

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 (137)

Нижний Новгород 2022

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 2 (137).
– 142 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: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки); 2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки); 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки); 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев, Н.Ю. Золотых, Г.О. Котиев, В.Н. Ланцов, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, В.Н. Наумов, П.В. Пакшин, Н.А. Прибатурин, Н.В. Старостин, А.С. Суркова, 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

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

УЧРЕДИТЕЛЬ

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

Электронная версия журнала:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

Средство массовой информации
зарегистрировано Роскомнадзором:
ПИ № ФС 77-56417 от 11.12.2013

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022

**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 (137)

Nizhny Novgorod 2022

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: 2.3.1 – System analysis, management and information processing; 2.3.8 – Informatics and informational processes; 2.4.9 – Nuclear installations, fuel cycle, radiation safety; 2.5.11 – Ground transportation and technological facilities and complexes

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrobostov, G.O. Kotiev, M.A. Legchanov, V.N. Lantsov, V.S. Makarov, V.R. Milov, V.N. Naumov, P.V. Pakshin, N.A. Pribaturin, N.V. Starostin, A.S. Surkova, N.Yu. Zolotykh

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:
III № ФС 77-56417*

*Electronic version of the journal:
<https://www.nmtu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>*

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Жевнерчук Д.В., Захаров А.С. Модель и лингвистическое обеспечение низкоуровневой структурной модификации объектно-ориентированных систем	7
Мухин А.В. Управление движением вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках на основе измерения смещений	17
Никулин Е.А. Адаптивное управление медианной фильтрацией изображений в MATHCAD	26
Прилуцкий М.Х., Кривошеев О.В. Распределение производственных ресурсов в задачах объемного планирования в условиях неполноты данных	36
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	44
Головко В.Ф., Дмитриева И.В., Рязанов А.В. Выбор конфигурации ядерного энергоисточника на основе ВТГР для технологического применения	44
Тучков М.Ю., Поваров П.В., Тихонов А.И., Козловский М.Н., Поваров В.П. Использование программной модели энергоблока при оперативной эксплуатации	58
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	69
Горожанкин С.А, Савенков Н.В. Выбор передаточных чисел моноблочных роботизированных коробок передач	69
Кравец В.Н., Мусарский Р.А., Тумасов А.В., Кулепов В.Ф., Орлов Л.Н. Исследование виброзащитных свойств подвески сиденья легкого коммерческого автомобиля	84
Папунин А.В., Беляков В.В., Аникин А.А., Наумов В.Н., Макаров В.С. К вопросу преодоления дискретных снежных препятствий транспортно-технологическими машинами	94
Савченко В.В., Литарович В.В. Консолидация данных в коммуникационной платформе для высокоавтоматизированных транспортных средств	105
Стадухин А.А., Холоденко В.Б., Мокрецов Н.А. Метод определения границ управляемого движения гусеничной машины	115
Чичекин И.В., Левенков Я.Ю., Аругян Г.А., Нырков Ф.А., Чудаков О.И. Разработка математической динамической модели карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на раму в заданных режимах эксплуатации	127
НАШИ АВТОРЫ	138

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
Zhevnerchuk D.V., Zakharov A.S. Model and linguistic support of low-level structural modification of object-oriented systems	7
Mukhin A.V. Motion control of vertical rigid rotor, rotating in electromagnetic bearings based on displacement measurements	17
Nikulin E.A. Adaptive control of median filtering of images in MathCAD	26
Prilutsky M.Kh., Krivosheev O.V. Distribution of production resources in volumetric planning problems under conditions of incomplete data	36
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	44
Golovko V.F., Dmitrieva I.V. Configuring nuclear power source based on HTGR for technological use	44
Tuchkov M.Yu., Povarov P.V., Tikhonov A.I., Kozlovskiy M.N., Povarov V.P. Use of power unit software model during operation	58
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	69
Gorozhankin S.A., Savenkov N.V. Selection of gear ratios of monoblock robotic gearboxes	69
Kravets V.N., Musarskiy R.A., Tumasov A.V., Kulepov V.F., Orlov L.N. Research of vibration-proof properties of a light commercial vehicle seat suspension	84
Papunin A.V., Belyakov V.V., Anikin A.A., Naumov V.N., Makarov V.S. On the issue of overcoming of discrete snow obstacles by transport-and-technological vehicles	94
Savchenko V.V., Litarovich V.V. Consolidation of data in communication platform for highly automated vehicles	105
Stadukhin A.A., Kholodenko V.B., Mokretsov N.A. Method for determining the boundaries of controlled movement of a tracked vehicle	115
Chichekin I.V., Levenkov Y.Y., Arutunyan G.A., Nyrkov F.A., Chudakov O.I. Development of mathematical dynamic model of an open-pit dump truck for determination of loads acting on frame in specified operating modes	127
AUTHORS	138

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.031

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_7

МОДЕЛЬ И ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НИЗКОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Д.В. Жевнерчук

ORCID: 0000-0001-6306-0893 e-mail: zhevnerchuk@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева
*Нижний Новгород, Россия***А.С. Захаров**

ORCID: 0000-0002-4058-0746 e-mail: lukalex.nnov@gmail.com

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

Анализируется проблема применения генераторов программных компонентов, автоматизирующего ряд задач по построению объектно-ориентированных программных систем, но оставляющего в то же время степень участия человека-эксперта, архитектора, разработчика в данном процессе достаточно высокой. Приведены результаты исследований, направленных на развитие принципов *Inversion of Control* и средств интеллектуальной поддержки структурной организации объектно-ориентированных систем, преодолевающих ограничения одного из принципов *SOLID*, а именно «open-close». Рассматривается процесс модификации объектно-ориентированных систем (ООС) в контексте структурных изменений, не нарушающих низкоуровневые правила построения ООС. Такой процесс является базовым для реконфигурирования, реструктуризации и рефакторинга ООС в условиях меняющихся внешних факторов, а также требований, предъявляемых к системе. Показано, что модификация любой ООС может быть представлена с помощью дизъюнкта Хорна. Обсуждаются результаты эксперимента по низкоуровневой структурной модификации UI-систем.

Ключевые слова: объектно-ориентированное проектирование, UML, открытая информационная система, модификация, дизъюнкт Хорна.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жевнерчук, Д.В. Модель и лингвистическое обеспечение низкоуровневой структурной модификации объектно-ориентированных систем / Д.В. Жевнерчук, А.С. Захаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2022. № 2. С. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_7

MODEL AND LINGUISTIC SUPPORT OF LOW-LEVEL STRUCTURAL MODIFICATION OF OBJECT-ORIENTED SYSTEMS

D.V. Zhevnerchuk

ORCID: 0000-0001-6306-0893 e-mail: zhevnerchuk@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***A.S. Zakharov**

ORCID: 0000-0002-4058-0746 e-mail: lukalex.nnov@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The use of software components generators that automate a number of tasks for the construction of object-oriented software systems, but at the same time with a quite high degree of participation of a human expert, architect, developer in this process, is analyzed. Results of research aimed at developing of the Inversion of Control principles and intellectual support means for the structural organization of object-oriented systems that overcome the limitations of one of the SOLID principles, namely «open-close», are presented. Process of modification of object-oriented systems (OOS) is considered in the context of structural changes that do not breach the low-level rules of OOS construction. Such a process is the basic one for reconfiguring, restructuring and refactoring of OOS in conditions of changing external factors, as well as the system requirements. It is shown that modification of any OOS can be presented using the Horn clause. Results of the experiment on low-level structural modification of UI systems are discussed.

Key words: object-oriented design, UML, open information system, modification, the Horn clause.

FOR CITATION: D.V. Zhevnerchuk, A.S. Zakharov. Model and linguistic support of low-level structural modification of object-oriented systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 7-16.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_7

Введение

Существует множество различных определений понятия модифицируемости [1]. Согласно общепринятой формулировке, модифицируемость (modifiability) как свойство системы определяет степень простоты эффективного и рационального изменения продукта или системы без добавления дефектов и снижения качества продукта [1]. Будем считать, что объектно-ориентированные системы (ООС) обладают свойством модифицируемости, если структурные изменения, получаемые в результате применения комбинаций допустимых операций пространственного и семантического сопряжения блоков, а также удаления блоков из многоблочных структур, не нарушают их целостности в контексте спецификации UML. С учетом этого о модифицируемости можно говорить в контексте структурных изменений ООС, не нарушающих базовые (низкоуровневые) правила построения ООС, при этом процесс модификации объектно-ориентированных систем является иерархическим (рис. 1).

Процессы низкоуровневой структурной модификации объектно-ориентированных систем выступают фундаментом для реконфигурирования и рефакторинга ООС в условиях требований и ограничений различной природы, а также для создания самоорганизующихся и адаптивных ООС.

Теоретическая часть

Любая объектно-ориентированная система может быть представлена совокупностью множеств блоков (B) двух типов и связей (L) двух типов между ними:

$$S = \langle B^P, B^D, L^U, L^E \rangle, \quad (1)$$

где:

B^P – множество блоков моделей фрагментов предметной области или информационных процессов;

L^U – множество семантических связей, регламентируемых подмножеством языка моделирования систем UML;

L^E – множество связей, определяющих пространственную ориентацию блоков друг относительно друга после их сопряжения.

Таким образом, любой блок ООС синтезируется на основе согласованной совокупности спецификаций или подмножества одной спецификации, ориентированной на решение определенной задачи (реализацию заданной функции либо группы функций) [2]. Множество B^P содержит части целевой ООС, необходимые для описания предметных областей или информационных процессов:

- абстрактные и конкретные типы;
- атрибуты и методы;
- экземпляры, порождаемые от конкретных типов, которые подвергаются обработке;

- модули, группирующие типы.

Представим B^P в виде кортежа, элементами которого являются множества блоков, инкапсулирующих выделенные части ООС:

$$B^P = \langle C, B^a, B^m, O, M \rangle, \quad (2)$$

где:

$C = \langle C^a, C^c \rangle$ – множество типов (C^a – абстрактный тип, C^c – конкретный тип, от которого можно создавать экземпляры);

B^a – множество блоков атрибутов;

B^m – множество блоков методов;

O – множество экземпляров (объектов);

M – множество модулей ООС.

