С. Лукинский, Ю.Г. Котиков, Е.И. Зайцев. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1984. – 231 с.
16. **Зорин, В.А.** Надежность механических систем: учебник. / В.А. Зорин. – Москва: Инфра-М, 2015. – 380 с.

17. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3(100). – С.145–174.
18. **Беляков, В.В.** Проектирование наземных транспортно-технологических машин и комплексов: учебник/ В.В. Беляков, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров [и др.]; под ред. В.В. Белякова. – Москва: КНОРУС, 2021. – 450 с.
19. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин: учебник. / В.В. Ларин – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
20. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей. / Я.С. Агейкин – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
21. Автомобиль: Теория эксплуатац. свойств: [Учеб. для вузов по спец. «Автомобили и автомоб. хоз-во»]. / Литвинов А. С., Фаробин Я.Е. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
22. **Морозов, А.В.** Комплексное сравнение объектов военной автомобильной техники типа MRAP на стадии проектирования / А.В. Морозов // Журнал ААИ. 2015. № 1(90). С. 40-45.
23. **Иларионов, В.А.** Эксплуатационные свойства автомобиля: теоретический анализ. / В.А. Иларионов – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.
24. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка. / П.П. Исаков – М.: Машиностроение. 1989. Т. 10 Кн.1: Испытания военных гусеничных машин. – 231 с.
25. **Смирнов, Г.А.** Теория движения колесных машин. Учебник для машиностроительных спец. вузов. / Г.А. Смирнов – 2 изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
26. **Kotiev, G.O.** Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulator / G.O. Kotiev, A.V. Miroshnichenko, A.A. Stadukhin, V.B. Kositsyn. Vol. 534, Issue 1, 12 June 2019.
27. **Kotiev, G.O.** Determination of mechanical characteristics of high-speed tracked vehicles traction motor with individual drive wheels / G.O. Kotiev, A.V. Miroshnichenko, A.A. Stadukhin, V.B. Kositsyn // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1177, Issue 1, 10 April 2019, № 012058.

*Дата поступления
в редакцию: 20.11.2020*

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_85

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ
ШНЕКА СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН – ДЛИННОГО МЕЖОПОРНОГО РОТОРА****И.Г. Куклина**

ORCID: 0000-0002-2397-4604 e-mail: kuklina@rambler.ru

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
*Нижний Новгород, Россия***Е.Е. Дёмина**

ORCID: 0000-0002-7008-6984 e-mail: katysha_d2511@mail.ru

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
*Нижний Новгород, Россия***Д.С. Мокеров**

ORCID: 0000-0002-5747-5993 e-mail: mokerov90@bk.ru

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина
Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются нашедшие широкое применение в современной автомобильной технике шнеки. Получены уравнения динамики длинных винтовых роторов – движителей роторно-винтовых машин, имеющих жесткую подвеску. Винтовые фрезы и винтовые шнеки применяются в дорожной технике в зимний период времени для очистки дорог от снега. Получены расчеты статической и моментной неуравновешенности длинных винтовых роторов для подбора опорных конструкций шнеков с целью вибро- и шумопогашения. Предложено устанавливать специальные подшипниковые узлы, имеющие угловую и радиальную погрешности опоры и цапфы с ориентировкой на ось симметрии центра ротора. Выведены уравнения перемещения шнека при смещении, когда ось инерции отклоняется относительно центральной оси шнека-ротора; усугубляется ситуация спиральной навивкой на длинный винтовой ротор и воздействием факторов опорного материала. Сформулированные типы критериев качества в зависимости от вида применения машины, оснащенной длинными винтовыми роторами, требуют минимизации давления между ротором и опорами для увеличения ресурса и одновременно уменьшения вибрации и шума. Движитель – винтовой ротор при выполнении рабочих операций приводит к существенным колебаниям кузова машины, и сбалансированная работа шнека в данном случае необходима также для обеспечения безопасности водителя и пассажиров автосредства. Получение многокритериальных уравнений динамической сбалансированной работы длинных винтовых роторов для обеспечения минимизации вибронгрузок на их опоры – задачи представленных исследований.

Ключевые слова: шнек, роторно-винтовая машина, шнек, вибродиагностика, динамика машин, балансировка вращения деталей машин.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Куклина, И.Г. Математическая модель работы шнека специальных машин – длинного межопорного ротора / И.Г. Куклина, Е.Е. Дёмина, Д.С. Мокеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 85-101. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_85

**MATHEMATICAL MODEL OF OPERATION
OF SPECIAL VEHICLE AUGER – LONG INBOARD ROTOR****I.G. Kuklina**

ORCID: 0000-0002-2397-4604 e-mail: kuklina@rambler.ru

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

E.E. Demina

ORCID: **0000-0002-7008-6984** e-mail: **katysha_d2511@mail.ru**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Mokerov

ORCID: **0000-0002-5747-5993** e-mail: **mokerov90@bk.ru**

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Augers that have found wide application in modern automotive technology are considered. Equations of dynamics of long screw rotors – propellers of rotary-screw vehicles with rigid suspension, are obtained. Screw cutters and screw augers are used in road machinery in winter to clean roads from snow. Calculations of the static and torque imbalance of long screw rotors for selection of screw support structures for the purpose of vibration and noise suppression, are obtained. It is proposed to install special bearing units having angular and radial errors of support and trunnion with orientation to rotor center symmetry axis. Equations of movement of the screw during displacement are derived, when the axis of inertia deviates relative to the central axis of screw-rotor; the situation is aggravated by spiral winding on a long screw rotor and by influence of factors of the supporting material. Formulated types of quality criteria, depending on the type of application of vehicle equipped with long screw rotors, require minimization of pressure between the rotor and supports to increase the service life and to simultaneously reduce vibration and noise. Propeller – screw rotor leads to significant fluctuations in the vehicle body when performing working operations, and a balanced operation of the screw in this case is also necessary to ensure the safety of a driver and passengers of the vehicle. Obtaining multi-criteria equations of dynamic balanced operation of long screw rotors to provide minimization of vibration loads on their supports is the task of the presented research.

Key words: dynamics, long screw rotor, auger, vibration, balancing, poise, dynamic equations.

FOR CITATION: I.G. Kuklina, E.E. Demina, D.S. Mokerov. Mathematical model of operation of special vehicle auger – long inboard rotor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 85-101.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_85

Введение

Россия имеет самую большую территорию в мире, и развитие ее транспортной инфраструктуры является стратегически важной государственной задачей [1]. Чтобы иметь развитую систему дорог, прежде всего, необходима организация их грамотного строительства и обслуживания. Часто машины, являющиеся вездеходами на роторном ходу, применяются для строительства дорог, а машины, оснащенные винтовыми роторами, осуществляют очистку этих дорог. В исследованиях рассматриваются длинные роторы, длина которых превышает 3-4 диаметра тела. Роторы, которыми оснащаются современные дорожные машины – шнеко-роторы и фрезо-роторы. Необходимость разработки теории их динамики обусловлена тем, что оснащенные ими транспортно-технологические средства подвержены дополнительным существенным вибронагрузкам [2] – перемещениям при неуравновешенном положении самого ротора, которые видообразуются и возрастают при увеличении длины шнека [3].

Дорожные машины, рабочими органами которых являются длинные шнеки и длинные винтовые роторы, организованы структурным образом (рис. 1), позволяющим однозначно определиться при применении уравнений динамики для расчетов динамических нагрузений машин разного назначения. В настоящей работе рассматриваются строительные и дорожные транспортно-технологические средства [4], так как колебания и вибрации от рабочих органов сельскохозяйственных машин существенным образом гасятся конструктивными элементами крепления шнеков.

Динамическое равновесие и неуравновешенность длинного винтового ротора

Выполняя транспортно-технологические операции, механизмы машин приводят во вращение шнек, при правильной балансировке которого постоянная угловая скорость вращения и отсутствие внешних возмущений заставляют длинный винтовой ротор совершать свободное вращение вокруг главной оси инерции [5]. Если бы винтовой ротор вращался без совершения рабочих операций и не выполнял своих прямых назначений, он находился бы в состоянии динамического равновесия, и его состояние полностью описывалось бы уравнениями динамического равновесия. При этом суммы моментов и суммы неуравновешенных сил можно приравнять нулю. Уравновешенную работу шнека можно было описать системой уравнений (1):

$$\begin{aligned} \sum \bar{F}_i &= \sum m_i \bar{r}_i \omega^2 = m_{\text{рот}} \bar{e}_{\text{см}} \omega^2 \\ \sum \bar{M}_i &= \sum [\bar{l}_i \bar{F}_i] = \sum [\bar{l}_i \bar{r}_i] \omega^2 \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{r}_i – степень отклонения i -й части тела; m_i – i -ая часть тела; ω – угловая скорость шнека; $\bar{e}_{\text{см}}$ – общий дисбаланс шнека; $m_{\text{рот}}$ – масса шнека; \bar{l}_i – расстояние центра i -ой тела шнека от центра масс.



Рис. 1. Структуризация типов машин, оснащенных длинными винтовыми роторами

Fig. 1. Structuring the types of vehicles equipped with long screw rotors

Нарушение неравенств (1) происходит в случае динамической неуравновешенности длинного винтового ротора [6]. Если шнеко-ротор выполняет рабочие операции по уборке снега с улиц города или роторно-винтовая машина совершает перемещение, нагрузки на рабочий орган и, соответственно, на подшипниковые узлы приводят к смещению оси симметрии шнека параллельно оси инерции (под воздействием снега у снегоуборочных машин и опорной поверхности у роторно-винтовых машин), появляется неуравновешенность шнека (рис. 2). При смещении оси симметрии параллельно определяется статическая неуравновешенность, которая описывается неравенством (2):

$$\sum \bar{F}_i = \sum m_i \bar{r}_i \omega^2 = m_{\text{ром}} \bar{e}_{\text{см}} \omega^2 \neq 0 \quad (2)$$

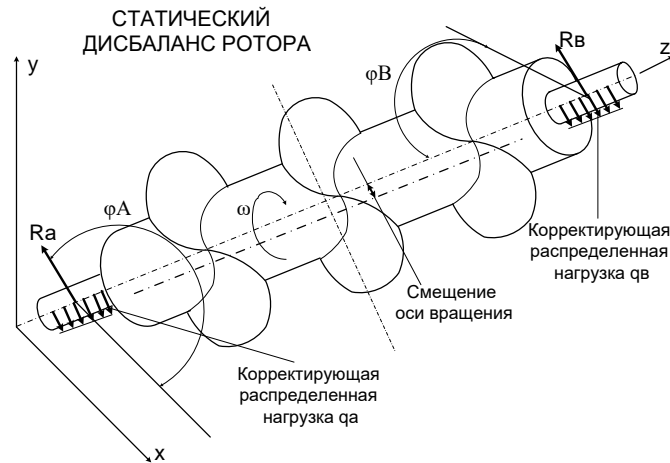


Рис. 2. Статическая неуравновешенность длинного винтового ротора

Fig. 2. Static imbalance of a long screw rotor

Еще более неприятные колебательные процессы вызывает возможность изменения угла между осью шнека и осью симметрии. Появляется уже моментная неуравновешенность (рис. 3), которую можно описать неравенством (3):

$$\sum \bar{M}_i = \sum [\bar{l}_i \bar{F}_i] = \sum [\bar{l}_i \bar{r}_i] \omega^2 \neq 0 \quad (3)$$

Рассматриваемые транспортно-технологические машины совершают рабочие операции в неоднородной среде и чаще всего подвергаются нагрузкам, ведущим и к статической, и к моментной неуравновешенности, шнек при этом подвергает опоры дополнительным нагрузкам [7]. Под влиянием угловой скорости переменные по величине и направлению нагрузки вызывают дополнительные нагружения. Появляются изгибающие моменты, действующие которых на вращающиеся элементы крайне негативно.

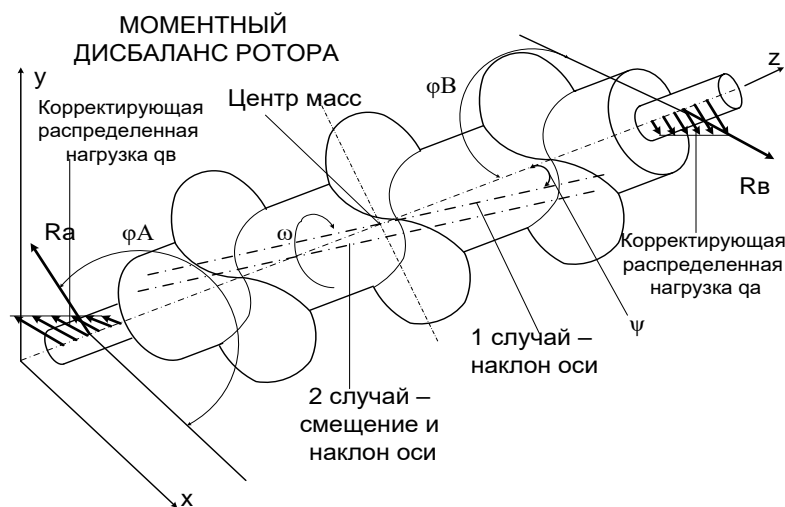


Рис. 3. Неуравновешенность длинного винтового ротора под действием моментов

Fig. 3. Imbalance of a long screw rotor under action of torques

Выражения уравнений (2) и (3) делятся на ω^2 , выполняется условие (4):

$$\begin{aligned} \frac{\sum \bar{F}_i}{\omega^2} &= \sum \bar{D}_i = m_{\text{пом}} \bar{e}_{cm} = \bar{D}_{cm} \neq 0 \\ \frac{\sum \bar{M}_i}{\omega^2} &= \bar{M}_D = [\bar{L} \bar{D}_m] \neq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где \bar{D}_{cm} – главное векторное усилие неуравновешенности шнека; \bar{M}_D – суммарный момент неуравновешенности дисбалансов шнека, появляющийся на межопорном расстоянии L .

Таким образом, представлены уравнения, определяющие силы и моменты, возникающие при работе длинного винтового ротора. Чем ближе к нулю математическое решение вышеприведенных уравнений, тем более сбалансировано работают шнеки при выполнении рабочих операций, ниже нагрузки на опоры и подшипниковые узлы. Только при полном равенстве нулю происходит полное шумо- и вибропогашение, что практически невозможно. Математическое описание неуравновешенности длинных винтовых роторов, возникающей из-за внешних нагрузжений, предложено в данной работе [8].

Винтовой ротор в состоянии динамического равновесия и неуравновешенности

Длинный винтовой ротор работает как межопорный шнек, основные усилия от которого передаются на корпус транспортно-технологического средства через опоры A и B . Исследуются перпендикулярные к главной оси шнека плоскости, которые рассекают межопорный ротор [9]. Сумму векторных сил при дисбалансе заменяют силами, разделенными по плоскостям опор, опорные силы выявляют симметричные противоположные по направлению дисбалансы [10] (5):

$$\bar{D}_{cmA} = \bar{D}_{cm} \frac{L_B}{L}; \quad \bar{D}_{cmB} = \bar{D}_{cm} \frac{L_A}{L}. \quad (5)$$

Сумму моментов при дисбалансе заменяют моментами, разделенными по плоскостям опор, опорные моменты выявят симметричные противоположные по направлению дисбалансы, иначе – кососимметричные дисбалансы (6):

$$\bar{D}_{MA} = -\bar{D}_{MB}; \quad \text{где } \bar{D}_m = \frac{M_D}{L}. \quad (6)$$

Плоскости опор будут работать под воздействием суммарных векторных дисбалансов.

$$\begin{aligned} \bar{D}_A &= \bar{D}_{cmA} + \bar{D}_{MA} \\ \bar{D}_B &= \bar{D}_{cmB} + \bar{D}_{MB} \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, уравнения (7) с учетом уравнений (3) и (4) вместо векторов D_{cm} и M_D (рис. 4) однозначно идентифицируют динамическую неуравновешенность шнека [11].

Силы, образующие суммарный вектор неуравновешенности, имеют противоположные направления, но являются параллельными и располагаются в области центра масс шнека Z_m , проходя через центральную ось. Следовательно, векторы неуравновешенности \bar{D}_{MBA} , определяющие главный момент неуравновешенности, противоположно параллельны [12], равные математически, находятся в плоскости центральной оси инерции Z_0 шнека и плоскости нейтральной, и плоскость оси Z параллельна оси $Z_{\text{пом}}$ (рис. 4).