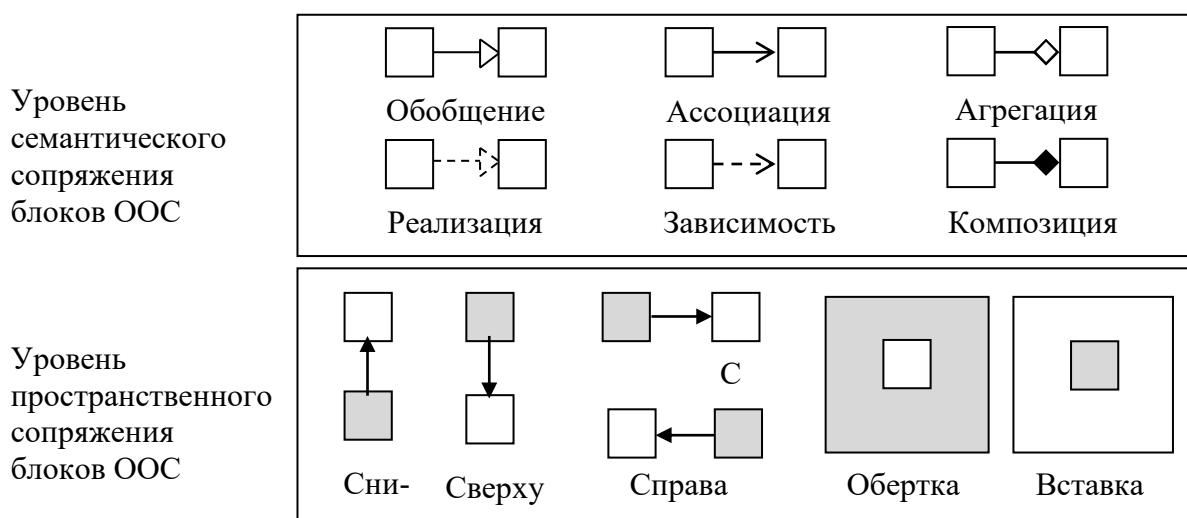


Рис. 1. Обобщенная схема низкоуровневой структурной модификации объектно-ориентированной системы

Fig. 1. Object-oriented system low-level structural modification generalized scheme

Элементами множества B^D являются формализованные стандартизированные профили ООС, в том числе, сигнатуры, определяющие режимы сопряжения блоков, являющихся элементами множества B^P :

- сигнатура абстрактного / конкретного типа;
- сигнатура метода;
- сигнатура модуля.

Представим B^D в виде кортежа, элементами которого являются множества блоков, инкапсулирующих сигнатуры выделенных частей ООС:

$$B^D = \langle D^{C^a}, D^{C^c}, D^{B^m}, D^M \rangle, \quad (3)$$

где: D^{C^a} – сигнатура абстрактного типа;

D^{C^c} – сигнатура конкретного типа;

D^{B^m} – сигнатура метода;

D^M – сигнатура модуля.

Элементами множества L^E являются связи, формализующие операции пространственного сопряжения блоков ООС:

- 1) сопряжение блоков снизу $b_i \widehat{\circ} b_j \in B$;
- 2) сопряжение блоков справа $b_i \circ b_j \in B$;
- 3) сопряжение блоков сверху $b_i \circ b_j \in B$;
- 4) сопряжение блоков слева $b_i \circ b_j \in B$;
- 5) сопряжение типа «вставка» $b_i \circ b_j \in B$;
- 6) сопряжение типа «обертка» $b_i \circ b_j \in B$;
- 7) сопряжение, в результате которого первый блок-операнд оказывается поверх второго блок-операнда $b_i \circ b_j \in B$;
- 8) сопряжение, в результате которого первый блок-операнд оказывается за вторым блок-операндом $b_i \circ b_j \in B$.

Введем следующие обозначения для аналитического описания семантических связей, регламентируемых подмножеством языка UML и являющихся элементами множества L^U :

- 1) обобщение $b_i \triangleright b_j \in B$;
- 2) реализация $b_i \dashv b_j \in B$;
- 3) ассоциация $b_i \triangleright b_j \in B$;
- 4) зависимость $b_i \triangleright b_j \in B$;
- 5) агрегация $b_i \diamond b_j \in B$;
- 6) композиция $b_i \blacklozenge b_j \in B$.

Дополним множество L^U связями инстанцирования и поведения:

- 1) инстанцирование $b_i \square b_j \in B$, $b_i \in C^c$, $b_j \in O$;
- 2) поведение $b_i . b_j \in B$, $b_i \in O$, $b_j \in B^m$.

Поведение объекта может быть выражено через инстанцирование и сопряжение типа «Вставка». Из определения инстанцирования [3] следует:

$$\forall b_i \in C^c, b_j \in O, b_k \in B^m: (b_i \square b_j) \cap (b_k \circ b_i) \rightarrow (b_j . b_k) \quad (4)$$

Выполним формализацию паттерна «Делегат», который является базовым паттерном объектно-ориентированного проектирования. Из определения делегирования [3] следует:

$$\begin{aligned} \exists b_h \in B^H, b_{i,j} \in C^c, b_{k,l} \in O, b_{q,r} \in B^m, b_t \in B^T, b_a \in B^A: \\ (b_i \circ b_h) \cap (b_h \circ b_j) \cap (b_l \square b_j) \cap (b_q \circ b_i) \cap (b_r \circ b_j) \cap \\ (b_t \circ b_a) \cap (b_a \circ b_i) \cap ((b_l . b_r) \circ b_q) \rightarrow (b_i \circ b_j) \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (5), существуют:

- сигнатура b_h , в которой разрешен тип b_i ;
- сигнатура b_h определена для класса b_j ;
- экземпляр b_l класса b_j ;
- методы b_q, b_r определены в составе классов соответственно b_i, b_j ;
- тип b_t определен в секции атрибутов b_a ;
- секция атрибутов b_a определена в составе класса b_i ;
- вызов метода b_r у экземпляра b_l определен в составе метода b_q .

Совокупность фактов по выражению (5) определяет факт делегирования поведения классом b_i классу b_j . Для каждого элемента из множества L^U существует единственная стрелка диаграммы классов UML, начало которой связано с первым блоком-операндом, а конец – со вторым. Операции сопряжения блоков и операции, определяющие связи, регламентированные UML представляют разновидности более общей операции сопряжения блоков [4,5]. Поскольку операция сопряжения на множестве блоков представляет собой алгебраическую группу, b_i может представлять собой как многоблочную структуру, так и элементарный (неделимый) блок.

Для обозначения обобщенной операции удаления блока b_i из многоблочной структуры b_j введем следующее обозначение:

$$b_i / b_j \in B \quad (6)$$

Утверждение 1. *Процесс модификации ООС может быть представлен комбинацией CRUD-операций (акроним от Create, Read, Update, Delete) над кортежем (1)*

■

В самом общем случае любая объектно-ориентированная система может быть представлена блочно-иерархической структурой [3]. На каждом уровне ее элемент представляет собой компонент, инкапсулирующий свойства и поведение и обладающий интерфейсами для сопряжения с внешними компонентами. В свою очередь, каждый компонент может быть декомпозирован и представлен многокомпонентной структурой следующего уровня. Листья иерархии содержат описание неделимых элементов или компонентов, декомпозиция которых не имеет смысла в условиях выбранного уровня абстракции. На нижнем уровне любая объектно-ориентированная система может быть представлена многокомпонентной структурой на основе операций пространственного и семантического сопряжения, причем операции семантического сопряжения трактуются в контексте модели классов спецификации UML.

Согласно концепции технической самоорганизации открытых информационных систем [5-7], должен существовать информационный процесс I между ООС и внешней средой, способный переводить ООС между равновесными состояниями, в которых ООС удовлетворяет ограничениям пространственного и семантического сопряжения ее элементов. Необходимым условием обеспечения информационного процесса I является существование во внешней среде единого стандартизированного информационного пространства (ЕСИП), являющегося источником компонентов, которые должны быть выбраны и встроены в ООС в процессе ее модификации.

Таким образом, любая операция модификации ООС является частным случаем операции Update (U) и представляет собой комбинацию следующих операций:

- поиск утилизируемых компонентов (многокомпонентных структур) ООС, подлежащих замене;
- поиск компонентов (многокомпонентных структур) в ЕСИП, которые могут быть встроены в ООС вместо утилизируемых компонентов без нарушения правил пространственного и семантического сопряжения;
- удаление утилизируемых компонентов (многокомпонентных структур) из ООС;
- вставка новых компонентов (многокомпонентных структур), полученных из ЕСИП в структуру ООС.

Очевидно, что выделенные операции являются частными случаями операций Create, Read, Delete.

■

Следствие 1. Существует внешняя управляющая система, выполняющая отображение множества компонентов ООС на множество компонентов ЕСИП с сохранением правил пространственного и семантического сопряжения.

■

Выше было показано, что между множеством компонентов ООС и ЕСИП существует отображение. Поскольку ООС и ЕСИП являются открытыми информационными системами, они могут быть представлены в виде компонентов, обладающих стандартизированными интерфейсами. Таким образом, возможны три случая размещения системы управления отображением между ООС и ЕСИП (далее, система управления отображением – СУО).

1. СУО встраивается в ООС и представляет собой отдельный модуль, являющийся частью изменяемой ООС. Недостатками этого варианта является сильная связанность ООС с модулями СУО, а также отсутствие, в общем случае, конфигурируемой встраиваемой СУО.

2. СУО встраивается в ЕСИП и представляет собой отдельный модуль, являющийся его частью. Недостатки этого варианта совпадают с недостатками встраивания ЕСИП в ООС. Кроме того, система сильно усложняется с точки зрения проектирования и сопровождения.
3. СУО является самостоятельной внешней системой. Последний вариант лишен недостатков первого и второго вариантов, но при организации взаимодействия СУО с ООС и ЕСИП требует развитой инфраструктуры и более сложного API.

Таким образом, существование внешней управляющей системы обосновано. ■

Утверждение 2. Модификация любой ООС может быть формализована с помощью дизъюнкта Хорна.

ООС, не содержащую ни одного блока, будем обозначать значком пустого множества \emptyset . Очевидно, что операция удаления блока из одноблочной ООС вернет \emptyset : $b_i / b_i = \emptyset$

Рассмотрим применение операции удаления блока из двухблочных ООС.

1. Блоки $b_i \in C^c$, $b_j \in C$ связаны отношением обобщения/зависимости:

$(b_i \triangleright b_j) / b_i = b_j$ удаление дочернего блока

$(b_i \triangleright b_j) / b_i = b_j$ удаление зависимого блока

$\forall b_i: (b_i \triangleright b_j) / b_j = \emptyset$ удаление родительского блока

$\forall b_i: (b_i \triangleright b_j) / b_j = \emptyset$ удаление блока, от которого зависят другие блоки

2. Блоки $b_i \in C^c$, $b_j \in C$ связаны отношением ассоциации/агрегации

Удаление блока агрегата:

$(b_i \triangleright b_j) / b_j = b_i$

$(b_i \triangleleft b_j) / b_j = b_i$

Удаление блока, который определяет часть агрегата (для случая ассоциации выражение будет таким же):

$(b_i \triangleleft b_j) / b_i \Rightarrow \exists b_k \in B^H, b_l \in B^T, b_r \in B^A:$

$[(b_i \circ b_k) \cap (b_l \circ b_r) \cap (b_k \circ b_i) \cap (b_r \circ b_j) \cap (b_i \triangleleft b_j)] / b_i = b_j / b_r$

3. Блоки $b_i \in C^c$, $b_j \in C$ связаны отношением композиции

Удаление блока композита:

$(b_i \blacklozenge b_j) / b_j = \emptyset$

Удаление блока, который определяет часть композита:

$(b_i \blacklozenge b_j) / b_i \Rightarrow \exists b_k \in B^H, b_l \in B^T, b_r \in B^A:$

$[(b_i \circ b_k) \cap (b_l \circ b_r) \cap (b_k \circ b_i) \cap (b_r \circ b_j) \cap (b_i \blacklozenge b_j)] / b_i = b_j / b_r$

4. Блоки $b_i \in C^c$, $b_j \in C^a$ связаны отношением реализации

Удаление блока, реализующего спецификацию:

$\forall b_i, b_j: (b_i \dashv b_j) / b_i = b_j$

Удаление блока-спецификации:

$\forall b_i, b_j: (b_i \dashv b_j) / b_j \Rightarrow \exists b_k \in B^M:$

$[(b_k \circ b_i) \cap (b_k \circ b_j) \cap (b_i \dashv b_j)] / b_j = b_i / b_k$

Рассмотрим операции удаления блоков и связей между блоками из n-блочных ООС.

Введем дополнительно концепт «мусорная корзина» (trashbin или tb), а также дополнительную связь, формализующую семантику удаления блоков ООС. На рис. 2а представлена связь блоков «а» и «b» и экземпляр «tb». При удалении блока «а» построим связь «а» с «tb» (рис. 2б). Альтернативным вариантом является добавление рефлексивной связи, формализующей процесс удаления блока (рис. 2в).

Удаление блока может сопровождаться удалением входящих/исходящих связей его с другими блоками. Рассмотрим случай удаления связи между блоками «а» и «b» (рис. 3а). Введем дополнительно концепты, экземпляры «l» которых формализуют тип связи между

блоками ООС. Для сопряжения «l» с блоками ООС будем использовать связь – коннектор от исходного блока ООС к «l» и от «l» к блоку ООС, в который входит семантическая / пространственная связь (рис. 3б). При удалении «l» построим связь «l» с «tb» (рис. 3в) и добавим еще одну связь между «a» и «b», формализующую удаление прямой связи «l» между блоками «a» и «b» (рис. 3г).

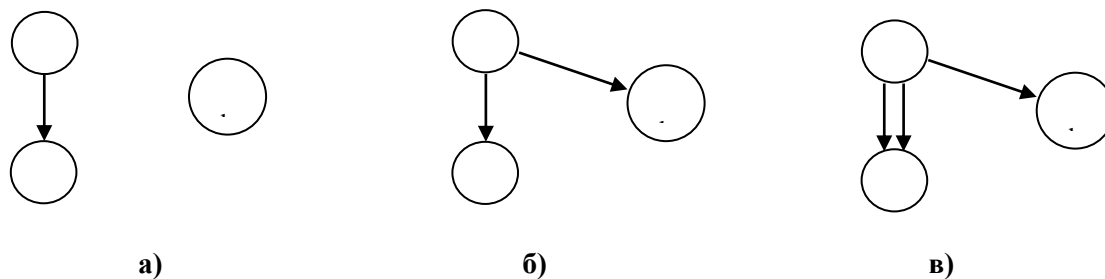


Рис. 2. Удаление блока ООС

Fig. 2. Deletion of OOS block

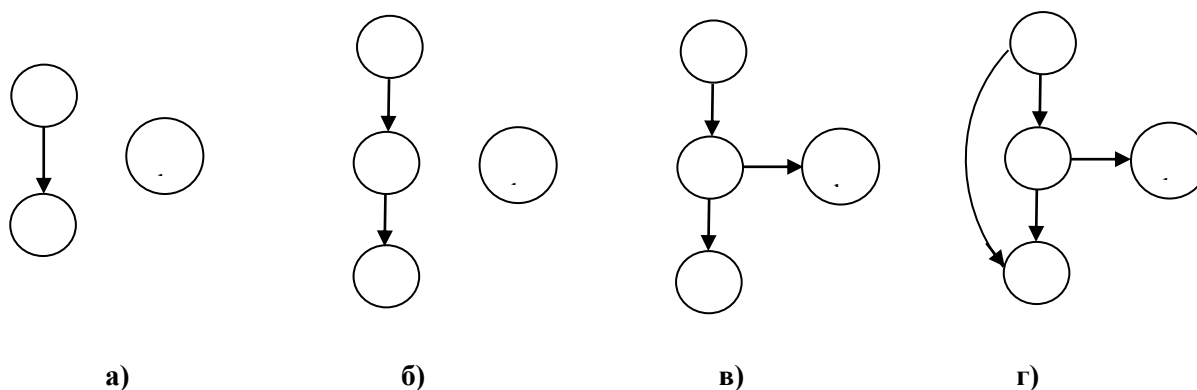


Рис. 3. Удаление связи между блоками ООС

Fig. 3. Deletion of connectivity among OOS blocks

Очевидно, что построенные конструкции могут быть реализованы с применением аппарата онтологий, а сами операции удаления блоков ООС и связей между ними могут быть формализованы с дизъюнктом Хорна. Структура ООС (n-блочные ООС) представляет собой комбинацию попарно сопряженных блоков ООС, при этом полнота системы блоков и типов связей определена UML. Известно, что структура ООС взаимно-однозначно приводится к онтологической форме, при этом было показано, что операция удаления блоков и связей между ними может быть выражена дизъюнктом Хорна, и процесс низкоуровневой структурной модификации ООС также может быть выражен дизъюнктом Хорна. ■

Экспериментальная часть

На основе системы генерации кода многокомпонентных объектно-ориентированных структур [8] были разработаны:

- генераторы кода UI-компонентов;
- правила пространственного сопряжения UI-компонентов, обеспечивающие низкоуровневую структурную модифицируемость визуальной части UI-системы;
- правила семантического сопряжения UI-компонентов, обеспечивающие низкоуровневую структурную модифицируемость функциональной части UI-системы.

Фрагмент описания основных UI-компонентов и правил их пространственного сопряжения представлен в табл. 1. Правила семантического сопряжения позволяют выполнять сопряжение компонентов визуальной части UI-системы с компонентами, реализующими обработку системных и пользовательских событий, механизмы взаимодействия с СУБД, обработчиками DOM и т.д.

Разработана акторно-ориентированная система с CLI, которая:


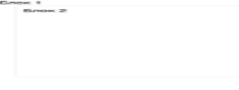



- предоставляет доступ к онтологии UI-компонентов;
- осуществляет запуск и остановку процесса сопряжения генераторов кода;
- позволяет случайным образом позиционировать одни компоненты в области других;
- позволяет позиционировать одни компоненты в области других на основе параметрической настройки межкомпонентных расстояний;
- позволяет блокировать слои UI-компонентов во время модификации;
- поддерживает язык SparQL-запросов, с помощью которого возвращается конфигурация UI-системы.

Таблица 1.

Компоненты пользовательского интерфейса

Table 1.

User Interface Components

Название компонента	Композиция с другими компонентами	Возможность встраивания внутрь компонента	Визуальное представление компонента
Компонент «Текст» (Label)	Сверху, снизу, справа, слева, «обертка»	Только «События» и «Стиль»	
Компонент «Блок» (div)	Сверху, снизу, справа, слева, «обертка», «вставка»	Любой компонент	
Компонент «Картинка» (Image)	Сверху, снизу, справа, слева, «обертка»	Только «События» и «Стиль»	
Компонент «Флажок» (Checkbox)	Сверху, снизу, справа, слева, «обертка»	Только «События» и «Стиль»	
Компонент «Поле ввода» (Input)	Сверху, снизу, справа, слева, «обертка»	Только «События» и «Стиль»	

Проведены эксперименты по синтезу множества конфигураций визуальной части UI-системы. На рис. 4а представлена одна из UI-систем, полученных в результате пространственной композиции UI-компонентов, часть которых, в свою очередь, также являются композитами.

Примером композита служит «Кнопка» (Button), являющаяся интерактивным компонентом, отображающим текст и изображения. Связь визуальной части с функциональными элементами в рамках настоящей работы не рассматривается. Синтезированная UI-система является многослойной, на рис. 4б показаны блоки (div), рендеринг которых выполнен цветом фона общего блока (UI-формы), представляющего собой контейнер, внутри которого размещены остальные элементы. Были выбраны пять конфигураций UI-систем, к которым применялась операция низкоуровневой структурной модификации, при этом время получения модификаций было ограничено (табл. 2).