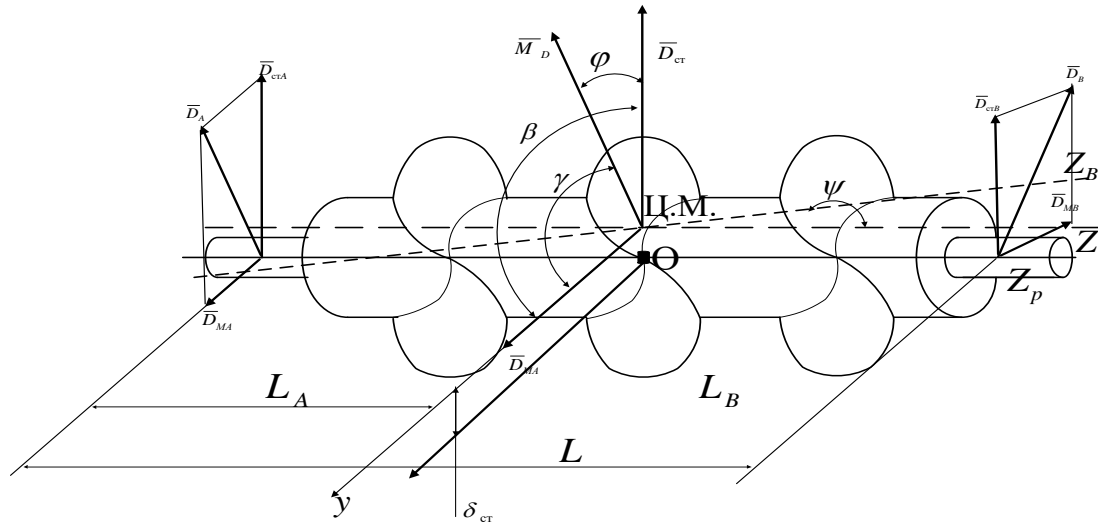


Рис. 4. Общая характерная схема расстановки сил и моментов при неуравновешенной работе длинных роторов

Fig. 4. Characteristic outline of arrangement of forces and torques in case of unbalanced operation of long rotors

Тогда равенство (7) из векторной можно преобразовать в координатную форму [13]
(8):

$$\begin{aligned} D_{AX} &= D_{cmx} \frac{L_B}{L} + D_{MAX} \\ D_{AY} &= D_{cmY} \frac{L_A}{L} + D_{MAY} \end{aligned} \quad (8)$$

Расчет реакций опор можно представить следующим образом (9):

$$\begin{aligned} D_A^2 &= D_{cm}^2 \left(\frac{L_B}{L} \right)^2 + D_{MA}^2 + 2 \frac{L_B}{L} (D_{cmX} D_{MAX} + D_{cmY} D_{MAY}) \\ D_B^2 &= D_{cm}^2 \left(\frac{L_A}{L} \right)^2 + D_{MB}^2 + 2 \frac{L_A}{L} (D_{cmX} D_{MBX} + D_{cmY} D_{MBY}) \end{aligned} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что (10):

$$\bar{D}_{MB} = -\bar{D}_{MA}; \text{ где } D_{MA} = D_{MB} = D_M = \frac{M_0}{L}; \bar{D}_{MB} \perp \bar{M}_0. \quad (10)$$

Для расчета усилий, появляющихся на опорах шнеков при выполнении транспортно-технологических операций следует применить уравнения (11):

$$\left. \begin{aligned} D_A^2 &= \frac{1}{L^2} \left[D_{cm}^2 L_B^2 + M_D^2 + 2L_B (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) \right] \\ D_B^2 &= \frac{1}{L^2} \left[D_{cm}^2 L_A^2 + M_D^2 + 2L_A (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Уникальность и неоднозначность рассматриваемого процесса заключается в том, что для машин в данном случае характерно появление поперечно-распределенной нагрузки на шнеки-роторы. Нагрузка появляется от контакта рабочего органа с разрабатываемым ма-

териалом [14]. На данный момент имеется достаточное количество научных исследований для расчета винтовых конвейеров, выполняющих переработку и перемещение материала по оси шнека [15]. В настоящих изысканиях нагружение на рабочий орган длинного винтового ротора происходит перпендикулярно оси симметрии шнека [16]. Итоговая схема для расчета динамики шнеков, учитывающая действие внешнего нагружения принимает вид (рис. 5).

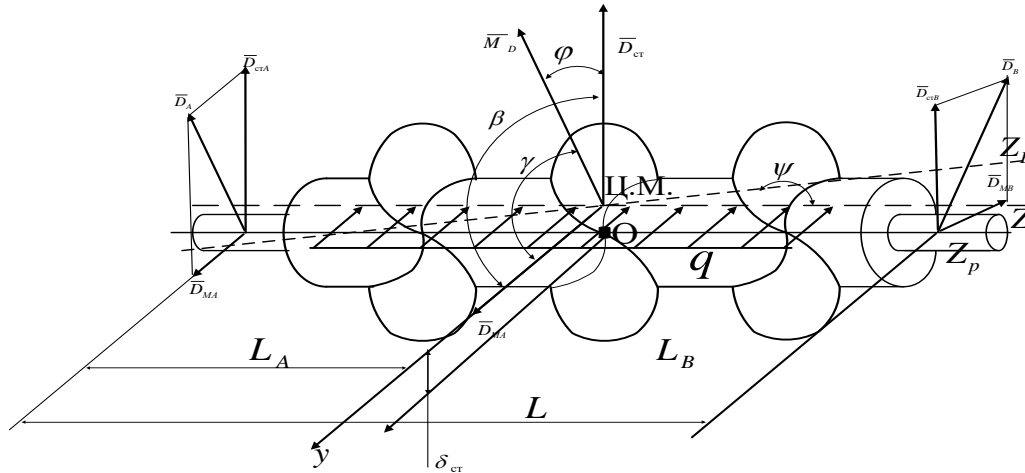


Рис. 5. Общая расчетная схема неуравновешенности длинных роторов

Fig. 5. General design scheme of imbalance of long rotors

После сокращения и преобразования система уравнений (11) принимает вид (12):

$$\left. \begin{aligned} D_A^2 &= \frac{1}{L^2} \left[D_{cm}^2 L_B^2 + q \frac{2}{3} L_B \frac{1}{2} L_B + M_D^2 + 2L_B (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) \right] \\ D_B^2 &= \frac{1}{L^2} \left[D_{cm}^2 L_A^2 + q \frac{2}{3} L_A \frac{1}{2} L_A + M_D^2 + 2L_A (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

В настоящих изысканиях предложено винтовую линию [17] рассматривать как геликоид, поверхность которого задается параметрическими уравнениями: $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, $z = b\varphi$, $0 < r \leq a$, $0 \leq \varphi < 2\pi$. Производная, полученная при расчете предложенных уравнений принимает вид (13):

$$x'_r = \cos \varphi, \quad x'_\varphi = -r \sin \varphi, \quad y'_r = \sin \varphi, \quad y'_\varphi = r \cos \varphi, \quad z'_r = 0, \quad z'_\varphi = b. \quad (13)$$

Прилагается применять гауссовские коэффициенты поверхности Ω , для получения уравнений, вычисляющих площадь геликоида (14). Площадь самого геликоида в данном случае - внешняя оболочка винтовой поверхности шнека [18].

$$\begin{aligned} E &= \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1 \\ G &= r^2 \sin^2 \varphi + r^2 \cos^2 \varphi + b^2 = r^2 + b^2 \\ F &= -r \cos \varphi \sin \varphi + r \sin \varphi \cos \varphi + 0 \cdot b = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Соответственно, площадь поверхности винтовой образующей ротора [19] (15):

$$\begin{aligned}
 |\Omega| &= \iint_{\Delta} \sqrt{1 \cdot (r^2 + b^2)} - 0 \, dr \, d\varphi = \\
 &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \sqrt{r^2 + b^2} \, dr = \pi \left(a\sqrt{a^2 + b^2} + b^2 \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right). \quad (15)
 \end{aligned}$$

При подстановке уравнений контакта поверхности навивки и опорных поверхностей [20] система уравнений неуровновешенности (12) принимает вид (16):

$$\begin{aligned}
 D_A^2 &= \frac{1}{L^2} \left[\begin{aligned} &D_{cm}^2 L_B^2 + q \frac{2}{3} L_B \frac{1}{2} L_B + M_D^2 + \\ &+ 2L_B (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) + \\ &+ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \sqrt{r^2 + b^2} \, dr \cdot \frac{1}{3} \cdot G_{sp} \cdot \frac{3}{2} \cdot D_{un} \end{aligned} \right] \cdot \\
 D_B^2 &= \frac{1}{L^2} \left[\begin{aligned} &D_{cm}^2 L_A^2 + q \frac{2}{3} L_A \frac{1}{2} L_A + M_D^2 + \\ &+ 2L_A (D_{cmX} M_{DY} + D_{cmY} M_{DX}) + \\ &+ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \sqrt{r^2 + b^2} \, dr \cdot \frac{1}{3} \cdot G_{sp} \cdot \frac{3}{2} \cdot D_{un} \end{aligned} \right] \cdot \quad (16)
 \end{aligned}$$

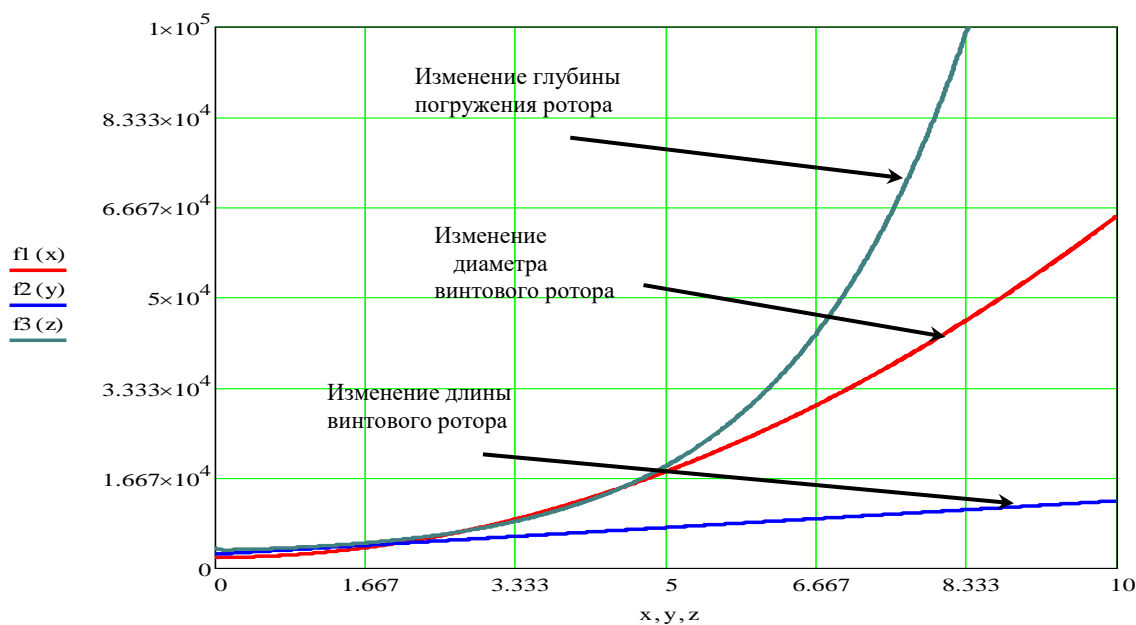


Рис. 6. Графики зависимостей реакций опор при изменении длины винтового ротора, диаметра ротора и глубины погружения ротора в разрабатываемую нагрузку

Fig. 6. Graphs of dependences of reactions of supports when changing the length of screw rotor, diameter of rotor, and depth of rotor immersion into a developed load

Полученная система уравнений (16) являет собой наиболее полное функционально обозначенное отображение действующих на шнек внешних воздействий [21].

Следовательно, в настоящих исследованиях выведены полные уравнения для вычисления нагрузений на опоры, которые позволяют математически вычислить самые рациональные и адекватные размеры шнеков [22]. После изучения графиков, полученных при помощи вышеуказанных систем уравнений, выявлено, что оптимальные размеры шнека находятся в пределах: от 3 до 5 м, а диаметральный размер шнека – от 1,6 до 2 м. Следует отметить, что в существующих роторно-винтовых машинах применяются движители-роторы около 4 м, но последнее время их стали делить на два ротора длиной 2-2,5 м.

Квазистатическая неуравновешенность, при которой дисбалансы опор длинных винтовых роторов лежат в одной плоскости

Суммарный момент неуравновешенности перпендикулярен главной плоскости, в которой находится вектор $\bar{D}_{MA,B}$ и его модуль (17):

$$D_{cm} = \sqrt{D_A^2 + D_B^2 + 2D_A D_B \cos \alpha} = D_A \sqrt{1 + x_2^2 + 2x_2 \cos \alpha}; \quad (17)$$

Принимая сокращения в целях повышения удобства решения уравнения (18):

$$x_1 = \left| \frac{L_A}{L_B} \right|; x_2 = \left| \frac{D_B}{D_A} \right|; \quad (18)$$

Вычисляется суммарный момент (19):

$$\begin{aligned} D_M &= \sqrt{\left(D_A \cdot \frac{L_A}{L} \right)^2 + \left(D_B \cdot \frac{L_B}{L} \right)^2 - 2D_A D_B \cdot \frac{L_A \cdot L_B}{L^2} \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{D_A}{1 + x_1} \sqrt{x_1^2 x_2^2 + 1 - 3x_1 x_2 \cos \alpha} \end{aligned} \quad (19)$$

Отношение момента неуравновешенности и суммарного момента выглядит следующим образом (20):

$$\frac{D_{cm}}{D_M} = (1 + x_1) \sqrt{\frac{1 + x_2^2 + 2x_2 \cos \alpha}{1 + x_1^2 x_2^2 - 2x_1 x_2 \cos \alpha}}, \quad (20)$$

причем: $\alpha = \alpha_B - \alpha_A$ – угол между моментами неуравновешенностей \bar{D}_A и \bar{D}_B .

Полученные расчетные формулы будут справедливы при квазистатической неуравновешенности [23] – данная ситуация возникает, если пересечение оси вращения шнека и его центральной оси происходит не в центре.

Изменение положения центра неуравновешенности

Может произойти ситуация, когда балансировка при уменьшении суммарного вектора неуравновешенности происходит не по центру масс [24], а в отличной точке S на оси Z_p , при этом вычисляются размеры расстояний l_{AS} и l_{BS} , величина D_M изменяется по определенному алгоритму $x_3 = \left| \frac{l_{BS}}{l_{AS}} \right|$. Величина x_3 находится, после приравнивания нулю первой производной выражения (19):

$$\frac{dD_M}{dx_1} = \frac{D_A}{1 + x_1} \cdot \frac{x_1 x_2^2 - x_2 \cos \alpha}{\sqrt{x_1^2 x_2^2 + 1 - 2x_1 x_2 \cos \alpha}} - \frac{D_A}{(1 + x_1)^2} \sqrt{x_1^2 x_2^2 + 1 - 2x_1 x_2 \cos \alpha} = 0. \quad (21)$$

$$\text{Получаемое значение принимает вид } x_3 = \frac{\frac{1}{1 + \cos \alpha} + x_2}{x_2 + \cos \alpha} \quad (22)$$

Когда коррекция неуравновешенности происходит в трех плоскостях (отдельно D_{cm} и D_M), при вычисленном x_3 (для D_{cm}) значения корректирующих масс определяются минимальными, если допустить (23):

$$D_A = 0, \text{ то } D_{cm} = D_B, D_M = \frac{D_B L_B}{L} = \frac{D_B x_1}{1 + x_1}. \quad (23)$$

Коллинеарность главного вектора и главного момента

Если суммарное усилие и суммарный момент образуют угол φ \overline{D}_{cm} и \overline{M}_D и он равен 0 или, 180° , эти момент \overline{M}_D и вектор \overline{D}_{cm} , коллинеарны [25], а неуравновешенности в опорах вычисляется (24):

$$\left. \begin{aligned} D_A^2 &= D_{cm}^2 \left(\frac{L_B}{L} \right)^2 + \left(\frac{M_D}{L} \right)^2 = D_{cm}^2 \left(\frac{L_B}{L_A + L_B} \right)^2 + D_M^2; \\ D_B^2 &= D_{cm}^2 \left(\frac{L_A}{L} \right)^2 + \left(\frac{M_D}{L} \right)^2 = D_{cm}^2 \left(\frac{L_A}{L_A + L_B} \right)^2 + D_M^2. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Если же $\varphi = 90^\circ$ и 270° , $\overline{M}_D \perp \overline{D}_{cm}$ т.е., появляется квазистатическая неуровновешенность, когда дисбалансы \overline{D}_A и \overline{D}_B находятся в одной плоскости $Z_p A Y_p$.

$$\left. \begin{aligned} D_A + D_{cm} \frac{L_B}{L} + \frac{M_D}{L} &= D_{cm} \frac{L_B}{L_A + L_B} + D_M; \\ D_B + D_{cm} \frac{L_A}{L} + \frac{M_D}{L} &= D_{cm} \frac{L_A}{L_A + L_B} - D_M. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Реальны два случая [26]:

$\alpha = 0$, тогда $D_{cm} = D_A(1 + x_2)$, т.е. всегда $D_{cm} > D_A$, значит:

$$D_M = D_A \frac{(1 - x_1 x_2)}{1 + x_1}, \text{ т.е., } D_M < D_A.$$

Если $x_1 = x_2 = 1$ или $x_1 = \frac{1}{x_2}$, то, так как $D_M = 0$,

$$\frac{D_{cm}}{D_M} = \frac{(1 + x_1)(1 + x_2)}{1 - x_1 x_2} = \infty. \quad (26)$$

Тогда имеет место только статический дисбаланс.

В случае: $\alpha = 180^\circ$, тогда $D_{cm} = D_A(1 - x_2)$, т.е., всегда $D_{cm} < D_A$. Если $x_2 = 1$, то $D_{cm} = 0$, появляется только моментный дисбаланс [27].