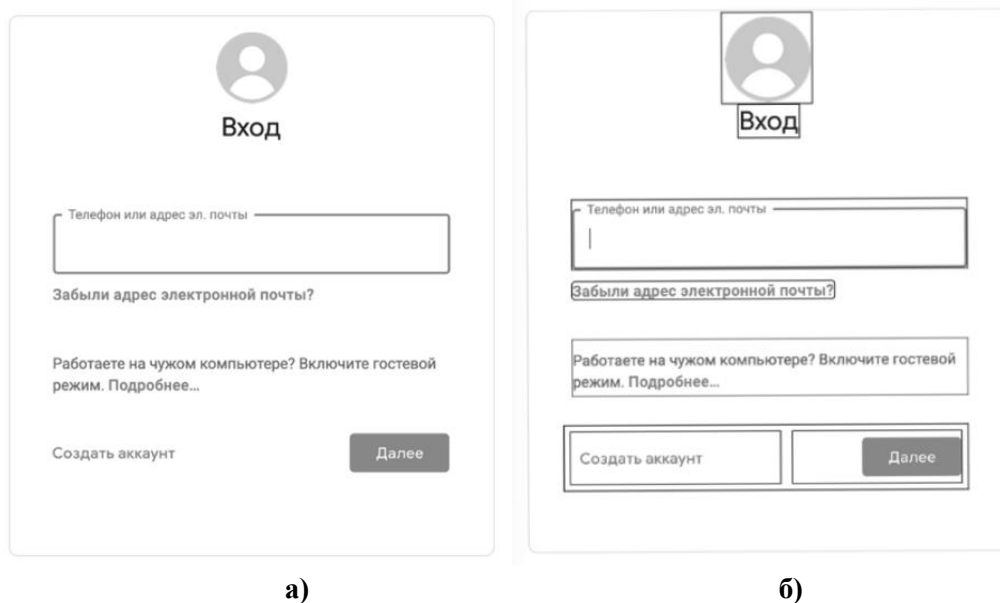


Рис. 4. Конфигурация UI-системы доступа к ресурсу

Fig. 4. Resource access UI system configuration

Результаты эксперимента по модификации UI-систем

Таблица 2.

Results of the experiment on modification of UI systems

Table 2.

Номер конфигурации	Количество полученных модификаций	Количество корректных модификаций	Количество модификаций с ошибками позиционирования	Количество модификаций с потерянными UI-компонентами
1	36	34 (94,4 %)	2 (5,6 %)	0 (0 %)
2	31	27 (87 %)	3 (9,7 %)	1 (3,3 %)
3	39	35 (89,7 %)	4 (10,3 %)	0 (0 %)
4	32	32 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
5	38	37 (97,3 %)	1 (2,7 %)	0 (0 %)

Результаты и перспективы

Рассмотренный процесс генерации UI-интерфейса отражает практическую возможность модификации объектно-ориентированных систем посредством представления системы в виде набора связанных компонентов. Показаны базовые компоненты, на основе которых могут быть построены другие более сложные компоненты. Подготовлены правила композиции таких элементов.

В результате синтеза и модификации UI-систем (табл. 2) были получены корректные UI-системы; в среднем в 93,68 %, в 0,66 % наблюдалась критическая потеря UI-компонента, а в 5,66 % имели место ошибки позиционирования, которые могли потенциально привести к отказам подсистем человеко-машинного взаимодействия.

Заключение

Рассмотрен процесс модификации объектно-ориентированных систем (ООС) в контексте структурных изменений. Данные изменения не нарушают базовые (низкоуровневые)

правила построения ООС. Представлен вариант модификации ООС с помощью внешней управляющей системы. Показано, что модификация любой ООС может быть представлена с помощью дизъюнкта Хорна. Проведены эксперименты по низкоуровневой структурной модификации и синтезу UI-систем.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015, Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200121069> (Дата обращения 23.02.2022).
2. **Аристов, А.В.** Обеспечение интероперабельности систем формирования стандартизированных профилей [Текст] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. № 4. Т. 11. С. 40-43.
3. **Gamma, E.** Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software [Text] / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides. – Addison-Wesley Pub Co, 1995. – 395p.
4. **Жевнерчук, Д.В.** Алгебраические аспекты и структурно-параметрический синтез открытых информационных систем [Текст] / Д.В. Жевнерчук, Л.С. Ломакина // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'18». 2018. Т. 2. С. 133-141.
5. **Жевнерчук, Д.В.** Обобщенный метод синтеза многокомпонентных интероперабельных структур на основе онтологии и недетерминированного конечного автомата [Текст] // Информационные технологии. 2019. № 2. С.67-74.
6. **Жевнерчук, Д.В.** Применение методов теории самоорганизации в задачах управления профилированием и конфигурированием вычислительных систем [Текст] / В.В. Кондратьев, Д.В. Жевнерчук // Доклады академии наук . 2014. Т. 459. № 4. С. 409-412.
7. **Жевнерчук, Д.В.** Принципы технической самоорганизации и структурно-параметрический синтез открытых информационных систем [Текст] // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17». Т. 2. С. 167-175
8. **Жевнерчук, Д.В.** Семантическое моделирование генераторов программного кода распределенных автоматизированных систем [Текст] / Д.В. Жевнерчук, А.С. Захаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 1. С. 23-31.

*Дата поступления
в редакцию: 21.03.2022*

УДК 004.031

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_17

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЖЕСТКОГО РОТОРА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ

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

Рассматривается задача управления по выходу вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках. Сформулированы необходимые условия существования регулятора, выражаемые в форме линейных матричных неравенств. Статическая обратная связь реализуется на основании прямого измерения смещений ротора и динамического оценивания скорости этих смещений. Вычислен статический регулятор по выходу для случая, когда измеряемыми переменными являются смещения центра масс ротора, а скорости изменения этих переменных определяются численно. Результаты моделирования динамики ротора открывают возможность управления объектом на основе измерения смещений. Исходный нелинейный объект оказывается устойчивым в достаточно широком диапазоне начальных возмущений.

Для решения задачи использовалась линеаризованная модель; для синтеза регулятора применялся метод функций Ляпунова и аппарат линейных матричных неравенств. Численная реализация регулятора выполнялась в среде MATLAB.

Ключевые слова: линейные матричные неравенства, лемма Шура, статический регулятор по выходу, электромагнитные подшипники, теорема Ляпунова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мухин, А.В. Управление движением вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках на основе измерения смещений // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 17-25. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_17

MOTION CONTROL OF VERTICAL RIGID ROTOR, ROTATING IN ELECTROMAGNETIC BEARINGS BASED ON DISPLACEMENT MEASUREMENTS

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

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem of an output of vertical rigid rotor rotating in electromagnetic bearings, is considered. Necessary conditions for existence of a regulator expressed in the form of linear matrix inequalities, are formulated. Static feedback is realized on the basis of direct measurement of rotor displacements and dynamic estimation of velocity of these displacements. Static output regulator is calculated for the case when the measured variables are the displacements of the rotor center of mass, and the rates of change of these variables are determined numerically. Results of the rotor dynamics modeling open up a possibility of control of the object based on the measurement of displacements. Initial nonlinear object turns out to be stable in a fairly wide range of initial perturbations. Linearized model was used to solve the problem; the Lyapunov function method and the apparatus of linear matrix inequalities were used to synthesize the regulator. Numerical implementation of the regulator was performed in the MATLAB environment.

Key words: linear matrix inequalities, Schur's lemma, static output feedback, electromagnetic bearings, Lyapunov's theorem.

FOR CITATION: Mukhin, A.V. Motion control of vertical rigid rotor rotating in electromagnetic bearings based on displacement measurement // Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 17-25.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_17

Введение

Пространство состояний, описывающее динамику ротора в электромагнитных подшипниках, включает в себя двенадцать переменных. Очевидно, что измерение всех переменных состояния и построения статического регулятора по состоянию, обеспечивающего асимптотическую устойчивость замкнутого объекта, практически не представляется возможным. Возникает задача стабилизации такого объекта на основании измерения только части переменных, например, смещений центра масс ротора, что реализуется с помощью специальных датчиков. Решением подобной задачи может быть построение статических или динамических регуляторов по измеряемому выходу. Первый вариант обладает неоспоримыми преимуществами как при теоретическом анализе, так и при дальнейшей практической реализации. Различные подходы к решению задачи управления ротором в электромагнитных подшипниках рассмотрены в работах [1-9]. Для решения задачи могут применяться PID-регуляторы, а также регуляторы, вычисленные на основе линейных матричных неравенств. В работе [1] проведен сравнительный анализ PID-регулятора и регулятора, вычисленного в пространстве состояний, на основании которого показаны преимущества последнего. В работе [2] синтезированы различные законы управления, обеспечивающие асимптотическую устойчивость ротора; отмечено, что одной из перспективных задач является синтез управлений по выходу на основе измерения смещений ротора и динамического оценивания скорости этих смещений.

В настоящей статье рассматривается задача синтеза статического регулятора по выходу, обеспечивающего стабилизацию вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках. Данное исследование является продолжением работы [2]. Вычислен статический регулятор по выходу и предложен алгоритм его поиска, представлено моделирование динамики ротора для случая, когда в управлении и измерении задействованы смещения ротора.

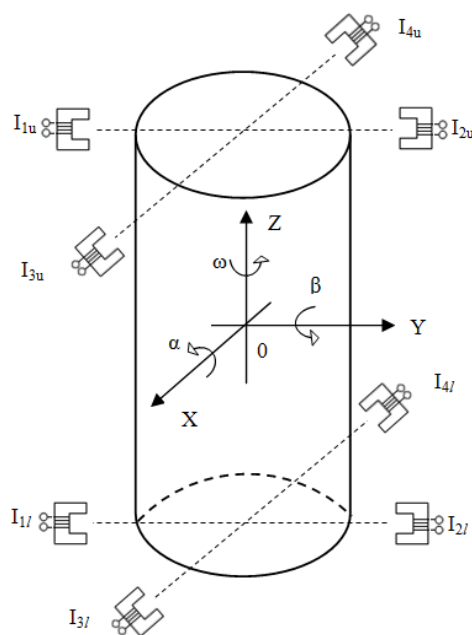


Рис. 1. Схематическое представление ротора в электромагнитных подшипниках

Fig. 1. Schematic representation of the rotor in electromagnetic bearings

Математическая модель вращающегося ротора

Схематическое представление ротора в электромагнитных подшипниках представлено на рис. 1 [2]. Ротор находится в магнитном поле, создаваемом четырьмя парами электромагнитов. 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. Линеаризованная система дифференциальных уравнений, описывающих динамику ротора, имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_5, \\
 \dot{x}_2 &= x_6, \\
 \dot{x}_3 &= x_7, \\
 \dot{x}_4 &= x_8, \\
 \dot{x}_5 &= \lambda(x_9 - x_{10}) + 2\lambda x_1 - \rho x_6, \\
 \dot{x}_6 &= \lambda(x_{12} - x_{11}) + 2\lambda x_2 + \rho x_5, \\
 \dot{x}_7 &= -(x_{11} + x_{12}) + 2x_3, \\
 \dot{x}_8 &= -(x_9 + x_{10}) + 2x_4, \\
 \dot{x}_9 &= (x_8 - x_5) - \mu x_9, \\
 \dot{x}_{10} &= -(x_8 + x_5) - \mu x_{10}, \\
 \dot{x}_{11} &= (x_7 + x_6) - \mu x_{11}, \\
 \dot{x}_{12} &= -(x_7 - x_6) - \mu x_{12},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\lambda = 5,12$, $\rho = 2$, $\mu = 1$.

Первые четыре переменных вектора состояния обозначают углы повтора и смещения центра масс ротора по двум координатным осям. Следующие четыре являются первыми производными четырех первых переменных соответственно. Следовательно, они могут быть получены численным дифференцированием. Последние четыре компоненты обозначают токи в цепях электромагнитов. Более подробное описание модели ротора представлено в работах [2, 9].

Постановка задачи управления

Представим управляемый и наблюдаемый объект (1) в стандартном матрично-векторном виде

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu, \quad x(0) = x_0, \\
 y &= Cx,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $x \in R^{n_x}$ – состояние объекта, $y \in R^{n_y}$ – измеряемый выход, $u \in R^{n_u}$ – управление; $A \in R^{n_x \times n_x}$, $B \in R^{n_x \times n_u}$, $C \in R^{n_y \times n_x}$ – заданные матрицы.

Для стабилизации (2) применим закон управления из класса статических обратных связей по выходу. Уравнение соответствующего регулятора имеет вид:

$$u = Ky, \tag{3}$$

где $K \in R^{n_u \times n_y}$ – матрица регулятора.

Уравнение объекта (2) с учетом (3) примет замкнутый вид:

$$\dot{x} = A_c x = (A + BKC)x. \tag{4}$$

Задача заключается в вычислении матрицы регулятора K , обеспечивающей асимптотическую устойчивость замкнутой системы (4). Будем считать, что управление осуществляется первыми переменными состояния. Матрица управления имеет вид:

$$B = \begin{pmatrix} I_{n_u} \\ 0_{(n_x - n_u) \times n_u} \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Будем также предполагать, что измерению доступны n_y первых компонент вектора состояния. Запишем матрицу измеряемого выхода:

$$C = \begin{pmatrix} I_{n_y} & 0_{n_y \times (n_x - n_y)} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Без потери общности будем считать, что относительно размерностей входа и выходы выполняется следующее соотношение:

$$n_u + n_y \leq n_x. \quad (7)$$

Условие (7) можно переписать в виде равенства:

$$n_x = n_u + n_y + r. \quad (8)$$

Синтез регуляторов на основе теоремы Ляпунова об устойчивости

Применим теорему Ляпунова к объекту (4). Производная квадратичной функции Ляпунова $\dot{V}(x) < 0$, где $V(x) = x^T X x > 0$, в силу (4) приведет к матричному неравенству [10]:

$$XA + A^T X + XBKC + C^T K^T B^T X < 0, \quad (9)$$

где $X = X^T > 0$.

Умножив обе части неравенства (9) на матрицу $Y = X^{-1}$, запишем двойственное неравенство:

$$AY + YA^T + BKCY + YC^T K^T B^T < 0. \quad (10)$$

Таким образом, задача синтеза статического регулятора по выходу сводится к решению билинейного матричного неравенства (10) относительно K и Y . В дальнейшем неравенство (10) будет обозначаться аббревиатурой ВМІ. Соответствующие множества поиска являются невыпуклыми, поэтому методы выпуклой оптимизации неприменимы. Для решения таких неравенств разработаны различные алгоритмы [12]. В общем случае задача является NP-трудной.

Приведение ВМІ к симметрической матрице

Рассмотрим другой подход к решению ВМІ. С учетом заданного вида матриц входа и выхода запишем произведение BKC в виде:

$$BKC = \begin{pmatrix} K_{n_u \times n_y} & 0_{n_u \times (n_x - n_y)} \\ 0_{(n_x - n_u) \times n_y} & 0_{n_y \times (n_x - n_y)} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Тогда ВМІ примет следующий вид

$$AY + YA^T + \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} Y + Y \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^T < 0. \quad (12)$$

Поскольку диагональные блоки BKC не являются квадратными, эта матрица в общем случае является несимметрической. С учетом того, что $n_x - n_u = n_y + r$, перегруппируем блоки в матрице BKC таким образом, чтобы на главной диагонали следующим образом:

$$BKC = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} K \\ 0 \end{pmatrix} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Вводя матрицу B_{11} , перепишем матрицу BKC в виде:

$$BKC = \begin{pmatrix} B_{11}K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $B_{11} = \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix}$.

Матрицу A объекта (1) можно представить в блочном виде следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где $A_{22} = -\mu I_4$.

Нижний диагональный блок $A_{22} = -\mu I_4$ является устойчивой матрицей. Введем новую блочную матрицу:

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ \Psi_{12}^T & \Psi_{22} \end{pmatrix} = AY + YA^T. \quad (16)$$

Блоки матрицы Ψ определяются следующим образом:

$$\Psi_{11} = A_{11}Y_{11} + Y_{11}A_{11}^T + A_{12}Y_{12}^T + Y_{12}A_{12}^T, \quad (17)$$

$$\Psi_{12} = A_{11}Y_{12} + A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T + Y_{12}A_{22}^T, \quad (18)$$

$$\Psi_{22} = A_{21}Y_{12} + Y_{12}^T A_{21}^T + A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T. \quad (19)$$

Тогда сумма матриц в (12) примет вид симметрической матрицы, и соответствующее неравенство запишется:

$$\begin{pmatrix} \Psi_{11} + B_{11}KY_{11} + Y_{11}K^T B_{11}^T & \Psi_{12} + B_{11}KY_{12} \\ \Psi_{12}^T + Y_{12}^T K^T B_{11}^T & \Psi_{22} \end{pmatrix} < 0. \quad (20)$$

Неравенство (19) необходимо также дополнить условием положительной определенности матрицы Y . Таким образом, синтез статического регулятора по выходу сводится к решению системы матричных неравенств:

$$\begin{pmatrix} \Psi_{11} + B_{11}KY_{11} + Y_{11}K^T B_{11}^T & \Psi_{12} + B_{11}KY_{12} \\ \Psi_{12}^T + Y_{12}^T K^T B_{11}^T & \Psi_{22} \end{pmatrix} < 0, \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12}^T & Y_{22} \end{pmatrix} > 0.$$

Благодаря выполненным действиям, удалось преобразовать сумму матриц в ВМІ к симметрической матрице. Вместе с тем, из-за наличия слагаемых $B_{11}KY_{11}$ и $B_{11}KY_{12}$, система (21) не является линейной.

Необходимые условия существования статического регулятора по выходу

Поскольку A_{22} является устойчивым, можно рассмотреть решение задачи в классе блочно-однородных матриц. В результате система (21) примет вид:

$$\begin{pmatrix} A_{11}Y_{11} + Y_{11}A_{11}^T + B_{11}KY_{11} + Y_{11}K^T B_{11}^T & A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T \\ (*)^T & A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T \end{pmatrix} < 0, \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & 0 \\ 0 & Y_{22} \end{pmatrix} > 0,$$

где $Y_{ii} > 0$.

Отметим, что при заданной матрице Y_{11} система (22) становится системой линейных матричных неравенств относительно матриц $Y_{22} > 0$ и K . В соответствии с леммой Шура [11], для разрешимости первого неравенства системы (22) необходимо потребовать, чтобы левый верхний блок $\Psi_{11} = \Psi_{11}^T$ был отрицательно определенным:

$$A_{11}Y_{11} + Y_{11}A_{11}^T + B_{11}KY_{11} + Y_{11}K^T B_{11}^T < 0, \quad (23)$$

где $Y_{11} > 0$.

Известно, что для разрешимости (23) необходимо и достаточно, чтобы выполнялось неравенство:

$$W_{B_{11}}^T (A_{11}Y_{11} + Y_{11}A_{11}^T) W_{B_{11}} < 0, \quad (24)$$

где $W_{B_{11}}^T$ образует ядро матрицы B_{11}^T .

Неравенства (23) и (24) являются линейными матричными неравенствами и могут быть решены с помощью стандартных решателей пакета MATLAB [11]. Для разрешимости (24) необходимо и достаточно, чтобы выполнялось ранговое условие управляемости блока A_{11} [1, с. 265]. Если пара (A_{11}, B_{11}) управляема, то неравенство (24) разрешимо. Размерность входа, при котором пара (A_{11}, B_{11}) управляема, составляет $n_u = 4$. Для сравнения, размер-

ность входа при котором пара (A, B) управляема, составляет $n_u = 1$. Применительно к рассматриваемой задаче сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 1. *Необходимым условием существования статического регулятора по выходу, обеспечивающего асимптотическую устойчивость замкнутой системы, является управляемость неустойчивого диагонального блока A_{11} матрицы объекта (15).*

Аналогично можно сформулировать второе необходимое условие относительно нижнего диагонального блока. Это условие сводится к разрешимости следующего линейного матричного неравенства:

$$A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T < 0, \quad (25)$$

где $Y_{22} > 0$.

Поскольку матрица A_{22} гурвицева, неравенство (25) разрешимо. Таким образом, так как пара (A_{11}, B_{11}) управляема и матрица A_{22} гурвицева, оба необходимых условия будут выполнимы. Размерность выхода при этом должна быть равной размерности неустойчивого блока A_{11} .

Алгоритм вычисления

Будем считать, что верхний диагональный блок в первом неравенстве (22) является отрицательно определенным. Следовательно, если статический регулятор существует, при некоторой заданной матрице $Y_{11} > 0$ система (22) будет разрешима относительно матриц $Y_{22} > 0$ и K . Будем считать, что матрица $Y_{11} > 0$ задана из решения (24). Сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 2. *Достаточным условием стабилизации линейного управляемого и наблюдаемого объекта с помощью статического регулятора по выходу, обеспечивающего асимптотическую устойчивость замкнутой системы, является разрешимость системы (22) относительно матриц $Y_{22} > 0$ и K с заданной из решения (24) матрицей Y_{11} .*

Необходимо отметить, что, поскольку решение (24) не гарантирует требуемую матрицу Y_{11} , то система (22) может оказаться неразрешимой, хотя регулятор существует. В таком случае за счет введения скалярной матрицы в неравенство (24) можно получить другое решение и повторить вычисления. Рассмотрим другой подход к решению такой задачи, основанный на изменении матрицы регулятора. Для этого находим матрицу регулятора из решения неравенства (23) при заданной матрице Y_{11} из решения (24). Затем варьируем матрицу K так, чтобы матрица замкнутой системы $A_c = \begin{pmatrix} A_{11} + B_{11}K & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ оказалась устойчивой. Для изменения матрицы регулятора введем следующую скалярную матрицу

$$I_0 = \alpha(I_m \ 0), \quad (26)$$

где α – скалярный параметр.