Получается $D_M = D_A \frac{1 + x_1 x_2}{1 + x_1}$, причем $D_M > D_A$.

$$\text{Когда } x_1 = x_2 = 1, \text{ то } D_M = D_A \text{ и } \frac{D_{cm}}{D_M} = \frac{(1 + x_1)(1 - x_2)}{1 - x_1 x_2} = 0 \quad (27)$$

В случае, когда $\alpha = 90^\circ$ или 270° , $\cos \alpha = 0$.

$$D_{cm} = D_A \sqrt{1 + x_2^2}; D_M = \frac{D_A}{1 + x_1} \sqrt{1 + x_1^2 x_2^2}, \text{ т.е., } D_{cm} \text{ и } D_M \neq 0.$$

$$\text{Таким образом, } \frac{D_{cm}}{D_M} = (1 + x_1) \sqrt{\frac{1 + x_2^2}{1 + x_1^2 x_2^2}} > 0 \quad (28)$$

Выполняя рабочие операции, шнек совершает сложные вращательно-поступательные перемещения. Вращаясь, шнек разрабатывает снег (если это снегоуборочное транспортно-технологическое средство), а при перемещении машины производится также и наезд на снежную кашу. Появляется неуравновешенность, которая определяется как суммарный вектор сил и суммарный момент. Но чаще колебательные перемещения происходят в нескольких плоскостях, и возникает необходимость вывода формул для двух и более плоскостей коррекции [28].

Вывод формул в случае необходимости учета нескольких плоскостей коррекции

Транспортно-технологические средства с движителями – винтовыми роторами и снегоуборочные машины работают в условиях повышенной колебательной нагрузкой. Ситуация усугубляется неоднородностью разрабатываемого материала опорной поверхности и длиной винтовых роторов. Поэтому рассматривать суммарное усилие и суммарный момент в одной плоскости чаще всего не имеет возможности. Предлагается вводить в расчетные формулы a_1 и a_2 – углы неуравновешенности \bar{D}_1 и \bar{D}_2 в середине ротора (плоскости 1 и 2), а a_A и a_B – углы неуравновешенности \bar{D}_A и \bar{D}_B по краям ротора (плоскости А и В), учитывая плечо воздействия как расстояние между плоскостями (рис. 7). Итоговые формулы выводятся для неуравновешенных элементов по осям X и Y (29):

$$\left. \begin{aligned} D_{1X} &= D_1 \cos a_1; D_{1Y} = D_1 \sin a_1; \\ D_{2X} &= D_2 \cos a_2; D_{2Y} = D_2 \sin a_2; \\ D_{AX} &= D_A \cos a_A; D_{AY} = D_A \sin a_A; \\ D_{BX} &= D_B \cos a_B; D_{BY} = D_B \sin a_B. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Расчет величины угла смещения γ производится для оси X.

Суммарные итоговые значения величин суммарных сил D_A , D_B и D_1, D_2 и суммарные уравнения моментов неуравновешенностей применительно к центрам опор А и В определяются для осей X и Y относительно плоскости, образуемой пересечением плоскостей 1 и 2 и оси ротора. Для дальнейшего расчета появляется необходимость определения углов смещения оси ротора относительно оси симметрии, в зависимости от видов нагружения [29].

На рис. 9 предоставлена расчетная схема для определения реакций опор А и В. В данной схеме уже представлены коррекционные плоскости, так как существенная длина винтового ротора при изменении угла перемещения относительно системы координат XYZ, вынуждает учитывать и угловую неуравновешенность от А к В. За начало координат принимается центр опоры А и $Z_A = 0$. Дальнейший расчет делается возможным, только если плоскости 1 слева от 2 а А слева от В. Система уравнений для расчета величин суммарных моментов относительно опор А и В (30):

$$\begin{cases} M_{AX} = D_{1X}(Z_1 - Z_A) + D_{2X}(Z_2 - Z_A) - D_{BX}(Z_B - Z_A) = 0 \\ M_{AY} = D_{1Y}(Z_1 - Z_A) + D_{2Y}(Z_2 - Z_A) - D_{BY}(Z_B - Z_A) = 0 \\ M_{BX} = D_{1X}(Z_1 - Z_B) + D_{2X}(Z_2 - Z_B) - D_{AX}(Z_A - Z_B) = 0 \\ M_{BY} = D_{1Y}(Z_1 - Z_B) + D_{2Y}(Z_2 - Z_B) - D_{BY}(Z_A - Z_B) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

Если компоненты векторов вывести через углы α (31):

$$\begin{cases} D_A \cos \alpha_A = \frac{D_1 \cos \alpha_1 (Z_1 - Z_B) + D_2 \cos \alpha_2 (Z_2 - Z_B)}{Z_B - Z_A} \\ D_A \sin \alpha_A = \frac{D_1 \sin \alpha_1 (Z_1 - Z_B) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_B)}{Z_B - Z_A} \\ D_B \cos \alpha_B = \frac{D_1 \cos \alpha_1 (Z_1 - Z_A) + D_2 \cos \alpha_2 (Z_2 - Z_A)}{Z_A - Z_B} \\ D_B \sin \alpha_B = \frac{D_1 \sin \alpha_1 (Z_1 - Z_A) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_A)}{Z_A - Z_B} \end{cases} \quad (31)$$

Значения неуравновешенностей тогда будут равны (32):

$$\begin{cases} D_A = \sqrt{(D_A \cos \alpha_A)^2 + (D_A \sin \alpha_A)^2} = \\ = \frac{\sqrt{D_1^2 (Z_1 - Z_B)^2 + D_2^2 (Z_2 - Z_B)^2 + 2D_1 D_2 (Z_1 - Z_B)(Z_2 - Z_B) \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}}{|Z_B - Z_A|} \\ D_B = \sqrt{(D_B \cos \alpha_B)^2 + (D_B \sin \alpha_B)^2} = \\ = \frac{\sqrt{D_1^2 (Z_1 - Z_A)^2 + D_2^2 (Z_2 - Z_A)^2 + 2D_1 D_2 (Z_1 - Z_A)(Z_2 - Z_A) \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}}{|Z_A - Z_B|} \end{cases} \quad (32)$$

Углы α_A и α_B неуравновешенностей \bar{D}_A и \bar{D}_B получены и отображены ниже (33):

$$\begin{cases} \tan \alpha_A = \frac{D_A \sin \alpha_A}{D_A \cos \alpha_A} = \frac{D_1 \sin \alpha_1 (Z_1 - Z_B) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_B)}{D_1 \cos \alpha_1 (Z_1 - Z_B) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_B)} \\ \tan \alpha_B = \frac{D_B \sin \alpha_B}{D_B \cos \alpha_B} = \frac{D_1 \sin \alpha_1 (Z_1 - Z_A) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_A)}{D_1 \cos \alpha_1 (Z_1 - Z_A) + D_2 \sin \alpha_2 (Z_2 - Z_A)} \end{cases} \quad (33)$$

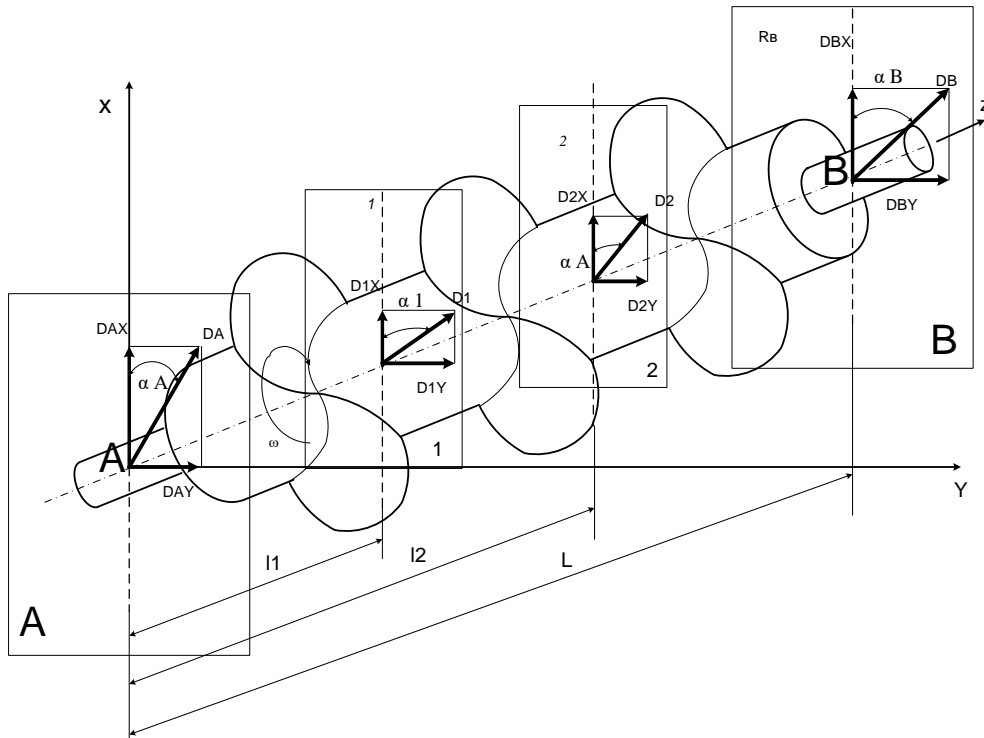


Рис. 7. Суммарные моменты винтового ротора в разных плоскостях

Fig. 7. Total torques of screw rotor in different planes

Аналогично образуются и уравнения суммарных моментов при пересечении оси ротора и плоскостей 1 и 2 (34):

$$\begin{cases} M_{1X} = D_{\phi X}(Z_A - Z_1) + D_{2X}(Z_2 - Z_1) - D_{BX}(Z_B - Z_1) = 0 \\ M_{1Y} = D_{AY}(Z_A - Z_1) + D_{2Y}(Z_2 - Z_1) - D_{BY}(Z_B - Z_1) = 0 \\ M_{2X} = D_{AX}(Z_A - Z_2) + D_{1X}(Z_1 - Z_2) - D_{BX}(Z_B - Z_2) = 0 \\ M_{2Y} = D_{AY}(Z_A - Z_2) + D_{1Y}(Z_1 - Z_2) - D_{BY}(Z_B - Z_2) = 0 \end{cases} \quad (34)$$

Находятся элементы векторов через их углы α (35):

$$\begin{cases} -D_1 \cos \alpha_1 = \frac{D_A \cos \alpha_A (Z_A - Z_2) + D_B \cos \alpha_B (Z_B - Z_2)}{Z_2 - Z_1} \\ -D_1 \sin \alpha_1 = \frac{D_A \sin \alpha_A (Z_A - Z_2) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_2)}{Z_2 - Z_1} \\ -D_2 \cos \alpha_2 = \frac{D_A \cos \alpha_A (Z_A - Z_1) + D_B \cos \alpha_B (Z_B - Z_1)}{Z_1 - Z_2} \\ -D_2 \sin \alpha_2 = \frac{D_A \sin \alpha_A (Z_A - Z_1) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_1)}{Z_1 - Z_2} \end{cases} \quad (35)$$

Таким образом, расчетные значения неуровненностей шнеков при выполнении ими рабочих операций (36):

$$\left\{ \begin{aligned} D_1 &= \sqrt{(D_1 \cos \alpha_1)^2 + (D_1 \sin \alpha_1)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{D_A^2(Z_A - Z_2)^2 + D_B^2(Z_B - Z_2)^2 + 2D_A D_B(Z_A - Z_2)(Z_B - Z_2) \cos(a_A - a_B)}}{|Z_2 - Z_1|} \\ D_2 &= \sqrt{(D_2 \cos \alpha_1)^2 + (D_2 \sin \alpha_1)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{D_A^2(Z_A - Z_1)^2 + D_B^2(Z_B - Z_1)^2 + 2D_A D_B(Z_A - Z_1)(Z_B - Z_1) \cos(a_A - a_B)}}{|Z_1 - Z_2|} \end{aligned} \right. \quad (36)$$

Углы α_1 и α_2 неуравновешенностей \bar{D}_1 и \bar{D}_2 вытекают из (33) и вычисляются (37):

$$\left\{ \begin{aligned} \tan \alpha_1 &= \frac{D_1 \sin \alpha_1}{D_A \cos \alpha_A} = \frac{D_A \sin \alpha_A (Z_A - Z_2) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_2)}{D_A \cos \alpha_A (Z_A - Z_2) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_2)} \\ \tan \alpha_2 &= \frac{D_2 \sin \alpha_2}{D_2 \cos \alpha_2} = \frac{D_A \sin \alpha_A (Z_A - Z_1) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_1)}{D_A \cos \alpha_A (Z_A - Z_1) + D_B \sin \alpha_B (Z_B - Z_1)} \end{aligned} \right. \quad (37)$$

В исследовании получены общие расчетные формулы (31)-(37), которые значительно упрощают возможности разработчиков машин, оснащенных длинными винтовыми роторами и пригодны для получения несбалансированности при любом расположении плоскостей А, В, 1 и 2 (при условии, что плоскость 1 левее плоскости 2, а плоскость А левее плоскости В), если значения Z_1, Z_2 и Z_B представлены с необходимыми знаками.

Частные случаи, когда $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_A = \alpha_B$ и имеет место статическая неуравновешенность шнека, когда углы неуравновешенностей зануляются, из уравнений (31) и (35) следует, что (38):

$$\left\{ \begin{aligned} -D_A &= \frac{D_1(Z_1 - Z_B) + D_2(Z_2 - Z_B)}{Z_B - Z_A} \\ -D_B &= \frac{D_1(Z_1 - Z_A) + D_2(Z_2 - Z_A)}{Z_A - Z_B} \\ -D_1 &= \frac{D_A(Z_A - Z_2) + D_B(Z_B - Z_2)}{Z_2 - Z_1} \\ -D_2 &= \frac{D_A(Z_A - Z_1) + D_B(Z_B - Z_1)}{Z_1 - Z_2} \end{aligned} \right. \quad (38)$$

Если $\alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_A - \alpha_B = 180^\circ$, появляется моментный дисбаланс.

Если $\alpha_1 = \alpha_A = 0$, тогда для $\alpha_2 = \alpha_B = 180^\circ$ выводится (39):

$$\left\{ \begin{aligned} -D_A &= \frac{D_1(Z_1 - Z_B) + D_2(Z_2 - Z_B)}{Z_B - Z_A} \\ -D_B &= \frac{D_1(Z_1 - Z_A) + D_2(Z_2 - Z_A)}{Z_B - Z_A} \\ -D_1 &= \frac{D_A(Z_A - Z_2) + D_B(Z_B - Z_2)}{Z_2 - Z_1} \\ -D_2 &= \frac{D_A(Z_A - Z_1) + D_B(Z_B - Z_1)}{Z_2 - Z_1} \end{aligned} \right. \quad (39)$$

Общие формулы (38) и (39) позволяют создать базу данных для вычисления общих случаев нагружения. Длинные винтовые роторы при выполнении транспортно-технологических операций могут быть спроектированы как межопорными, так и консольными. Плоскости А, В, 1 и 2 в таких случаях коренным образом меняют свое расположение [30]. Для простоты использования выведенных формул создана таблица с расчетными формулами межопорных (схема I) и консольных (схема II) винтовых роторов для нахождения неуравновешенности и расчета суммарного момента.

По схемам I и II построено подавляющее число элементов валов, поэтому основой заложено регламентированное функционирование удельного дисбаланса ротора, позволяющего подшипниковым опорам работать в оптимальных режимах.

Таблица 1.

Реакции на опорах и схемы выполнения плоскостей коррекций с разными видами неуравновешенности

Table 1.

Reactions on supports and schemes for performance of correction planes with different types of imbalance

| Схема | Вид нахождения плоскости коррекции и опор | Неуравновешенность | |
|-------|---|---|--|
| | | статическая | моментная |
| I | | $D_A = \frac{D_1(L-l_1)+D_2(L-l_2)}{L}$ $D_B = \frac{D_1(l_1)+D_2(l_2)}{L}$ $D_1 = \frac{-D_A(l_1)+D_B(L-l_1)}{l_2-l_1}$ $D_2 = \frac{-D_A(l_1)+D_B(L-l_1)}{l_2-l_1}$ | $D_A = \frac{D_1(L-l_1)-D_2(L-l_2)}{L}$ $D_B = \frac{-D_1(l_1)+D_2(l_2)}{L}$ $D_1 = \frac{D_2(l_2)+D_B(L-l_2)}{l_2-l_1}$ $D_2 = \frac{D_A(l_1)+D_B(L-l_1)}{l_2-l_1}$ |
| II | | $D_A = \frac{D_1(L-l_1)-D_2(L-l_2)}{L}$ $D_B = \frac{D_1(l_1)+D_2(l_2)}{L}$ $D_1 = \frac{-D_A(l_2)+D_B(l_2-L)}{l_2-l_1}$ $D_2 = \frac{-D_A(l_1)+D_B(L-l_1)}{l_2-l_1}$ | $D_A = \frac{D_1(L-l_1)+D_2(L-l_2)}{L}$ $D_B = \frac{D_1(l_1)+D_2(l_2)}{L}$ $D_1 = \frac{D_2(l_2)-D_A(l_2-L)}{l_2-l_1}$ $D_2 = \frac{-D_A(l_1)+D_B(L-l_1)}{l_2-l_1}$ |

В настоящем исследовании полностью решена задача получения зависимостей, позволяющих рассчитать все усилия, появляющиеся на опорах шнеков, а также в любом сечении. Данные уравнения позволяют рассчитать и выбрать вид необходимых опор для длинных винтовых роторов [31].

Полное теоретически обоснованное математическое описание расчета реакций на опорах длинного винтового ротора позволяет определить оптимальный размер длины ротора, при котором колебательные и вибрационные нагрузки минимизируются. Впервые в расчетные формулы предложено ввести формульные зависимости влияния винтовой навивки ротора и применить гауссовские коэффициенты поверхности, которые позволяют учитывать глубину погружения ротора в разрабатываемую поверхность. Анализы результатов позволя-

ют сделать вывод, что оптимальными считаются соотношения длины винтового ротора к его диаметру как 1 к 4. Предложенные в исследовании расчетные модули предлагают к применению в изысканиях практически все виды нагружения при выполнении длинным винтовым ротором технологических операций. Рассмотренные типы неуравновешенностей, включая квазистатическую, позволили определить нахождение плоскостей коррекции для назначения размеров до опорных поверхностей.

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2001 г. № 848 «О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» (с изменениями от 31 мая 2006 г., 9 июля 2007 г., 10 апреля, 20 мая 2008 г., 17 марта 2009 г., 22 апреля, 21, 22 декабря 2010 г., 18 апреля, 3 ноября, 30 декабря 2011 г.).
2. **Гордеев, Б.А.** Снижение виброперегрузок, возбуждаемых вращающимися валами в переходных режимах / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, А.Е. Шохин // Вестник машиностроения. 2018. №2. С 9-15.
3. **Kuklina, I.G.** La Dinamica de terreno Maquinas / I.G. Kuklina // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – Vienna, Austria, 2014. – pp. 48-51.
4. ГОСТ Р 51709-2001 Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки.
5. MSC. NASTRAN Advanced Dynamic Analysis, MSC Corp., 2004, 303 p.
6. **Александров, А.М.** Динамика роторов / А.М. Александров, В.В. Филиппов. – М.: Издательство МЭИ, 1995. - 132 с.
7. **Жидков, С.А.** Разработка метода исследования динамики роторов в подшипниках скольжения на основе теории мощностных графов связей: Дис... канд. техн. наук: 01.02.06. / Жидков Сергей Анатольевич. - Орел, 2003. – 180 с.
8. **Gordeev, B.A.** Reducing transient vibrations due to rotating shafts / B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov // Russian Engineering Research, 2018. – Vol. 38. № 5 – P. 335-342.
9. **Кельзон, А. С.** Расчет и конструирование роторных машин / А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.В. Январев. - Л., Машиностроение, 1977. - 288 с.
10. **Куклина, И.Г.** Решение проблем расчета и проектирования машин с длинными роторами: коллективная научная монография / И.Г. Куклина. – Новосибирск: Изд. Сибирская ассоциация консультантов, 2012. – 168 с.
11. **Гордеев, Б.А.** Влияние эффекта Доплера на погрешность измерения вибрации электромеханических комплексов волновыми методами / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. №2. С. 56-61.
12. **Ильин, М.М.** Теория колебаний / М.М. Ильин, К.С. Колесников, Ю.С. Саратов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 272 с.
13. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1970. – 720 с.
14. **Крылов, А.Н.** Избранные труды / А.Н. Крылов. - Л.: Академия наук СССР, 1958. – 803 с.
15. **Кельзон, А.С.** Управление колебаниями роторов / А.С. Кельзон, Л.М. Малинин. – СПб.: Политехника, 1992. – 118 с.
16. **Vukob, V.G.** Dynamics of statically unbalanced rotor with eccentric automatic ball balancer / V.G. Vukob, A.S. Kovachev // Book of Abstracts of Eighth International Symposium on Classical and Celestial Mechanics. 2013. – 18 p.
17. **Быков, В.Г.** Динамика ротора с эксцентрическим шаровым автобалансирующим устройством / В.Г. Быков, А.С. Ковачев // Вестник Санкт-Петербургского университета, Серия 1: Математика, Механика, Астрономия. 2014. № 4. С. 579-588.
18. **Гробов, В.А.** Поперечные колебания ротора с распределенной по длине массой при переменной скорости вращения / В.А. Гробов // Известия Академии наук Латвийской ССР. 1955. №5.
19. **Гусаров, А.А.** Балансировка роторов машин / А.А. Гусаров. – М., 2004. – 267 с.
20. **Huang, W.Y.** The application of ball-type balancers for radial vibration reduction of high speed optic drives / W.Y. Huang, C.P. Chao // Journal of Sound and Vibration. 2002. No. 250(3). P. 415-430.

21. **Куклина, И.Г.** Вибронагруженность длинных винтовых роторов / И.Г. Куклина. – Saarbrücken: Издательство LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 137 с.
22. **Пасынкова, И.А.** Динамика прецессионного движения неуравновешенного ротора / И.А. Пасынкова. – СПб: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2014. – 238 с.
23. **Yamamoto, T.** Linear and Nonlinear Rotordynamics: A Modern Treatment with Applications / T. Yamamoto, Y. Ishida. – Wiley: Interscience. 2001. – 348 p.
24. **Фролов, К.В.** Вибрация – друг или враг? / К.В. Фролов. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
25. **Kuklina, I.G.** Application of unified modeling language for solving engineering / I.G. Kuklina // Materials of the international scientific practical conference, Taraz, may 30-31, 2013 / Development of applied mathematics. – Taraz, Kazakhstan, 2013. – P. 84-94.
26. **Kim, G.** Nonlinear analysis of automotive hydraulic engine mount. ASME / G. Kim, R. Sigh // J. of dynamic system measurement and control 115, 1996.
27. **Тондл, А.** Автоколебания механических систем / А. Тондл. – М. Мир, 1979. – 429 с.
28. **Тимошенко, С.П.** Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. - М.: Наука, 1967. – 444 с.
29. Структурное моделирование сложных динамических систем. / Баранов Г.Л. [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1986. – 272 с.
30. **Куклина, И.Г.** Определение дисбаланса жестких роторов дорожных машин акустическими методами / И.Г. Куклина, Б.А. Гордеев // Строительные и дорожные машины. 2010. №2. С. 32-36.
31. **Куклина, И.Г.** Математическая модель вертикальных перемещений плужного отвала / И.Г. Куклина, М.В. Жук, И.А. Тютнев // Строительные и дорожные машины. 2011. №11. С. 54-55.

*Дата поступления
в редакцию: 15.01.2021*

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОДВИЖНОСТИ
ПО МОБИЛЬНОСТИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ,
ОСНОВАННОЙ НА ПРИМЕНЕНИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Л.Н. Мазунова

ORCID: 0000-0003-3262-8348 e-mail: matematixx@mail.ru

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

М.А. Дубкова

ORCID: 0000-0003-3502-817X e-mail: du.mari1999@gmail.ru

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

В.В. Беляков

ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: nauka@nntu.ru

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

М.Е. Бушуева

ORCID: 0000-0002-0071-2417 e-mail: bme@nntu.ru

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

В.С. Макаров

ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: makvl2010@gmail.com

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

Л.Н. Ерофеева

ORCID: 0000-0001-6535-1459 e-mail: erofeevaln@mail.ru

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

Проведена оценка подвижности легковых автомобилей различных классов на основании технических характеристик, заявленных производителями. Подвижность определяется как обобщенная характеристика конструктивных и эксплуатационных свойств транспортных средств. В совокупности с экономическими, эстетическими и экологическими требованиями к качеству машин, подвижность детерминирует конкурентоспособность транспортных средств как товара. В основе методики лежит метод многокритериальной оптимизации, где в качестве эмпирических критериев рассматриваются технические характеристики автомобилей, влияющие на мощность, динамичность, маневренность, проходимость. В условиях недостаточной информации о мере влияния на подвижность тех или иных параметров машины выбор весовых коэффициентов основывался на критерии Лапласа. Проведены расчеты показателя качества для 17 автомобилей. Предложенная методика дает хорошее приближение вычисленных интегральных оценок к экспертным. Полученные результаты могут быть использованы для эффективного проектирования, эксплуатации и маркетинга транспортных средств.

Ключевые слова: конкурентоспособность, подвижность по мобильности, подвижность по живучести, оценка качества ТС, показатель подвижности, многокритериальная оптимизация, векторный критерий, критерий Лапласа, нормировка критерия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазунова, Л.Н. Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова, В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.С. Макаров, Л.Н. Ерофеева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 102-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_102

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING
THE MOBILITY INDEX ON MOBILITY OF PASSENGER CARS
BASED ON APPLICATION OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION**

L.N. Mazunova

ORCID: **0000-0003-3262-8348** e-mail: **matematixx@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Dubkova

ORCID: **0000-0003-3502-817X** e-mail: **du.mari1999@gmail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Belyakov

ORCID: **0000-0003-0203-9403** e-mail: **nauka@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.E. Bushueva

ORCID: **0000-0002-0071-2417** e-mail: **bme@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.S. Makarov

ORCID: **0000-0002-4423-5042** e-mail: **makvl2010@gmail.com**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

L.N. Erofeeva

ORCID: **0000-0001-6535-1459** e-mail: **erofeevaln@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Assessment of mobility of passenger cars of various classes on the basis of technical characteristics declared by manufacturers was carried out. Mobility is defined as a generalized characteristic of structural and operational properties of vehicles. Together with economic, aesthetic and environmental requirements for the quality of vehicles, the mobility determines the competitiveness of vehicles as a commodity. Methodology is based on a multi-criteria optimization method where technical characteristics of vehicles that affect power, dynamism, maneuverability, and cross-country ability, are considered as empirical criteria. In conditions of insufficient information about a degree of influence on mobility of certain parameters of the vehicle, selection of weight coefficients was based on the Laplace criterion. Calculations of quality indicators for 17 vehicles were carried out. The proposed method gives a good approximation of calculated integral estimates to expert estimates. Results obtained can be used for effective designing, operation and marketing of vehicles.

Key words: competitiveness, movability, mobility, survivability, vehicle quality assessment, mobility index, multi-criteria optimization, vector criterion, Laplace criterion, benchmark rationing.

FOR CITATION: L.N. Mazunova, M.A. Dubkova, V.V. Belyakov, M.E. Bushueva, V.S. Makarov, L.N. Erofeeva. Development of a method for calculating the mobility index on mobility of passenger cars based on application of multi-criteria optimization. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 102-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_102

Введение

Сложность конструкции современных автомобилей, разнообразие их эксплуатационных и потребительских свойств, различная приспособленность к режимам эксплуатации значительно усложняют задачу оценки качества автомобиля одним обобщающим показателем, благодаря которому возможно отдать предпочтение той или иной транспортной единице. Среди огромного количества предложений со стороны автопроизводителей выбор автомобиля может основываться на его всесторонней оценке, позволяющей максимально эффективно эксплуатировать машину в дальнейшем.

Анализ существующих методик оценки качества автомобилей

Существует ряд методик оценки качества автомобилей. Например, компания «*Strategic Vision*» [1,2], специализирующаяся на изучении поведения покупателей и факторах их лояльности, с 1995 г. проводит собственное исследование «качества удовлетворенности» новыми автомобилями. В основе методики – результаты опроса почти 50 000 владельцев, которые приобрели машины в течение первых трех месяцев текущего года. На основе оценок покупателей по объемному списку критериев, затрагивающих не только характеристики и качество моделей, но и удовлетворенность ожиданий клиента, формируется показатель качества (*Total Quality Index*). С 1968 г. частная американская маркетингово-информационная компания «*J.D. Power*» [3] самостоятельно проводит исследования по оценке удовлетворенности потребителей, в том числе, в сфере автомобильной промышленности. Оценка качества проводится по следующему алгоритму: учитывается число проблем, возникшее среди 100 единиц трехлетних автомобилей за последний год у первого владельца (*PP100 – Problems per 100 Vehicle*) *Initial Quality Study*.

Методика Нова-Си (*NOVA-C*) [4] – аудит нового автомобиля с точки зрения потребителя. Данная форма проверки включает в себя оценку новых автомобилей на стадии сдачи в сбытовые подразделения, сравнительные тесты с автомобилями других марок. Анализ каждого образца осуществляется на результатах контроля качества изделия на стадии производства, результатов дорожных тестов, обработки информации о мнении потребителей по результатам анкетирования. Аудит *NOVA-C* направлен на оценку конкурентоспособности автомобилей. Он позволяет определить позицию продукции как в данном сегменте машин, так и на рынке в целом. Здесь учитываются дизайн, конструкция, ходовые качества и т.д.

Разработанные теории и методики не охватывают всех существующих проблем данной области знаний. Исследования большей частью посвящены методам оценки по экономическим показателям, которые зачастую не учитывают особенности конструкции и оценивают транспортное средство по ликвидности производства автотранспортного средства. Иногда рассматривается интегральный показатель проходимости, но не учитывается экономическая составляющая процесса эксплуатации и производства, мало изучено экологическое воздействие автотранспортных средств на окружающую среду. Существуют работы в области взаимодействия движителя с опорным основанием. По некоторым эксплуатационным и нормативно-техническим показателям имеются лишь отдельные критерии.

Математическая модель оценки качества автомобилей

Любое транспортное средство можно описать различными свойствами, классифицируемыми по нескольким категориям. Инженер рассматривает транспортное средство как не-

кую конструкцию с характерными для нее свойствами. Экономист обращает внимание на различные показатели эффективности и производительности, а простой обыватель в значительной мере осуществляет свой выбор по субъективным характеристикам: стоимости, эстетичности, престижности. В совокупности все эти требования можно назвать конкурентоспособностью товара, т.е., уровнем его экономических, технических и эксплуатационных параметров, который позволяет выдержать конкуренцию с аналогами на рынке. Конкурентоспособность – интегральный показатель, который обусловлен двумя комплексными составляющими: качеством и ценой товара. В связи с этим, методология оценки эффективности эксплуатации автомобилей должна опираться не только на критерии экономической эффективности, включающие в себя производительность и энергоэффективность, но и на критерии технической и экологической эффективности, а также эстетические требования (рис. 1).



Рис. 1. Требования, формирующие оценку качества ТС

Fig. 1. Requirements that form the vehicle quality assessment

Важнейшим свойством, характеризующим транспортные средства (ТС), является подвижность, концепция которой фундаментально изложена в [5-11]. Подвижность определяется как интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самой машины, т.е., возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи. Это множество свойств, которое определяется требованиями практически всех групп.

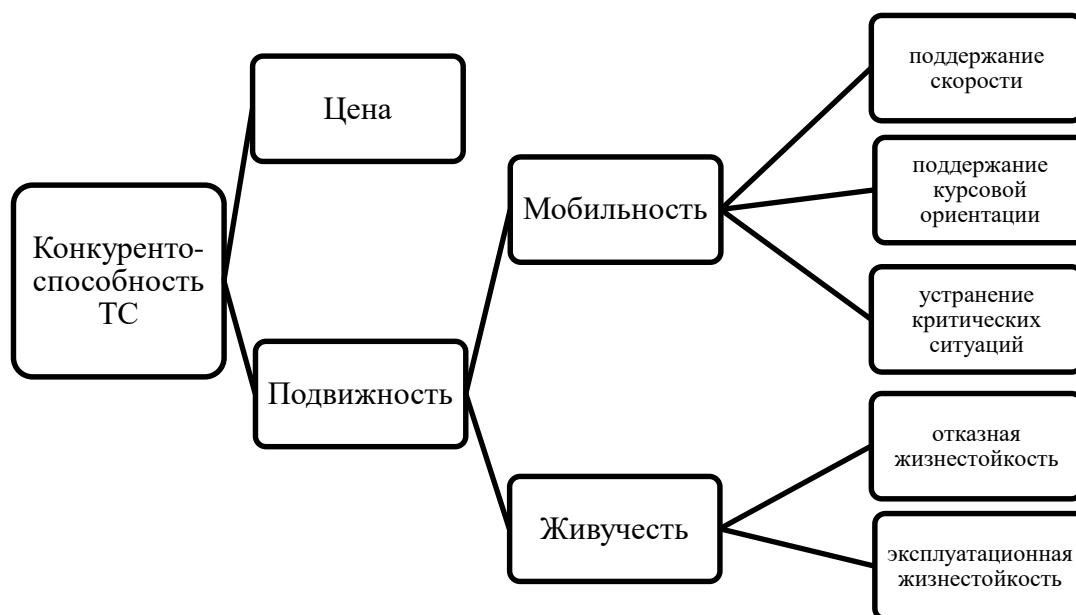


Рис. 2. Иерархия комплексного свойства конкурентоспособности ТС

Fig. 2. Hierarchy of complex property of vehicle competitiveness

Таким образом, разработку методики интегральной оценки эффективности эксплуатации автомобилей фактически можно свести к методике оценки их подвижности. Подвижность (П) машины можно рассматривать как обобщенную функцию эксплуатационной и конструкционной подвижностей: $P = f(\text{ЭП}; \text{КП})$. Возможность выполнения поставленной задачи по условиям эксплуатации (характеристики местности и режимы нагружения машины) относят к эксплуатационной подвижности (ЭП). Технические характеристики машины, которые в ходе эксплуатации могут существенно изменяться и приводить как к частичной потере подвижности, так и к ее полной потере, относят к конструкционной подвижности (КП). С другой стороны, подвижность включает подвижность по мобильности (способности к движению в каких-либо условиях) и подвижность по живучести (обеспечение работоспособности в условиях износа и функционирования в различных природно-климатических условиях и сферах деятельности) (рис. 2). Для обеспечения подвижности по мобильности требуется обеспечить поддержание скорости движения, курсовой ориентации и устранение критических ситуаций. Оценка мобильности выполняется по нескольким критериям. Во-первых, по запасу тягового усилия (1):

$$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \Delta P_{\varphi} > 0, \quad (1)$$

во-вторых, по балансу мощности (2):

$$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \geq [W_f(\Phi_{\varphi}, \lambda) + \Delta W(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda)], \quad (2)$$

в-третьих, по курсовой ориентации (управляемости и маневренности) (3):

$$\Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \lambda \equiv \xi(\lambda_{\kappa}, \lambda_{\gamma}, \lambda_p). \quad (3)$$

Подвижность по живучести определяется следующими условиями (4)-(5):

$$R_{on}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } R_{on}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \geq R_{\eta}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t), \quad (4)$$

$$\Phi_{\varphi} \text{ при } R_{en}(\Phi_{ue}, \lambda, t) \geq R_{\gamma}(\Phi_{ue}, \lambda, t). \quad (5)$$

Критерии построены в зависимости от параметров взаимодействия движителя с полотном пути Φ_{φ} , Φ_f и с учетом других характеристик $\lambda \equiv \xi(\lambda_{\kappa}, \lambda_{\gamma}, \lambda_p)$, где λ_{κ} – параметры машины, включая параметры движителя; λ_{γ} – характеристики эксплуатационных условий, включая свойства и параметры полотна пути; λ_p – параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые. Здесь ΔP_{φ} – запас силы тяги, W_{φ} – мощность, реализуемая движителем по сцеплению, $\Delta W = W_{\text{эв}} - W_f$ – запас мощности по двигателю, $W_{\text{эв}}$ – мощность энергетической установки, W_f – мощность сопротивлений, Φ_R – обобщенная функция радиуса кривизны траектории движения, R_{on} – вероятность безотказной работы, R_{η} – предельная вероятность безотказной работы техники в оптимальных (заданных для расчета) условиях работы и технологии изготовления машины; R_{en} – вероятность работоспособности в послеаварийном или пораженном состоянии, Φ_{ue} – обобщенная функция интенсивности аварийного или поражающего воздействия, R_{γ} предельная вероятность работоспособности техники после заданной (в расчетах) интенсивности аварийного или поражающего воздействия, t – время работы или воздействия в соответствии с рассматриваемым типом надежности.