Верхний диагональный блок матрицы A_c в таком случае будет равен

$$A_{11}(\alpha) = A_{11} + B_{11}(K + \alpha I_0). \quad (27)$$

Задача заключается в поиске такой матрицы регулятора $K^* = K + \alpha I_0$, которая будет обеспечивать гурвицевость матрицы замкнутой системы $A_c = \begin{pmatrix} A_{11}(\alpha) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$. Запишем соответствующий алгоритм.

Алгоритм 1.

1. Решаем неравенство (24) относительно матрицы Y_{11} .
2. Решаем неравенство (23) с заданной матрицей Y_{11} относительно матрицы K .
3. $j = 0$. Проверяем спектральную абсциссу λ_{\max}^0 матрицы $A_c^0 = \begin{pmatrix} A_{11}(\alpha^0) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$ при $\alpha^0 = 0$. Если $\lambda_{\max}^0 < 0$ задача решена. В противном случае, переходим к следующему пункту с $j = j + 1$.
4. Увеличиваем параметр $\alpha^j = \alpha^{j-1} + h$.

5. Проверяем спектральную абсциссу λ_{\max}^j матрицы $A_c^j = \begin{pmatrix} A_{11}(\alpha^j) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$. Если $\lambda_{\max}^j < 0$ задача решена. Если $\lambda_{\max}^j < \lambda_{\max}^{j-1}$, то переходим к предыдущему пункту с $j = j + 1$. В противном случае переходим к следующему пункту.

6. Уменьшаем параметр $\alpha^j = \alpha^{j-1} - h$.

7. Проверяем спектральную абсциссу λ_{\max}^j матрицы $A_c^j = \begin{pmatrix} A_{11}(\alpha^j) & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$. Если $\lambda_{\max}^j < 0$ задача решена. Если $\lambda_{\max}^j < \lambda_{\max}^{j-1}$, то переходим к пункту 6 с $j = j + 1$.

Численные результаты

Применим алгоритм 1 для решения задачи стабилизации по выходу объекта (1) с $n_x = 4$ и $n_y = 8$. Задача оказалась разрешимой при $j = 0$, т.е. когда $\alpha = 0$. Соответствующая матрица регулятора равна:

$$K = \begin{pmatrix} -1.72 & -0.042 & 0 & 0 & -10.09 & 0.09 & 0 & 0 \\ 0.0042 & -1.72 & 0 & 0 & -0.09 & -10.09 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.37 & 0 & 0 & 0 & -3.49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.37 & 0 & 0 & 0 & -3.49 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

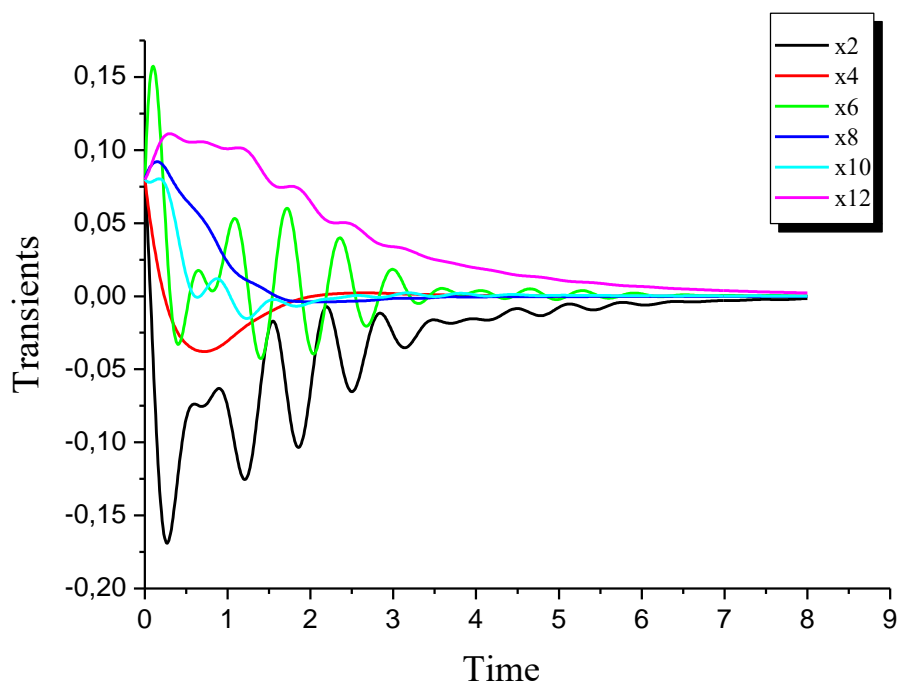


Рис. 2. Переходные процессы

Fig. 2. Transients

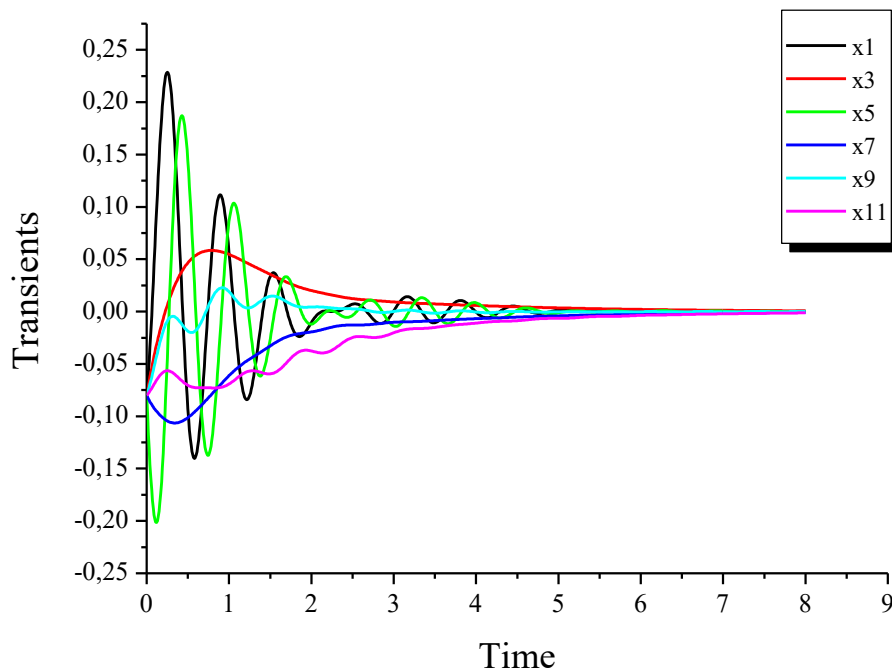


Рис. 3. Переходные процессы

Fig. 3. Transients

Графики переходных процессов в исходном нелинейном объекте с вычисленным статическим регулятором представлены на рис. 2 и 3. Исходный объект содержит следующие нелинейные уравнения [9]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_5 &= \frac{\lambda}{4} \left[-\frac{(1-x_9)^2}{(1-x_4+x_1)^2} + \frac{(1+x_9)^2}{(1+x_4-x_1)^2} + \frac{(1-x_{10})^2}{(1-x_4-x_1)^2} - \frac{(1+x_{10})^2}{(1+x_4+x_1)^2} \right] - \rho x_6, \\
 \dot{x}_6 &= \frac{\lambda}{4} \left[\frac{(1-x_{11})^2}{(1-x_8-x_2)^2} - \frac{(1+x_{11})^2}{(1+x_8+x_2)^2} - \frac{(1-x_{12})^2}{(1-x_8+x_2)^2} + \frac{(1+x_{12})^2}{(1+x_8-x_2)^2} \right] + \rho x_5, \\
 \dot{x}_7 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-x_{11})^2}{(1-x_8-x_2)^2} - \frac{(1+x_{11})^2}{(1+x_8+x_2)^2} + \frac{(1-x_{12})^2}{(1-x_8+x_2)^2} - \frac{(1+x_{12})^2}{(1+x_8-x_2)^2} \right], \\
 \dot{x}_8 &= \frac{1}{4} \left[\frac{(1-x_9)^2}{(1-x_4+x_1)^2} - \frac{(1+x_9)^2}{(1+x_4-x_1)^2} + \frac{(1-x_{10})^2}{(1-x_4-x_1)^2} - \frac{(1+x_{10})^2}{(1+x_4+x_1)^2} \right].
 \end{aligned} \tag{29}$$

Остальные уравнения аналогичны линеаризованной модели (1).

В качестве начальных значений брались следующие величины:

$$\forall i \in \overline{2 \dots n_x}, i = 2m \rightarrow x_i = 0.08, \tag{30}$$

$$\forall i \in \overline{1 \dots n_x - 1}, i = 2m + 1 \rightarrow x_i = -0.08. \tag{31}$$

Численное моделирование показало, что вычисленный регулятор обеспечивает стабилизацию нелинейного объекта в достаточно широком диапазоне начальных возмущений. В частности, вычисленный регулятор обеспечивал стабилизацию замкнутой системы при начальных возмущениях равных $x_i = 0.3$ для $\forall i \in \overline{1 \dots n_x}$.

Заключение

Рассмотрена задача управления по выходу вертикально вращающегося ротора в электромагнитных подшипниках. В рамках решения задачи сформулированы необходимые условия существования регулятора, выражаемые в форме линейных матричных неравенств. По-

строен статический регулятор по выходу для случая, когда измеряемыми переменными являются смещения центра масс ротора, а скорости изменения этих переменных определяются численно. Результаты моделирования динамики ротора показали возможность управления объектом на основе измерения смещений. Исходный нелинейный объект оказывается устойчивым в достаточно широком диапазоне начальных возмущений.

Дальнейшей задачей, представляющей большой практический интерес, является применение описанного подхода для построения нечеткого статического регулятора по выходу, стабилизирующего исходный нелинейный объект.

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

Библиографический список

1. **L. Li.** Linearizing magnetic bearing actuators by constant current sum, constant voltage sum, and constant flux sum [Text] // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. Pp. 528-535.
2. **Баландин, Д.В.** Управление движением вертикального жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках [Текст] / Д.В. Баландин, М.М. Коган // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 5. С. 3-17.
3. **C.R. Sabirin, A. Binder, D.D. Popa, A. Crăciunescu.** Modeling and digital control of an active magnetic bearing system [Text] // Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergetique. 2007. V. 52. № 2. Pp. 157-181.
4. **T. Hu, Z. Lin, W. Jiang.** Constrained control design for magnetic bearing system [Text] // Trans. ASME. J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2005. V. 127. Pp. 601-616.
5. **Y. Ariga, K. Nonami, K. Sakai.** Nonlinear control of zero power magnetic bearing using Lyapunov's direct method [Text] // Proc. 7th Int. Symp. on EB. Zurich: ETH. 2000. Pp. 23-25.
6. **A.D. Franco, H. Bourles, E.R. De Pierli.** A robust nonlinear controller with application to a magnetic bearing system [Text] // Proc. 44th IEEE Conf. on Decision and Control. 2005. Pp. 4927-4932.
7. **J. Levine, J. Lottin, J.C. Ponsatr.** A nonlinear approach to the control of magnetic bearings [Text] // IEEE Trans. On Control Systems Technology. 1996. V. 4. № 5. Pp. 524-544.
8. **Davoodi M., Sedgh P.K., Amirifar R.** H_2 - and H_∞ - Dynamic Output Feedback Control of a Magnetic Bearing System via LMIs [Text] // Proc. American Control Conf. Washington, USA, 2008. Pp. 2522-2527.
9. **Мухин, А.В.** Математическое моделирование процесса стабилизации жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках [Текст] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 36-48.
10. **Баландин, Д.В.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств [Текст] / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007.
11. **Gahinet P., Nemirovski A., Laub A. J., Chilali M.** The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide-Natick [Text] MA: The MathWorks, Inc., 1995.
12. **Sadabadi M. S., Peaucelle D.** From static output feedback to structured robust static output feedback: A survey [Text] // Annual Reviews in Control. 2016. V. 42. Pp. 11-26.

*Дата поступления
в редакцию: 30.03.2022*

УДК 004.92

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_26

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В MATHCAD

Е.А. НикулинORCID: 0000-0002-2520-681X e-mail: nea@mail.nnov.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор существующих в пакете MathCAD 15 средств генерации шумов и их фильтрации в растровых изображениях. Разработаны новые методы медианной фильтрации: с произвольными размерами прямоугольного окна и с оптимальными размерами квадратного окна, адаптивно подбираемыми в каждом пикселе изображения. Предложенные алгоритмы и реализующие их функции скомпонованы в законченные MathCAD-программы, очищающие изображения от различных помех с разными качественными показателями. Показана особая эффективность алгоритма адаптивной медианной фильтрации с настраиваемыми размерами окна.

Ключевые слова: изображение, шум, фильтрация, медиана, адаптивный алгоритм, MathCAD.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никулин, Е.А. Адаптивное управление медианной фильтрацией изображений в MathCAD // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 26-35. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_26

ADAPTIVE CONTROL OF MEDIAN FILTERING OF IMAGES IN MATHCAD

Е.А. NikulinORCID: 0000-0002-2520-681X e-mail: nea@mail.nnov.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Overview of existing in the MathCAD 15 package means of noise generation and filtering thereof in bitmap images, is presented. New median filtering methods are developed: with arbitrary rectangular window sizes and with optimal square window sizes adaptively selected in each pixel of the image. Proposed algorithms and functions implementing thereof are compiled into complete MathCAD programs that clean images from various interferences with different quality indicators. Special efficiency of the adaptive median filtering algorithm with adjustable window sizes, is shown.

Key words: image, noise, filtering, median, adaptive algorithm, MathCAD.

FOR CITATION: Nikulin E.A. Adaptive control of median filtering of images in MathCAD. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 26-35. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_26

Введение

Одной из важнейших задач компьютерной обработки изображений, представленных в виде матриц монохромных либо цветных пикселей, является фильтрация шумов, искажающих цветовые коды, в основном, случайным образом, по различным вероятностным законам. Помехи можно условно разделить на импульсные (искажены отдельные пиксели), линейные (царапины в виде цепочек пикселей) и площадные (сплошные пятна пикселей). Задача компьютерной фильтрации шумов в изображениях, основательно изученная в [1, 2], заключается в обнаружении и устранении этих помех с помощью алгоритмов и реализующих их программ. Наиболее популярным, но не самым эффективным, размывающим границы объектов, является линейный метод усреднения в маске, скользящей по матрице изображения.

Настоящая статья, посвященная решению задачи фильтрации в программной среде MathCAD [3], кратко знакомит с необходимыми встроенными функциями обработки изображений. Раскрываются некоторые эффекты их использования и более обстоятельно представляются усовершенствованные автором нелинейные алгоритмы медианной фильтрации, дающие подчас удивительные результаты очистки сильно зашумленных изображений. Моделью исследований служит монохромный фрагмент портрета знаменитой Джоконды.

Генерация шумов в MathCAD

Рассмотрим способы управляемого добавления пиксельных шумов в растровые изображения, после чего те могут служить основой для испытания методов шумоподавления в отсутствие реальных зашумленных рисунков.

Самой первой в категории «Обработка изображений» панели «Вставка функции» стоит функция $\text{addnoise}(M, p, s)$, которая с равными вероятностями $p/2$ увеличивает либо уменьшает код каждого элемента матрицы M точно на s единиц. При выходе измененного кода из байтового интервала $\Delta = [0, 255]$ он самой функцией автоматически сдвигается на его ближайшую границу, тем самым исключая сдвиг кодов шаблоном рисунка в Δ на ± 256 . Добавление импульсного шума с разными вероятностями p и фиксированными смещениями s реализовано в верхнем ряду изображений на рис. 1. Они демонстрируют уплотнение импульсных помех с ростом вероятности их появления в половине пикселей при $p=0.5$ и в каждом при $2p=1$, а также повышение контраста зашумленных точек с окружающим фоном при увеличении параметра разброса от $s=50$ до удвоенного $2s=100$.

В отсутствие в MathCAD других встроенных функций зашумления матричных изображений создадим пользовательские функции:

$$\text{unif}(c, s) := \text{runif}(1, c - s, c + s)_0, \quad \text{norm}(c, s) := \text{rnorm}(1, c, s)_0 \quad (1)$$

переменных смещений числа c , использующие встроенные функции генерирования случайных векторов: runif для равномерно распределенных элементов векторов в интервале $(c-s, c+s)$ и rnorm для нормально распределенных элементов с матожиданием (МО), равным c , и среднеквадратичным отклонением (СКО), равным s . По свойству нормального распределения 99,73 % смещенных чисел лежат вокруг значения c в интервале $(c-3s, c+3s)$.

Анализ изображений во втором ряду рис. 1 подтверждает вполне ожидаемые эффекты расположения случайных пиксельных шумов и формирования их интенсивностей:

- плотности равномерно и нормально распределенных пиксельных помех при одинаковых значениях параметра разброса s заметно отличаются друг от друга из-за практически втрое большей ширины интервала расположения гауссовских случайных чисел в сравнении с интервалом локации равномерных;
- цвет большинства точечных помех в матрицах, полученных векторизацией функций (1) от матрицы M , оказался противоположным цвету окружающих фоновых пикселей по принципу «соль и перец» — светлые точки на темном фоне и темные — на светлом.

При этом с удвоением параметра разброса s такой контрастный шум почти полностью «забил» исходное изображение. В реальности выводимые матрицы таких помех не имеют, а «перец» на светлом челе Моны Лизы и белая «соль» на ее темных волосах — всего лишь иллюзия. Такие эффекты инверсии цвета пикселей объясняются тем, что в них зашумленные матрицы имеют внебайтовые коды, которые шаблоном рисунка лишь *визуально* конвертируются в интервал Δ путем параллельного сдвига на ± 256 .

Поручим приведение случайных чисел, сгенерированных в (1), в байтовый диапазон Δ следующим функциям:

$$\text{uni}(c, s) := \min(\max(\text{unif}(c, s), 0), 255), \quad \text{nor}(c, s) := \min(\max(\text{norm}(c, s), 0), 255). \quad (2)$$

В нижнем ряду рис. 1 в изображениях, зашумленных функциями (2), эффекты конвертации, присущие шаблону вывода рисунка, исчезли.