Представленную систему критериев (2)-(5) с ограничивающими условиями можно свести к более обоснованной системе целевых функций (6):

$$\Phi_{\varphi}(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \Phi_f(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \rho(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \rho(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, R(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}. \quad (6)$$

Здесь Φ_{φ} – обобщенная функция сцепления движителя машины с материалом опорного основания; Φ_f – обобщенная функция сопротивления движению машины; v – скорость

движения машины; $\rho = R_{\Pi}/B$ – относительный радиус поворота, где B – колея машины; R – вероятность безотказной работоспособности машины как функция $R(R_{OH}; R_{ЭН})$ отказной и эксплуатационной надежности; λ – конструкционные (λ_K), эксплуатационные ($\lambda_Э$) и режимные (λ_P) параметры и характеристики машины и процесса ее движения.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации (6) используется метод свертывания векторного критерия с учетом относительной важности частных критериев оптимальности. Применительно к оценке подвижности метод подробно описан в [12-15]. Это достигается путем построения скалярной функции F , являющейся обобщенным критерием оптимальности. Рассмотрим аддитивную функцию (7):

$$F(w, \tilde{Q}) = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{Q}_i, \quad (7)$$

где $\tilde{Q} = \{\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, \dots, \tilde{Q}_n\}$ – вектор частных критериев, $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Предварительно частные критерии нормализуются, т.е. приводятся к единому безразмерному виду. Приведение критериев к шкале $[\alpha, \beta]$ возможно при помощи положительных линейных преобразований. Для критериев, которые максимизируются, преобразование имеет вид (8):

$$\tilde{Q}_i = \frac{Q_i - Q_i^-}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha \quad (8)$$

и для критериев, которые минимизируются (9):

$$\tilde{Q}_i = \frac{Q_i^+ - Q_i}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (9)$$

при этом $R_i = Q_i^+ - Q_i^-$ – размах критерия Q_i , $i = \overline{1, n}$. В рассматриваемом ниже примере критерии приводятся к шкале $[0, 1]$.

С точки зрения подвижности, наиболее конкурентоспособной будет та машина, у которой оценка (7) наибольшая. На данном этапе исследования нет достаточной информации о том, в какой мере влияют на подвижность те или иные параметры машины. В теории принятия решений в условиях полной неопределенности существует критерий Лапласа, который основан на принципе недостаточного обоснования и согласно которому все состояния системы являются равновероятными. В связи с этим, не нарушая общности рассуждений, прием значения всех весовых коэффициентов $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ равными единице, поскольку нет оснований утверждать, что они различны.

Расчет качества автомобилей

В данной работе проводилась оценка подвижности легковых автомобилей различных классов. В качестве эмпирических критериев рассматривались технические характеристики автомобилей, влияющих на мощность, динамичность, маневренность, проходимость. Вектор \bar{Q} , включает в себя следующие компоненты: Q_1 – максимальный крутящий момент (Н·м), Q_2 – объем двигателя (см³), Q_3 – мощность (л.с.), Q_4 – расход топлива в городском цикле (л на 100 км), Q_5 – время разгона до 100 км/ч (с), Q_6 – максимальная скорость (км/ч), Q_7 – радиус разворота (м), Q_8 – клиренс (мм), Q_9 – объем багажника (л). При этом для достижения оптимального значения векторного критерия (7) частные критерии $Q_1 - Q_3, Q_6, Q_8, Q_9$ должны принимать максимальные значения, а Q_4, Q_5, Q_7 – минимальные, т.е., они должны нормироваться соответствующим образом.

Таблица 1.

Фрагмент таблицы с исходными характеристиками

Table 1.

Fragment of table with original characteristics

| Модель автомобиля | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | Q9 |
|---|-----|------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|
| Volkswagen Polo 1.6 MPI AT Exclusive 2020 | 155 | 1598 | 110 | 8,7 | 11,8 | 190 | 5,2 | 170 | 530 |
| Lada Vesta 1.6 CVT Exclusive 2019 | 152 | 1598 | 113 | 9,6 | 12,2 | 170 | 5,2 | 178 | 480 |
| Hyundai Solaris 1.6 AT Elegance 2020 | 155 | 1591 | 123 | 8,9 | 11,2 | 192 | 5,2 | 160 | 480 |
| Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate 2020 | 250 | 1498 | 150 | 9,8 | 11,4 | 195 | 5,3 | 183 | 310 |
| Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+ 2019 | 200 | 1997 | 144 | 9,6 | 10,5 | 182 | 5,5 | 200 | 430 |
| Toyota RAV4 Престиж 2,0 CVT 4WD M20A-FKS 2020 | 206 | 1986 | 149 | 8,2 | 11 | 190 | 5,5 | 195 | 580 |
| Kia Sportage Luxe+ 2,0 6AT 4WD, G4NA-5R | 192 | 1999 | 150 | 10,9 | 11,6 | 180 | 5,3 | 182 | 491 |
| Audi Q7 3.0 55 TFSI quattro 2015 | 440 | 2995 | 333 | 9,4 | 6,1 | 250 | 6,2 | 235 | 890 |
| BMW X5 XDRIVE40D 2015 | 630 | 2993 | 313 | 7,1 | 5,9 | 236 | 6,35 | 209 | 650 |
| MERCEDES-BENZ GLE 350D 4MATIC 2015 | 620 | 2987 | 249 | 7,3 | 7,1 | 225 | 5,9 | 202 | 690 |
| RANGE ROVER SPORT SDV8 2015 | 740 | 4367 | 339 | 11,5 | 6,9 | 210 | 6,05 | 213 | 784 |
| VOLVO XC90 D5 AWD INSCRIPTION 2015 | 350 | 1969 | 249 | 10,2 | 8,2 | 210 | 5,45 | 237 | 721 |
| Kia Ceed 1.4T DCT Premium+ (08.2018 - 02.2020) | 242 | 1353 | 140 | 7,7 | 9,2 | 205 | 5,3 | 150 | 395 |
| Mazda 3 2.0 Skyactiv-G 6AT Active | 213 | 1997 | 150 | 9,1 | 9,3 | 213 | 5,8 | 135 | 295 |
| Chery Tiggo 8 | 250 | 1971 | 170 | 11,5 | 10 | 200 | - | 190 | 408 |
| GAC GS5 | 235 | 1495 | 137 | 8,5 | 12,8 | 180 | - | 180 | 364 |
| Skoda Karoq | 250 | 1395 | 150 | 8,3 | 9,2 | 199 | - | 163 | 404 |

В табл. 1 представлены характеристики моделей, принимавших участие в сравнительных тестдрайвах. Для Skoda Karoq, Chery Tiggo 8, GAC GS5 не представлены радиусы разворота, а величина объема багажника получена по результатам замеров [16], поэтому целесообразно сравнивать их только между собой.

Таблица 2.

Фрагмент таблицы с нормированными критериями и обобщенным векторным критерием

Table 2.

Fragment of table with original characteristics with normalized criteria and generalized vector criterion

| Модель автомобиля | \bar{Q}_1 | \bar{Q}_2 | \bar{Q}_3 | \bar{Q}_4 | \bar{Q}_5 | \bar{Q}_6 | \bar{Q}_7 | \bar{Q}_8 | \bar{Q}_9 | F |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Volkswagen Polo 1.6 MPI AT Exclusive 2020 | 0,03 | 0,10 | 0,08 | 0,76 | 0,14 | 0,25 | 1,00 | 0,37 | 0,39 | 3,14 |
| Lada Vesta 1.6 CVT Exclusive 2019 | 0,03 | 0,10 | 0,09 | 0,63 | 0,09 | 0,00 | 1,00 | 0,45 | 0,31 | 2,70 |
| Hyundai Solaris 1.6 AT Elegance 2020 | 0,03 | 0,10 | 0,13 | 0,74 | 0,23 | 0,28 | 1,00 | 0,28 | 0,31 | 3,10 |
| Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate 2020 | 0,19 | 0,07 | 0,24 | 0,60 | 0,20 | 0,31 | 0,92 | 0,50 | 0,03 | 3,06 |
| Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+ 2019 | 0,11 | 0,23 | 0,22 | 0,63 | 0,33 | 0,15 | 0,75 | 0,65 | 0,23 | 3,30 |
| Toyota RAV4 Престиж 2,0 CVT 4WD M20A-FKS 2020 | 0,12 | 0,23 | 0,24 | 0,84 | 0,26 | 0,25 | 0,75 | 0,61 | 0,48 | 3,77 |
| Kia Sportage Luxe+ 2,0 6AT 4WD, G4NA-5R | 0,09 | 0,23 | 0,24 | 0,44 | 0,17 | 0,13 | 0,92 | 0,49 | 0,33 | 3,04 |

Продолжение табл. 2.

| Модель автомобиля | \bar{Q}_1 | \bar{Q}_2 | \bar{Q}_3 | \bar{Q}_4 | \bar{Q}_5 | \bar{Q}_6 | \bar{Q}_7 | \bar{Q}_8 | \bar{Q}_9 | F |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Audi Q7 3.0 55 TFSI quattro 2015 | 0,50 | 0,55 | 0,98 | 0,66 | 0,97 | 1,00 | 0,17 | 0,98 | 1,00 | 6,82 |
| BMW X5 XDRIVE40D 2015 | 0,82 | 0,55 | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 0,83 | 0,04 | 0,74 | 0,60 | 6,47 |
| MERCEDES-BENZ GLE 350D 4MATIC 2015 | 0,80 | 0,55 | 0,64 | 0,97 | 0,83 | 0,69 | 0,42 | 0,67 | 0,66 | 6,23 |
| RANGE ROVER SPORT SDV8 2015 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,35 | 0,86 | 0,50 | 0,29 | 0,78 | 0,82 | 6,60 |
| VOLVO XC90 D5 AWD INSCRIPTION 2015 | 0,36 | 0,22 | 0,64 | 0,54 | 0,67 | 0,50 | 0,79 | 1,00 | 0,72 | 5,43 |
| Kia Ceed 1.4T DCT Premium+ (08.2018 - 02.2020) | 0,18 | 0,02 | 0,20 | 0,91 | 0,52 | 0,44 | 0,92 | 0,19 | 0,17 | 3,54 |
| Mazda 3 2.0 Skyactiv-G 6AT Active | 0,13 | 0,23 | 0,24 | 0,71 | 0,51 | 0,54 | 0,50 | 0,05 | 0,00 | 2,90 |
| Chery Tiggo 8 | 0,19 | 0,22 | 0,32 | 0,35 | 0,41 | 0,38 | - | 0,56 | 0,19 | 2,62 |
| GAC GS5 | 0,17 | 0,07 | 0,19 | 0,79 | 0,00 | 0,13 | - | 0,47 | 0,12 | 1,92 |
| Skoda Karoq | 0,19 | 0,04 | 0,24 | 0,82 | 0,52 | 0,36 | - | 0,31 | 0,18 | 2,67 |

Таким образом, с целью оценки подвижности нескольких образцов автомобильной техники для всех рассматриваемых случаев выбрано одинаковое количество и тип оценочных параметров. Образец автотехники, для которого значение функции F наибольшее, будет обладателем наилучшего показателя подвижности среди рассматриваемых машин (рис. 3).

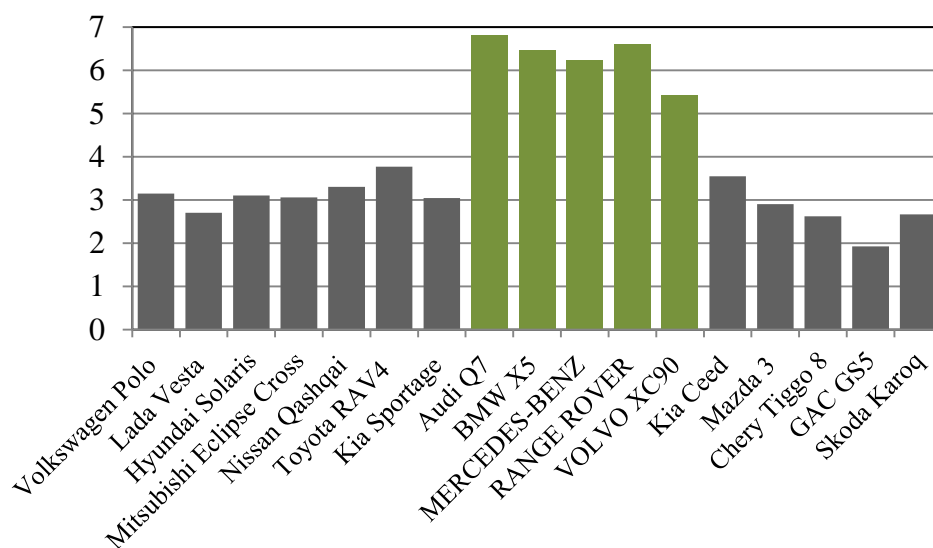


Рис. 3. Распределение легковых автомобилей по показателю качества F

Fig. 3. Distribution of passenger cars as per quality indicator F

Сравнение расчетного показателя качества с экспертными оценками

Интерес представляют те образцы, которые уже подвергались экспертному сравнению. Например, в 2018 г. в журнале «Колеса» [17] приводился сравнительный тест двух компактных кроссоверов. В очном соперничестве участвовали два очень непохожих автомобиля в топовой комплектации – *Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate* и *Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+*. По итогам сравнительных тестов и мнения опрошенных лучшим был признан автомобиль *Nissan Qashqai*. В приведенных расчетах показатель подвижности у автомобиля *Nissan Qashqai* также получился выше, чем у *Mitsubishi Eclipse Cross* (рис. 4а). В том же журнале сравнивались базовые модификации *Toyota RAV4* и *Kia Sportage* [18].

Предпочтения экспертов были отданы автомобилю *Toyota RAV4*, что соответствует расчетным значениям, полученным в работе: вычисленный показатель подвижности для этого а/м заметно превышает показатель машины-конкурента (рис.4 б). В сравнении близких по техническим характеристикам и цене *Mazda 3* в средней комплектации *Active* и топового *Kia Ceed*, голоса экспертов в своем большинстве отданы *Kia Ceed*, что также подтверждается вычисленными показателями подвижности (рис. 4 в). В рейтинге, составленном журналом «За рулем» [19] расположились два китайских паркетника и популярный европейский кроссовер в следующем порядке *Skoda Karoq*, *Chery Tiggo 8*, *GAC GS5*. А по данным табл. 2 их показатели подвижности равны соответственно 2,67, 2,62, 1,92, что опять же свидетельствует об адекватности построенной оценки (рис. 4г).

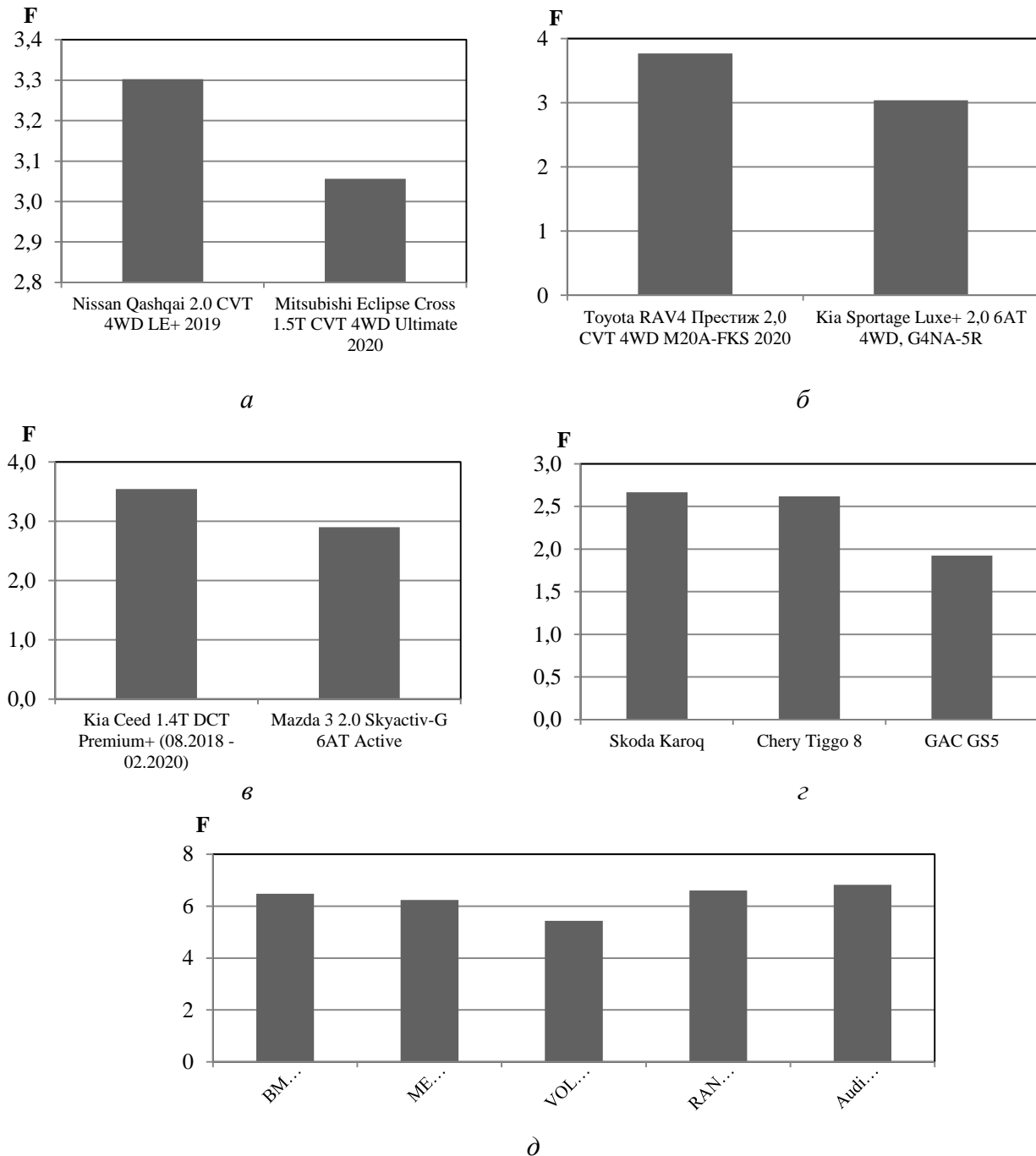


Рис. 4. Сравнение вычисленных показателей качества и экспертных оценок

Fig. 4. Comparison of calculated quality indicators and expert assessments

Выводы

Представленная методика может служить основой для определения показателя подвижности легковых автомобилей. Не все проведенные рейтинг-тесты совпадают с ранжированием исследуемых образцов по вычисленному показателю подвижности (рис. 4д). Это может быть связано с тем, что оценка была проведена, во-первых, по ограниченному количеству параметров, заявленных в общедоступных прайс-листах. Во-вторых, не было произведено оценивание по многим качественным характеристикам, которые не имеют количественные оценки (например, тип двигателя, тип трансмиссии, число передач). В-третьих, экспертная оценка потребителей могла быть обусловлена соотношением «цена – качество», а стоимость автомобиля в приведенном исследовании при вычислении интегрального показателя не учитывалась. Отдельно следует отметить, что не производилось оценивание по эстетическим показателям. Их оценка вызывает, пожалуй, наибольшую трудность, поскольку может быть проведена на основе вероятностных оценок по результатам опросов потребителей или экспертов, и здесь нельзя избежать субъективности оценивания.

Дальнейшее усовершенствование существующей методики оценки подвижности предполагает разработку иерархической классификации номенклатуры показателей качества, наиболее полно характеризующих изделие. В состав оценочных показателей рекомендуется ввести только наиболее весомые с точки зрения потребителя; разработать алгоритм преобразования качественных характеристик в количественные. Тем самым круг параметров, по которому будет вычисляться оценка, значительно расширится, определение значения коэффициентов весомости групп показателей возможно, например, методом анализа иерархий [20, 21].

Работа проведена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – докторов наук МД-226.2020.8.

Библиографический список

1. Авто-центр / Источник <https://www.autocentre.ua> // [Электронный ресурс]. – Режим доступа/ <https://www.autocentre.ua/ua/avtopravo/avtobiznes/vw-nazvan-samym-kachestvennym-brendom-oprosu-strategic-vision-82969.html>.
2. **Кузнецов, Д.О.** Методы оценки качества автомобилей с точки зрения потребителей / Д.О. Кузнецов // Вестник ТГУ. – Тамбов, 2009 Вып. 6 (74) С. 67-70.
3. Легковые автомобили на IronHorse / Источник: <https://auto.ironhorse.ru/> © IronHorse.ru // [Электронный ресурс]. – Режим доступа/ https://auto.ironhorse.ru/jd-power-2018-initial-quality_23353.html.
4. Информационное агентство REGNUM/ Источник: <https://regnum.ru/> // [Электронный ресурс]. – Режим доступа/ <https://regnum.ru/news/65136.html>.
5. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Е.Ю. Голышев // НГТУ, Н.Новгород, 2002 Деп. в ВИНТИ 10.01.02. №28-В 2002.
6. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е.Бушуева, Е.Ю. Голышев // Проблемы качества и эксплуатации автотракторных средств: материалы II международной научно-технической конференции (21-23 мая 2002 г.) / ПГАСА. – Пенза, 2002 Ч. 1 С. 23-31.
7. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е.Бушуева, Е.Ю. Голышев // Колесные машины: сб. тр. / МГТУ им Н.Э. Баумана. – М., 2003. С. 29-30.
8. **Беляков, В.В.** Подвижность и конкурентоспособность транспортно-технологических машин // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы / под ред. Ю.В Гуляева. – Москва – Н. Новгород: НГТУ, 2003 Т. 5 С3-25.
9. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2000 С. 339-357.

10. **Беляков, В.В.** Управление подвижностью транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2000 С. 392-396.
11. **Беляков, В.В.** Решение задачи оценки подвижности автотракторной техники с помощью многокритериальной оптимизации / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов // Информационные системы и технологии (ИСТ-2001): тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ Н. Новгород 20 апреля 2001 г. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001 С. 167-168.
12. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем: учеб. пособие / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов / НГТУ. – Н. Новгород, 2001 – 271 с.
13. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оценка подвижности автотракторной техники / В.В. Беляков // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2001: тр. международной научно-технической конференции, 27-29 июня 2001 г. / СПбГТУ. – СПб., 2001 С. 95-99.
14. **Беляков, В.В.** Четыре многокритериальных задачи для оценки подвижности автотракторной техники / В.В. Беляков, М.Е.Бушуева, В.И. Сагунов // Системы обработки информации и управления: межвуз. сб. науч. тр. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001 Вып. 8 С. 106-113.
15. **Барахтанов, Л.В.** Автоматические и интеллектуальные системы транспортных средств: учебник / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин / Н. Новгород, 2012 – 475 с.
16. Автомобильный журнал «За рулем» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.zr.ru/content/articles/926446-za-chto-platim>.
17. Автомобильный журнал «Колеса» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.kolesa.ru/test-drive/dva-i-poltora-sravnitelnyj-test-mitsubishi-eclipse-cross-i-nissan-qashqai>.
18. Автомобильный журнал «Колеса» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://yandex.ru/turbo/kolesa.ru/s/test-drive/gryaznye-bryuki-infernalnye-zvuki-sravnitelnyy-test-toyota-rav4-i-kia-sportage>.
19. Автомобильный журнал «За рулем» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.zr.ru/content/articles/926448-za-chto-platim/>
20. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
21. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию: 18.01.2021*

УДК 629.331

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

СИСТЕМА АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА СИЛОВЫХ ФАКТОРАХ В КОНТАКТЕ КОЛЕС С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С.В. Шаповалов

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

В качестве решения проблемы эффективного распределения мощности между ведущими колесами при движении по неподготовленному грунту рассматривается система управления индивидуальным приводом колес, основанная на анализе силового взаимодействия движителя и опорной поверхности. В рамках анализа существующих систем было выявлено, что все они работают в условиях дефицита информации, поскольку построены на кинематических параметрах, которые лишь косвенно характеризуют силовое взаимодействие колес с опорным основанием. Подтверждена возможность создания системы активной безопасности на основе анализа силовых факторов взаимодействия колес с опорным основанием.

Эффективность применения силовых датчиков изучена на математической модели. Проведено исследование движения колесной машины на подъем с использованием дифференциальной трансмиссии с электронной блокировкой дифференциала на силовых и кинематических датчиках. Создание системы управления позволяет реализовать максимально возможные значения коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью, тем самым повысив проходимость и безопасность движения автомобиля. С помощью системы, основанной на силовом анализе, также возможен прогноз несущей способности грунта и предотвращение потери подвижности многоосных колесных машин.

Ключевые слова: система активной безопасности, кинематические параметры, анализ силовых факторов, электронная блокировка дифференциала.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шаповалов, С.В. Система активной безопасности на силовых факторах в контакте колес с опорной поверхностью // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 113-123.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

ACTIVE SAFETY SYSTEM BASED ON POWER FACTORS IN CONTACT OF WHEELS WITH THE SUPPORT SURFACE

S.V. Shapovalov

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Bauman Moscow state technical University
Moscow, Russia

Abstract. As a solution to the problem of effective power distribution between the driving wheels when driving on unprepared soil, the control system for individual wheel drive is considered, based on analysis of force interaction of propeller and support surface. As part of the analysis of existing systems, it was revealed that all of them operate in conditions of information shortage, since they are built on kinematic parameters that only indirectly characterize the force interaction of wheels with support base. The possibility of creating an active safety system based on the analysis of force factors of interaction of wheels with the support base is confirmed. Efficiency of use of power sensors is studied on a mathematical model. Study of a wheeled vehicle movement uphill using a differential transmission with electronic differential system on power and kinematic sensors, was carried out. Creation of a control system allows us to implement the maximum possible values of coefficients of adhesion of wheels with the support surface, thereby increasing the cross-country ability and road safety of the vehicle. By means of a system based on force analysis, it is also possible to predict a bearing capacity of soil and prevent the loss of mobility of multi-axle wheeled vehicles.

Key words: active safety system, kinematic parameters, power factor analysis, electronic differential system.

FOR CITATION: Shapovalov S.V. Active safety system based on power factors in contact of wheels with the support surface. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. P. 113-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_113

Введение

Основные эксплуатационные свойства (тягово-динамические качества, проходимость, экономичность) во многом зависят от эффективности распределения мощности между ведущими колесами. Блокированные или дифференциальные трансмиссии не позволяют принудительно изменять мощность, подводимую к одним колесам, независимо от других. Поэтому в некоторых транспортных средствах используется индивидуальный привод, который позволяет регулировать подводимый крутящий момент в соответствии с условиями движения независимо от других колес. Однако для правильной работы такой трансмиссии необходима эффективная система управления. Для повышения эксплуатационных свойств колесных машин (КМ) также используются системы активной безопасности и системы регулирования динамики движения, но все они основаны на измерении параметров опорного основания по кинематическим датчикам. Этого оказывается достаточно только для эффективной работы на высоких скоростях при перемещении по дорогам общего пользования [1-3]. Движение спецтехники по неподготовленному грунту сопряжено со значительной неопределенностью свойств опорного основания под каждым колесом.

Эффективным решением для улучшения тактико-технических характеристик военных колесных машин и гражданских шасси специального назначения может быть система активной безопасности, основанная на анализе силового взаимодействия движителя и опорной поверхности. Для оценки возможности создания такой системы необходимо проанализировать существующие решения в данной области, а также изучить способы непосредственного измерения силовых факторов, действующих на колесо.

Обзор существующих систем активной безопасности и повышения проходимости

В современных автомобилях принято строить системы активной безопасности (САБ) и системы регулирования динамики движения (СРДД) [3-10] по следующим принципам: 1 – регулирование по коэффициенту относительного скольжения контакта колеса; 2 – регулирование по максимальной реализации тангенциальной силы колеса; 3 – регулирование по производной от коэффициента сцепления по коэффициенту относительного скольжения контакта колеса (градиентный метод). При этом источниками первичной информации практически всех алгоритмов являются кинематические датчики. Так построены противобуксовочная система (ПБС, *ASR – Automatic Slip Regulation*), система блокировки дифференциала (ЭБД – электронная блокировка дифференциала), антиблокировочная система (АБС), система контроля курсовой устойчивости (*ESP – Electronic Stability Program*). Все они предназначены для поддержания оптимального соотношения между коэффициентом сцепления колеса с дорогой и коэффициентом относительного скольжения контакта колеса относительно опорной поверхности. АБС предназначена для реализации максимальной величины продольной реакции опорной поверхности, а также для возможности управления движением во время торможения. Данный эффект достигается регулированием тормозного усилия на колесах по определенному алгоритму. Элементы системы АБС стали основой для создания многих других систем, в том числе, для электронных блокировок дифференциалов.

График изменения коэффициента сцепления от скольжения для связанного грунта (сухой бетон) представлен на рис. 1а. На графике заметна область значительных величин коэффициента продольной реакции, что позволяет реализовывать максимально возможные для данного грунта продольную и поперечную реакции при регулировании скольжения и его удержании в этом диапазоне. Для несвязанного грунта такая зависимость выглядит иначе (рис. 1б). Она не имеет экстремума, а монотонно растет, что не позволяет создать подобную АБС систему, эффективно работающую на несвязанных грунтах: снеге и песке.

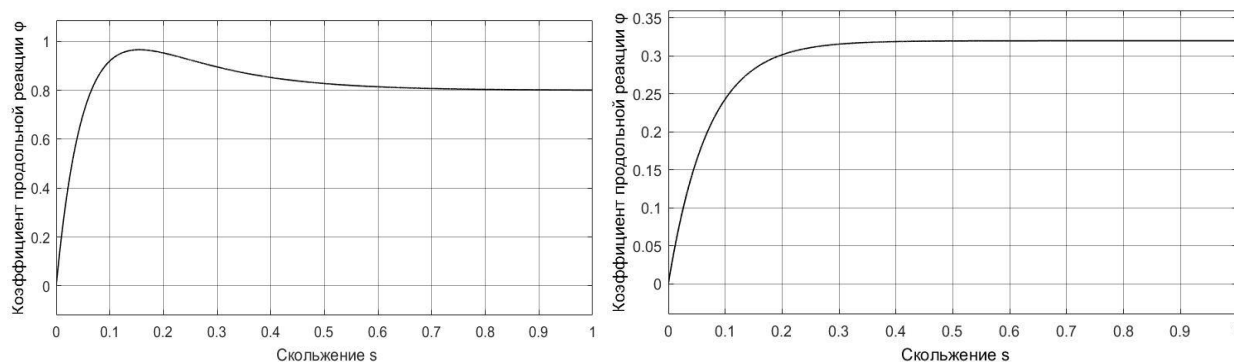


Рис. 1. Зависимость коэффициента продольной реакции
 а) от скольжения для связанного грунта; б) от скольжения для несвязанного грунта

Fig. 1. Dependence of longitudinal reaction coefficient
 a) on skidding for binder soil; b) on skidding for unbinder soil

Таким образом, АБС является необходимой для каждого автомобиля, передвигающегося по опорному основанию из связанного грунта, однако нуждается в отключении при торможении на снеге либо песке, также элементы системы могут быть использованы для более сложных дополнительных систем. Противобуксовочная система [3-5,8] предназначена для реализации максимально возможной силы тяги на опорном основании с небольшим коэффициентом продольной реакции. Принцип работы заключается в поддержании скольжения в заданном диапазоне, но, в отличие от АБС, в тяговом режиме. Зависимости коэффициента продольной реакции в тяговом и тормозном режимах практически не отличаются. Для несвязанных грунтов из анализа графика на рис. 2 имеет смысл не использовать ПБС, а подводить максимум мощности к ведущим колесам, что подтверждается на практике, но при интенсивном буксовании происходит фрезерование грунта, и КМ может потерять подвижность из-за недостатка геометрической проходимости. Наиболее сложные системы представляют собой единую структуру из АБС и ПБС. Если из алгоритма работы ПБС, использующей тормозные механизмы, исключить минимизацию скольжения колеса и минимизировать разность скоростей вращения колес, то образуется система с названием «Электронная блокировка дифференциала (ЭБД)». Примером является система, разработанная компанией «ФАГ Кюгельфишер» – «*Elrctronichen Differentialbremse*» (EDS).

Система электронного контроля устойчивости (*Electronic Stability Program*) [3-5,11, 12] срабатывает в опасных ситуациях, когда возможна или уже произошла потеря курсовой устойчивости автомобиля. Система стабилизирует движение путем затормаживания отдельных колес. Она вступает в работу, когда на большой скорости при прохождении поворота передние колеса сносит с заданной траектории в направлении действия сил инерции, т.е., по радиусу большему, чем радиус поворота. *ESP*. В этом случае притормаживает заднее колесо, идущее по внутреннему радиусу поворота, придавая автомобилю большую поворачиваемость и восстанавливая траекторию движения и положение продольной оси автомобиля. Одновременно с притормаживанием колес *ESP* снижает обороты двигателя с помощью электронно управляемой заслонки. Если при прохождении поворота происходит занос задней части автомобиля, *ESP* активизирует тормоз переднего колеса, идущего по наружному радиусу поворота. Таким образом, появляется момент от реакций опорной поверхности, исключая боковой занос. Когда скользят все четыре колеса, *ESP* самостоятельно решает, тормозные механизмы каких колес должны вступить в работу.

Элементами, сообщающими информацию о характеристиках движения колесной машины, являются датчики скорости вращения колес, ЭБУ двигателя и коробки передач, датчик положения руля и датчик линейных и угловых ускорений, который чаще всего располо-

жен в одном корпусе с контроллером *ESP*. Исполнительные механизмы аналогичны ПБС, алгоритмы работы которой предусматривают использование тормозов.

Рассматривая все указанные системы, можно сделать вывод, что они фактически не нуждаются в собственных чувствительных и исполнительных элементах и представляют собой программные надстройки на систему *ESP* или даже АБС. Последние используют информацию о движении машины от блока управления двигателем, датчика положения руля, кинематических датчиков скоростей вращения колес и модуля измерения ускорений. По известным кинематическим параметрам вращения колес производится расчет скольжения и буксования, вычисляется коэффициент сцепления, который является косвенной характеристикой сил в контакте колес с опорной поверхностью. Погрешности измерения каждого из кинематических параметров, используемых системой, негативно отражаются на расчетной величине коэффициента сцепления, характеризующего силы в контакте колес с дорогой. Действительные же реакции в пятне контакта каждого колеса для блока управления данных систем остаются неизвестными, и системы работают в условиях дефицита информации. Эта проблема может быть решена, если найти способ измерения сил, действующих на колесо.

Анализ методов повышения проходимости КМ

В настоящее время обеспечение повышенной проходимости достигается применением блокируемых межосевых и межколесных дифференциалов, дифференциалов повышенного трения, а также электронных систем, задействующих тормозные механизмы для подтормаживания буксующего колеса (ЭДС). Блокированный привод позволяет в значительной степени реализовать условия сцепления ведущих колес с опорной поверхностью, однако он отрицательно влияет на курсовую устойчивость автомобиля, затрудняет поворот (криволинейное движение), увеличивает нагруженность трансмиссии. Подтормаживание буксующего колеса часто используется в колесных машинах с дифференциальным приводом. Однако до настоящего времени нет исследования и обоснования оптимальных режимов применения данного способа и его эффективности в сравнении с блокированием межколесного дифференциала [1].

Как показывает практика, обеспечение идеального распределения мощности по колесам полноприводной машины при всех эксплуатационных условиях, благодаря совершенствованию конструкции привода, невозможно. Полноприводные конструкции с избирательно изменяющимися динамическими качествами могут быть реализованы только с помощью электронно-управляемых элементов привода [1]. Тем не менее, в основе всех систем, регулирующих распределение мощности по колесам и динамику движения автомобиля в автоматическом режиме, лежат алгоритмы, которые используют данные, получаемые с кинематических датчиков. Поэтому максимальная эффективность распределения крутящего момента в соответствии с максимальными возможностями по сцеплению каждого колеса не достигается, пробуксовка колес при использовании таких систем неизбежна. Применение системы на основе анализа силовых факторов в пятне контакта колеса с опорной поверхностью позволит значительно повысить проходимость транспортного средства.

В настоящее время существуют образцы антиблокировочных систем, использующие значения тормозных моментов на колесах вместо кинематических параметров. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в рамках работ [1-3], подтверждают не только возможность практической реализации системы активной безопасности автотранспортных средств на основе силового анализа, но и их превосходство над существующими системами благодаря обеспечению максимальной реализации коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью. Продолжают разрабатываться системы по измерению сил и моментов, действующих на колесо автомобиля. Одной из таких систем является тензоступица [12], входящая в измерительный комплекс исследования управляемости и устойчивости автомобиля. Наиболее современной конструкцией в настоящее время является

динамометрическое колесо *RoadDyn* швейцарской фирмы *Kistler* [13], которое позволяет выполнять измерения всех сил и моментов на колесе. Аналогичная система, позволяющая измерять силы и моменты, действующие на колесо, была разработана в МГТУ им. Н.Э. Баумана [14]. В основе разрабатываемой конструкции лежит шестикомпонентный датчик сил и моментов, 3D модель которого представлена на рис. 4а. Фотография колеса с тензоступицей показана на рис. 4б. Крепежные скобы 2 служат для присоединения датчика к ободу. Фланец 4 крепится к ступице колеса и передает крутящий момент. Фланцы 3 и 5 защищают чувствительный элемент датчика 1 от разрушения.

Шестикомпонентный датчик сил и моментов представляет собой два концентрических фланца (внешний и внутренний), соединенных упругим элементом, выполненным в виде равномерно расположенных по окружности датчика упругих балок. При воздействии сил и моментов на внешний фланец упругие элементы датчика деформируются, при этом их деформация регистрируется закрепленными на них двенадцатью тензорезисторами. По электрическим аналоговым сигналам, снимаемым с них, вычисляются вектора сил нагрузки и моменты сил нагрузки.

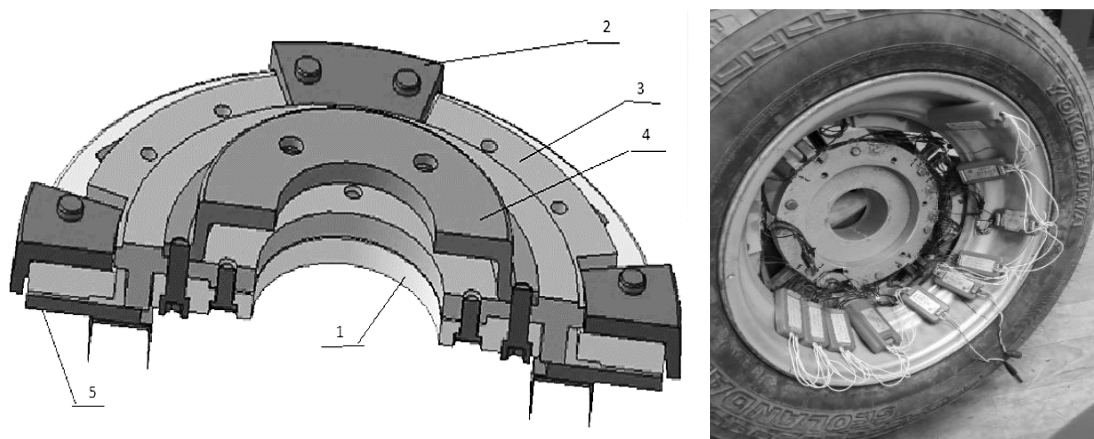


Рис. 2. а) 3D модель датчика в сборе:

*1 – датчик; 2 – скобы крепежные; 3 – внутренний предохранительный фланец;
4 – фланец, передающий крутящий момент; 5 – внешний предохранительный фланец;*
б) колесо с тензоступицей

Fig. 2. a) 3D model of sensor assembly:

*1 – sensor; 2 – fastening brackets; 3 – internal safety flange;
4 – torque transmission flange; 5 – external safety flange;*
b) wheel with strained hub

Исследование эффективности работы системы ЭБД на силовых датчиках

Для анализа эффективности применения систем, основанных на измерении силовых факторов, в среде *MATLAB Simulink* были построены математические и имитационные модели корпуса колесной машины, двигателя и управляющей системы в виде водителя, дифференциальной трансмиссии с ЭБД на кинематических и силовых датчиках (рис. 3-7).

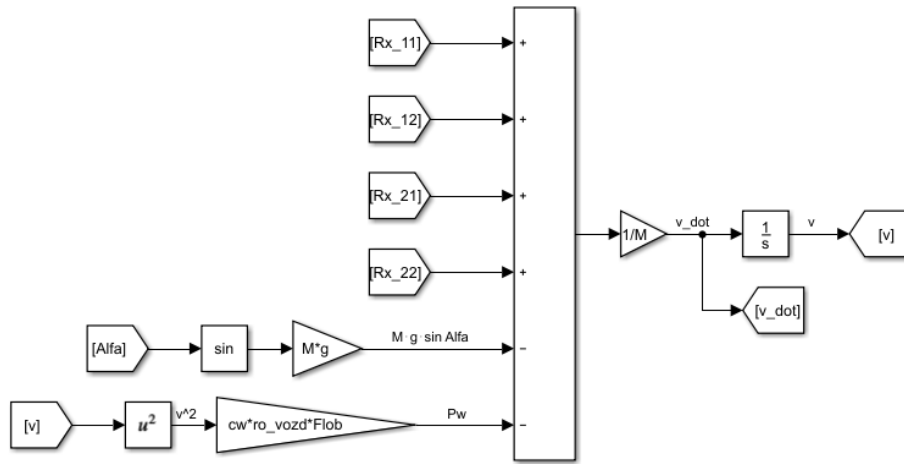


Рис 3. Блок-схема решения ДУ продольного перемещения КМ

Fig. 3. Block diagram of the solution of wheeled vehicle (WV) longitudinal movement

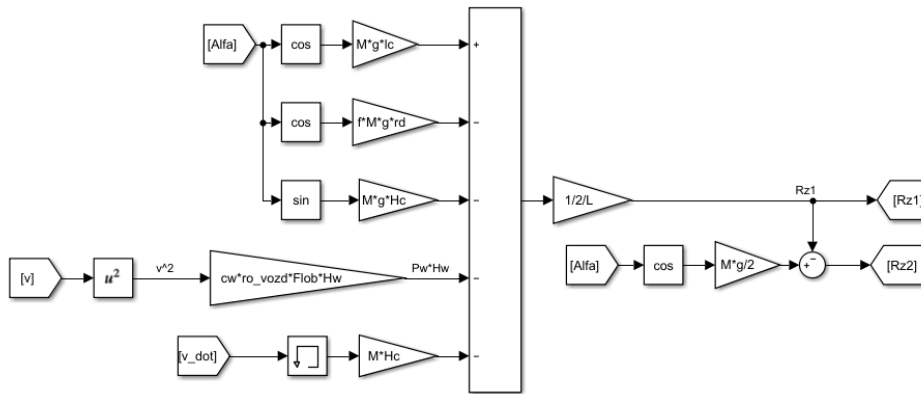


Рис. 4. Блок-схема решения уравнений перераспределения реакций по осям КМ

Fig. 4. Block diagram of reactions reallocation equations solution along WV axes

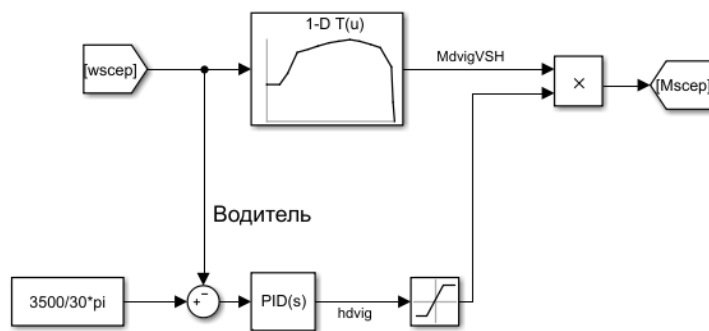


Рис. 5. Система ДВС и водителя

Fig. 5. ICE and driver system

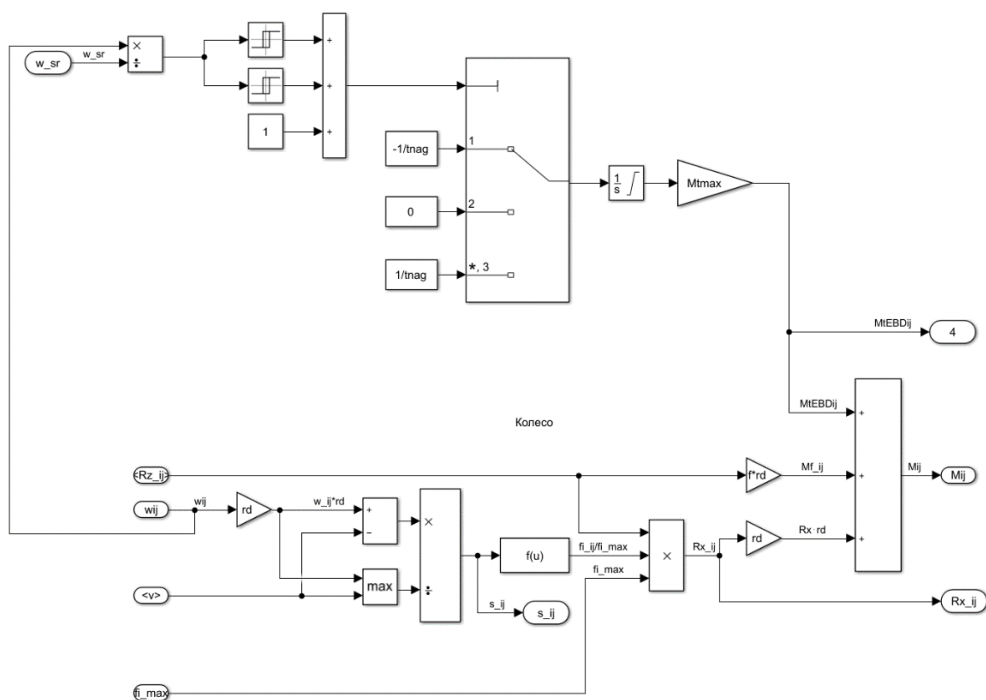


Рис. 6. Блок-схема для колеса и системы ЭБД

Fig. 6. Block diagram of wheel and EDS system

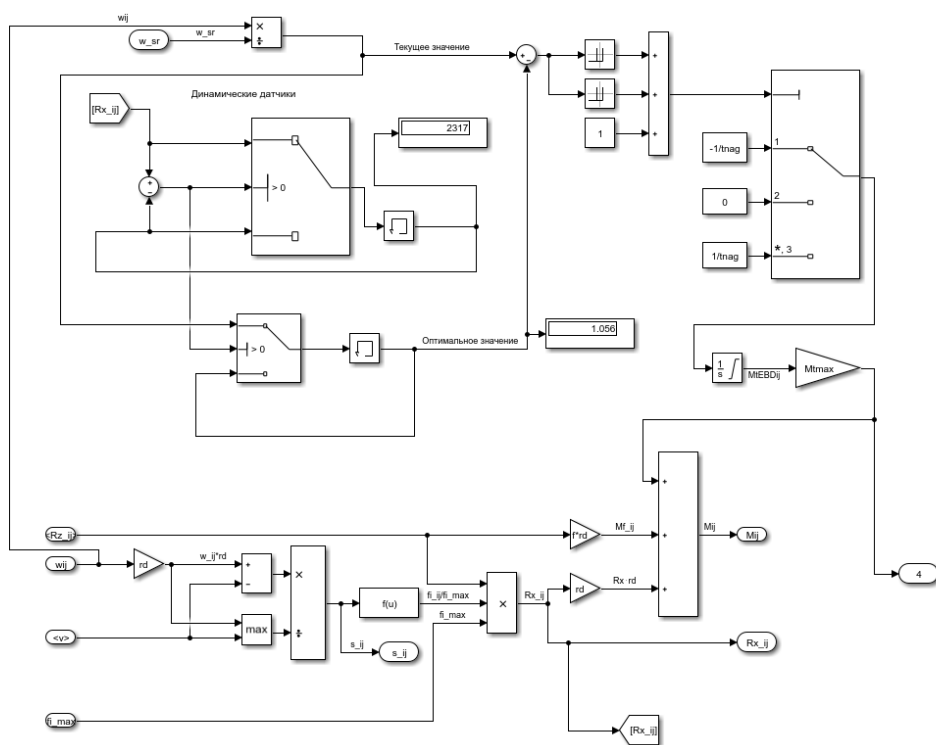
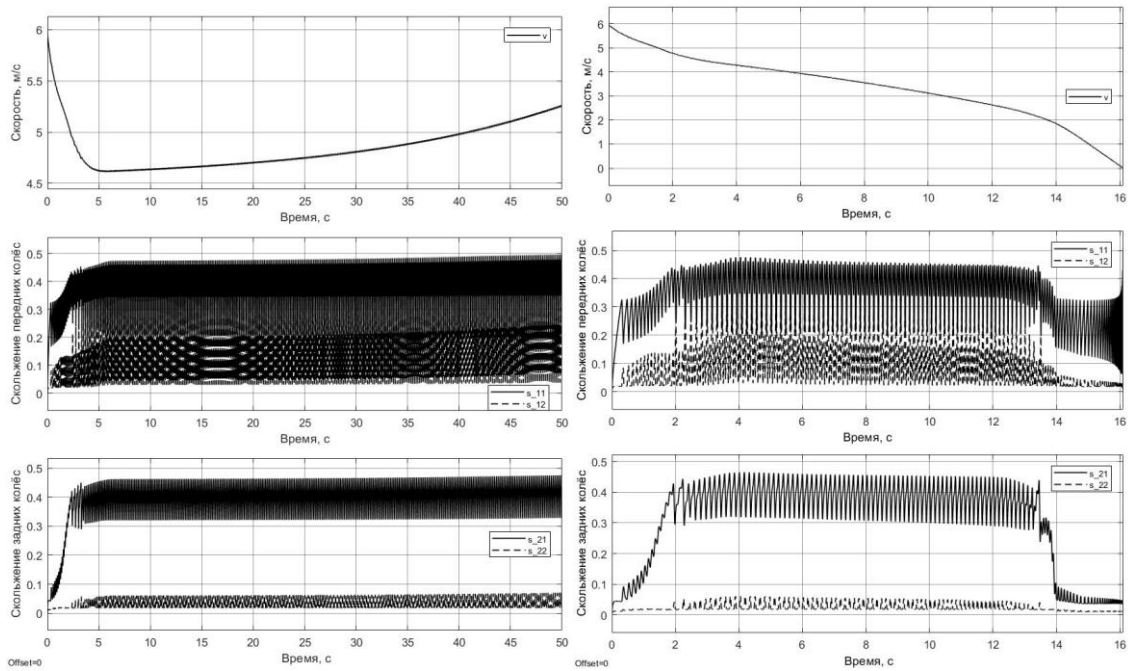


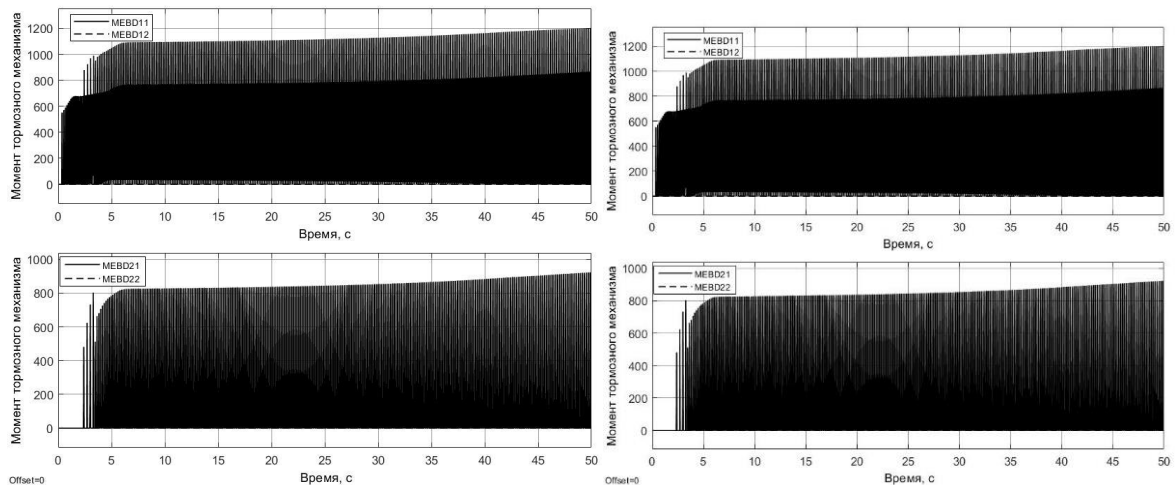
Рис. 7. Блок-схема для колеса и системы ЭБД с силовыми датчиками

Fig. 7. Block diagram of wheel and EDS system with power sensors



**Рис. 8. а) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном 12° ;
 б) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном $12,5^\circ$**

**Fig. 8. а) Driving parameters of WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12° ;
 б) Parameters of WV movement with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**



**Рис. 9. а) моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12° ;
 б) моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП $12,5^\circ$**

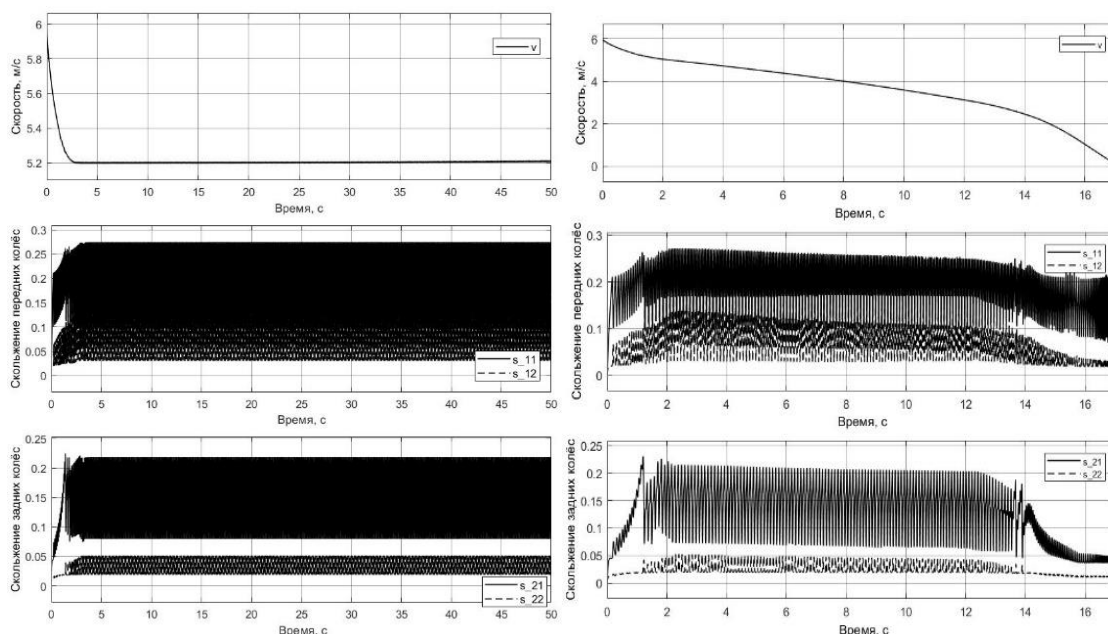
**Fig. 9. а) torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12° ;
 б) torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**

На основе полученной модели было проведено исследование движения КМ на подъеме при следующих параметрах опорного основания:

- по правому борту покрытие – укатанный снег, посыпанный песком с $\varphi_{max} = 0,38$;
- по левому борту покрытие – укатанный обледенелый снег с $\varphi_{max} = 0,15$;
- начало движения на подъеме со скорости, соответствующей 2500 об/мин по тахометру, с момента начала эксперимента водитель начинает регулировать подачу топлива так, чтобы частота вращения соответствовала 3500 об/мин.

Свойства проходимости в данном случае определялись максимальным углом подъема, который смог преодолеть автомобиль. При исследовании движения на подъем колесной машины с дифференциальной связью колес по опорной поверхности с уклоном 12° движение исследуемой модели КМ возможно (рис. 8а и 9а), а при увеличении угла ОП до $12,5^\circ$ происходит остановка (рис. 8б и 9б).

При исследовании движения на подъем колесной машины с дифференциальной связью колес и ЭБД на динамических датчиках по опорной поверхности с уклоном $12,1^\circ$ движение исследуемой модели КМ возможно, что подтверждают рис. 10а и 11а, а при увеличении угла ОП до $12,5^\circ$ происходит остановка, это можно увидеть на рис. 10б и 11б.



**Рис. 10. а) Параметры движения КМ с ЭБД с динамическими датчиками при подъеме на ОП с уклоном $12,1^\circ$;
б) Параметры движения КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при подъеме на ОП с уклоном $12,5^\circ$**

**Fig. 10. a) Parameters of movement of WV with EDS with dynamic sensors when going up the support surface with a slope of $12,1^\circ$;
b) Parameters of WV movement with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of $12,5^\circ$**

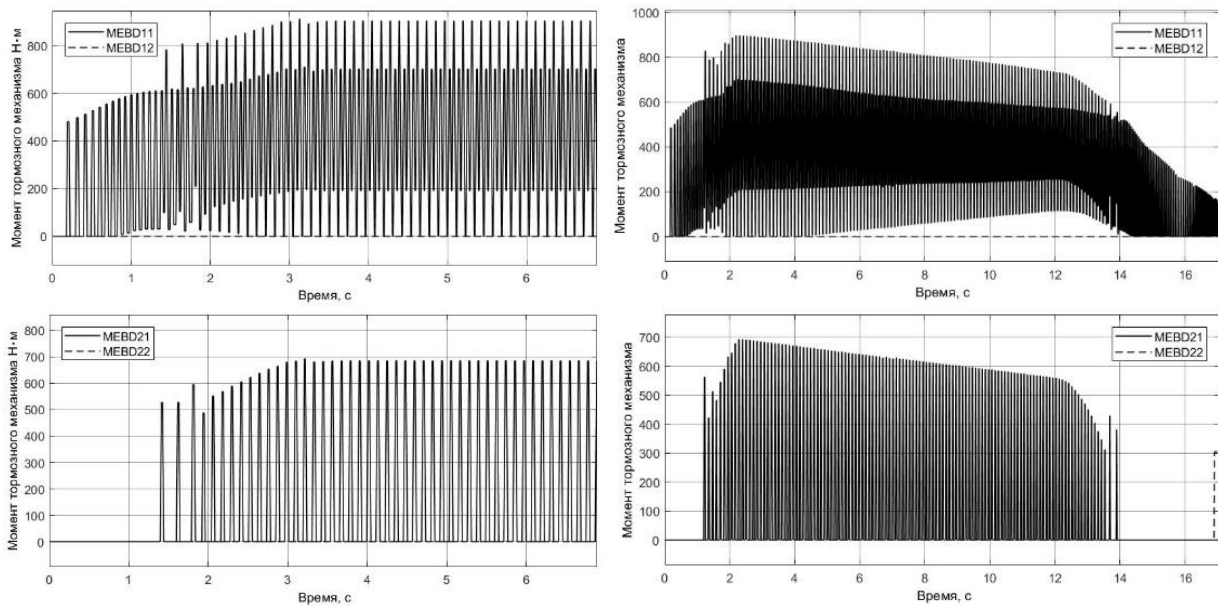


Рис. 11. а) Моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12,1 °;
б) Моменты тормозных механизмов для КМ с дифференциальной трансмиссией и ЭБД при движении на подъем с уклоном ОП 12,5 °

Fig. 11. а) Torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12,1 °;
б) Torques of brake mechanisms for WV with differential transmission and EDS when going up the support surface with a slope of 12,5 °

По графикам на рис. 10б ясно, что буксование поддерживается в области оптимального значения, что способствует увеличению продольной силы тяги; рис. 11б также подтверждает, что максимальный тормозной момент, развиваемый системой ЭБД может быть ограничен. По результатам исследования видно, что КМ с дифференциальной трансмиссией с ЭБД на кинематических датчиках смогла преодолеть подъем в 12 ° (21,3 %), а на силовых датчиках – 12,1 ° (21,4 %).

Таким образом, использование силовых датчиков в системе дало улучшение проходимости в рассматриваемом случае. Кроме того, общая тенденция использования динамических датчиков показывает положительное влияние на систему, так как система поддерживает буксование в оптимальном диапазоне, исследуя грунт. К тому же, при использовании силовых датчиков возможно применение заблокированной трансмиссии, что позволит получить большую проходимость КМ. Также для многоосных колесных машин можно создать систему прогнозирования проходимости на анализе свойств грунта на маршруте движения – по известным силам взаимодействия колес каждой оси с опорной поверхностью методом экстраполяции можно спрогнозировать свойства грунта на ближайшем участке пути. Такая система может позволить сократить количество ситуаций, связанных с потерей подвижности многоосной военной колесной техники, тем самым подняв маневренность и быстродействие вооруженных сил.

Выводы

1. В результате анализа современных систем активной безопасности было выявлено, что их недостатки заключаются в том, что источниками первичной информации являются кинематические параметры, которые лишь косвенно характеризуют силовое взаимодействие колес с опорной поверхностью. Они работают в условиях дефицита информации.

2. Проведенное исследование подтверждает, что система активной безопасности на основе силового анализа позволяет обеспечить максимальную реализацию коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью и тем самым повысить безопасность движения автомобиля, а также его проходимость.

3. На многоосных колесных машинах применение аппаратуры, оценивающей силовое взаимодействие колес с опорной поверхностью, позволяет прогнозировать несущую способность грунта и предотвращать потерю подвижности транспортных средств.

Библиографический список

1. Основы создания САБ АТС на силовом анализе: монография / И. С. Сазонов [и др.]; под общ. ред. д-ра тех. наук, проф. И. С. Сазонова. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2016. – 256 с.
2. **Ким, В.А.** Методология создания САБ АТС на основе анализа сил: автореферат / В.А. Ким. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2004. – 42 с.
3. **Ким, В.А.** Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа: монография / В. А. Ким. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 346 с.
4. **Сазонов, И.С.** Динамическое регулирование режимов движения полноприводных колесных машин / И.С. Сазонов. – Минск: БГПА, 2001. – 185 с.
5. Bosch. Автомобильный справочник: пер. с англ. – М.: За рулем, 2000. – 896 с.
6. **Гируцкий, О.И.** Электронные системы управления агрегатами автомобиля / О.И. Гируцкий, Ю.К. Есеновский-Лашков, Д.Г. Поляк. – М.: Транспорт, 2000. – 213 с.
7. **Кадаков, М.** Renault Scenic RX4. Почти внедорожник / М. Кадаков // Авторевю. 2000. № 1. С. 4.
8. **Нефедьев, Я.Н.** Конструкции и характеристики электронных антиблокировочных систем зарубежных фирм / Я.Н. Нефедьев. – М.: НИИАВТОПРОМ, 1979. – 60 с.
9. **Нефедьев, Я.Н.** Теория, разработка и исследование унифицированной системы автоматического управления антиблокировочным торможением грузовых автотранспортных средств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Я.Н. Нефедьев. – М., 1987. – 307 с.
10. Antiskid braking systems: пат. 1296494 Великобритания, МКИ 60 Т 8/00 / Daimler-Benz AG. ФРГ. – № 95742105; заявл. 01.03.70; опубл. 21.03.72. 1972. № 45, – 18 с.
11. **Диваков, А.** Lancer на тропе войны / А. Диваков, Л. Голованов // Авторевю. 2000. № 7. С. 33-35.
12. **Кушвид, Р.П.** Испытания автомобиля: учебник. – М.: МГИУ, 2011. – 351 с.
13. Instruction Manual. Basic Principles for Use in Over-the-Road-Testing. For RoaDyn® System 2000 Measuring Wheels. – Kistler Group, Switzerland, Winterthur.
14. Динамометрическое колесо, шестикомпонентный датчик: Отчет о НИР; рук. Захаров А. Ю.; исполн.: Анисимов М.М. – М., 2016. – 45 с.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2021*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Ильичева Мария Николаевна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Карпычев Владимир Юрьевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

Махонина Юлия Владимировна – студент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;

Мухин Алексей Валерьевич – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;

Неймарк Елена Александровна – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук;

Шальнова Юлия Павловна – ведущий экономист отдела экономической оценки Центра компетенций «Финансово-экономическая оценка» Службы финансового менеджмента ПАО Сбербанк

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Басов Анатолий Аркадьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

Власичев Герман Николаевич – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор д-р техн. наук;

Соколова Галина Марковна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Худяков Илья Сергеевич – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Яшина Алла Николаевна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Беляков Владимир Викторович – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р техн. наук

Бутин Данила Александрович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Бушуева Марина Евгеньевна – декан Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

Верещагин Сергей Борисович – доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), канд. техн. наук;

Дубкова Мария Андреевна – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Дёмина Екатерина Евгеньевна – магистрант Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета;

Евсеев Кирилл Борисович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;

Ерофеева Лариса Николаевна – заведующая кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

Куклина Ирина Геннадьевна – доцент Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, канд. техн. наук

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

Макаров Владимир Сергеевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

Мокеров Дмитрий Сергеевич – заведующий учебно-производственными мастерскими Нижегородского государственного педагогического университета им. К. Минина;

Сергиевский Сергей Андреевич – руководитель научно-исследовательской лаборатории транспортных интеллектуальных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

Шаповалов Сергей Вячеславович – старший преподаватель кафедры №3 ЗРВ, майор, аспирант Военного учебного центра при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

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); аннотацию, ключевые слова.
- Аннотация (150-250 слов) отражает актуальность поставленной проблемы, цели исследования, методы, результаты, обозначение новизны, ключевые выводы.
- Ключевые слова (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. Тематическая направленность представленного исследования должна строго соответствовать рубрике журналу. 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. Самоцитирование рекомендуется ограничить тремя пунктами. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо приложить файл с информацией об авторах на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 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, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

**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

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 2 (133)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**
Технический редактор: **М.В. Прохорова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 07.06.2021. Дата выхода в свет 20.06.2021. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 7,00. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013 г.