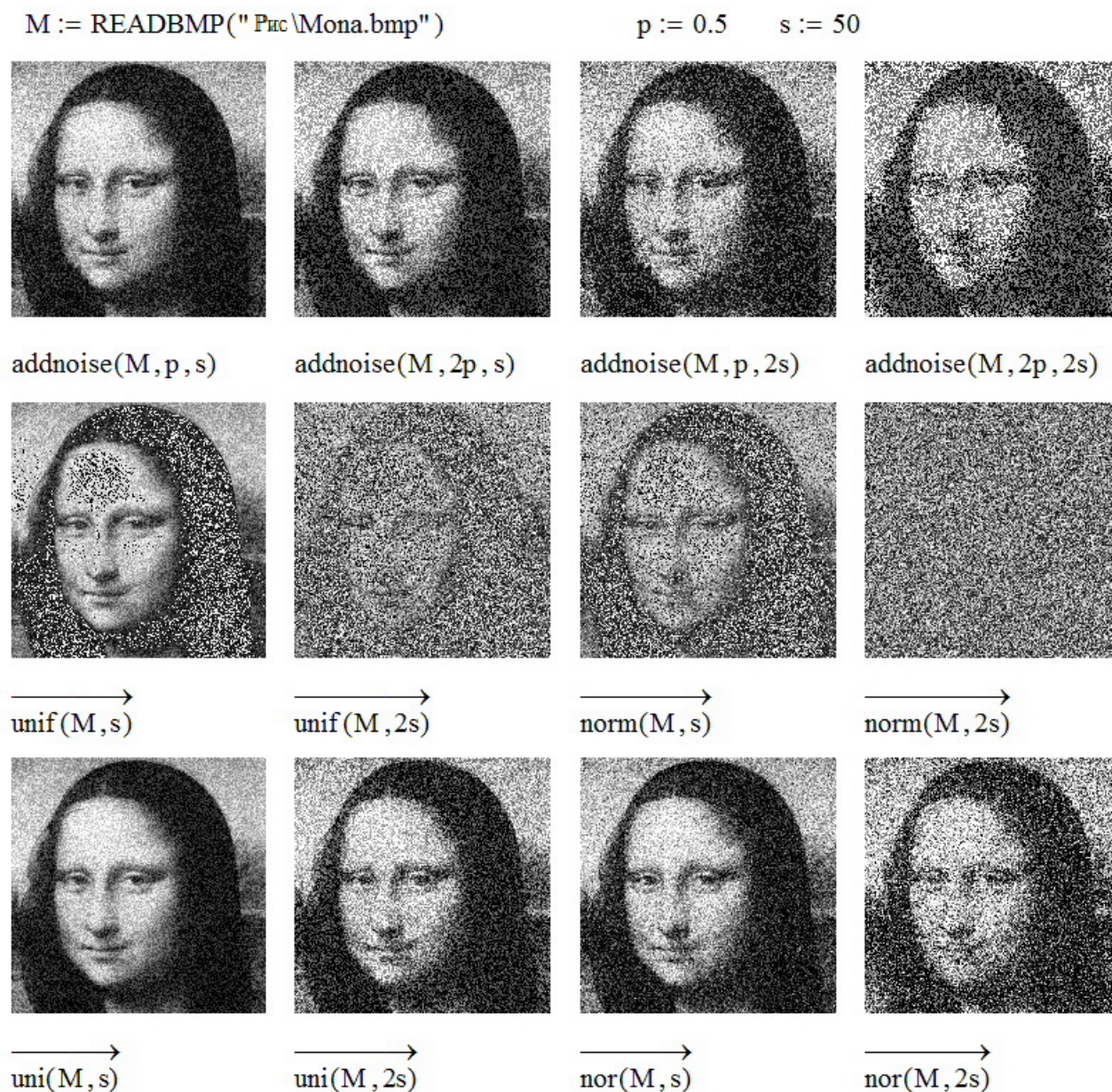


Рис. 1. Импульсный шум в изображениях

Fig. 1. Impulse noise in images

Функции линейной фильтрации изображений в MathCAD

Переходим к решению задачи фильтрации шума с помощью встроенных функций MathCAD, собранных в категории «Обработка изображений» панели «Вставка функции» и предназначенных для *сглаживания* импульсных помех в монохромных изображениях. Методы подавления помех разделяются на пространственные и частотные [1, 2], но из-за ограниченности возможностей протестировать здесь все функции будут рассмотрены лишь некоторые из них, выполняющие *пространственную* фильтрацию.

Как в радиотехнике для устранения пульсаций сигнал пропускается через фильтр низких частот, так и в обработке изображений, зашумленных пиксельными помехами, используется обладающий интегрирующим свойством *метод усреднения* яркостей пикселей в окружающем обрабатываемую точку прямоугольном *окне* (ядре, маске, апертуре) $W \in \mathbb{R}^{H \times D}$ *нечетных* размеров H и D с полями шириной сверху и снизу по $h=(H-1)/2$, а слева и справа по

$d=(D-1)/2$. Общее свойство всех масок, сохраняющее яркости пикселей однотонного фона, – сумма всех элементов W_{yx} равна единице. Яркость (i,j) -го пикселя матрицы $M \in \mathbb{R}^{(m+1) \times (n+1)}$ в окне $W \in \mathbb{R}^{(2h+1) \times (2d+1)}$, центрированном в элементе M_{ij} , рассчитывается по формуле:

$$S_{ij} = \sum_{y=\max\{-h,-i\}}^{\min\{h,m-i\}} \sum_{x=\max\{-d,-j\}}^{\min\{d,n-j\}} W_{yx} M_{i+y,j+x} \quad \forall i \in [0,m], j \in [0,n]. \quad (3)$$

Результирующая матрица свертки S имеет такие же размеры, как и матрица M . Указанные в (3) пределы сумм предотвращают при неполном покрытии окна выход индексов элементов на краях матрицы M за пределы интервалов $[0,m]$ и $[0,n]$, обеспечивая выполнение неравенств $0 \leq i+y \leq m$ и $0 \leq j+x \leq n$. При полном покрытии матрицей окна $y=-h\dots h$ и $x=-d\dots d$.

На рис. 2 продемонстрирована работа имеющихся в MathCAD функций сглаживания со встроенными в них масками

$$W_3 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad W_5 = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad W_c = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad W_{03} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad W_{05} = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} :$$

- $\text{unismooth}(M)$ и $\text{unismooth5}(M)$ с однородными масками W_3 и W_5 ;
- $\text{centsmooth}(M)$ с центрально-взвешенным 3×3 -окном W_c , вносящим вдвое больший вес цвета сглаживаемого пикселя M_{ij} в общую сумму (3) с целью уменьшения размытия границ полезных фигур изображения;
- $\text{orthosmooth}(M)$ и $\text{orthosmooth5}(M)$ с ортогонально-взвешенными масками W_{03} и W_{05} , также уменьшающими размытие и расфокусировку кромок фигур в сравнении с однородными окнами тех же размеров.

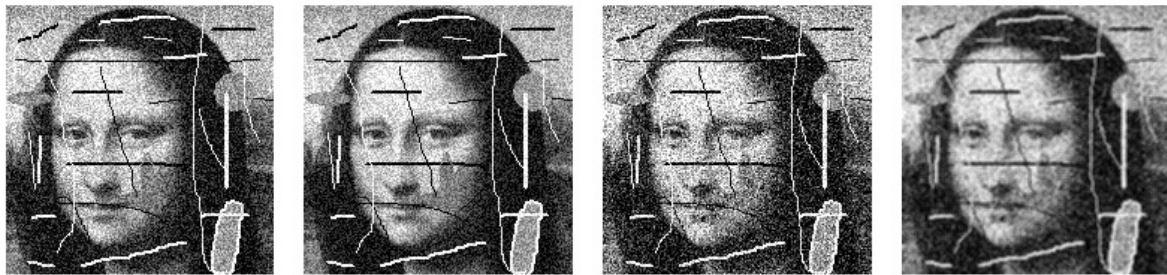
В нижнем ряду рис. 2 показано применение функций $\text{convol2d}(M,W)$, $\text{convolve3}(M,W_{c3})$ и $\text{convolve5}(M,W_{c5})$ фильтрации с внешне задаваемыми окнами: $W \in \mathbb{R}^{H \times D}$ произвольных размеров $\{H, D\}$ и квадратными масками фиксированных размеров $W_{c3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ и $W_{c5} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$.

Работа перечисленных функций оконной фильтрации продемонстрирована на примере изображения $M = \langle \text{Царап.bmp} \rangle$, созданного в графическом редакторе путем нанесения на рисунок $\langle \text{Мона.bmp} \rangle$ линейных (царапин разных толщин и направлений) и площадных (пятен разных размеров и форм) помех. Последующие добавления в матрицу M пиксельных шумов функциями $\text{addnoise}(M,0.5,s)$, $\text{uni}(M,s)$ и $\text{nor}(M,s)$ с параметром разброса $s=50$ сформировали матрицы Ma , Mu и Mn . Анализ этих изображений и результатов их фильтрации привел к следующим выводам:

- из трех типов пиксельного шума наименее плотным является фиксированный, равновероятно добавленный в матрице Ma к элементам M_{ij} как 0 либо ± 50 ; из оставшихся менее зернистым и контрастным выглядит равномерно распределенный в интервале $(-50,50)$ шум в матрице Mu , а наиболее контрастным – нормально распределенный с 99,73 % интервалом $(-150,150)$ гауссовский шум в матрице Mn ;
- все методы оконного сглаживания обладают присущим им свойством *размытия* как отдельных пикселей, так и границ широких царапин и пятен, расширяющим резкие перепады яркостей в пологие блеклые площадки и полосы; размытие границ проявляется тем сильнее, чем больше размеры окна фильтрации;
- с увеличением размера окна появляется и далее расширяется черная окантовка изображения, что объясняется меньшим количеством усредняемых пикселей, накрытых окном на краях рисунка;
- в нижнем ряду рис. 2 показана возможность применения не встроенных в функции свертки, а внешне задаваемых масок. Однострочное $W = [1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 4 \ 2 \ 1]/22$ и одностолбцовое W^T окна избирательно сглаживают функцией convol2d вертикальные и горизонтальные

тонкие царапины. Там же видно действие двух квадратных окон: крестовидного $W3$ и квадратного $W5$, усредняющего 24 числа, окружающих M_{ij} .

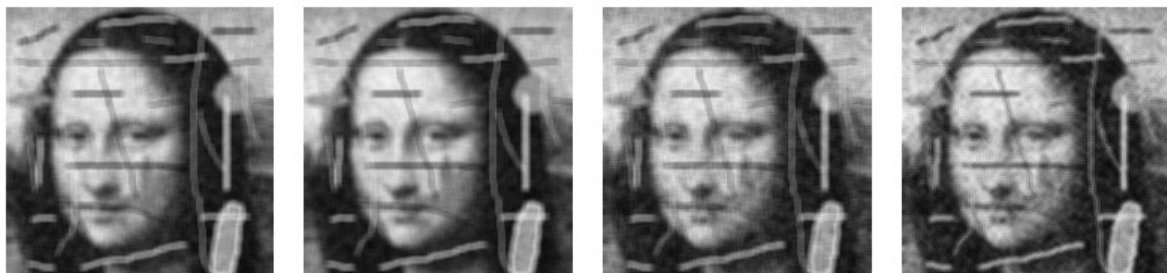
```
M := READBMP("Рис.Царап.bmp")
s := 50  Ma := addnoise(M, 0.5, s)
Mu := uni(M, s)  Mn := nor(M, s)  W3 := 1/6 * [0 1 0; 1 2 1; 0 1 0]  W5 := 1/24 * [1 1 1 1 1; 1 1 1 1 1; 1 1 0 1 1; 1 1 1 1 1; 1 1 1 1 1]
W := (1 2 4 8 4 2 1) ÷ 22
```



Ma Mu Mn centsmooth(Mn)



unismooth(Ma) unismooth(Mu) unismooth(Mn) orthosmooth(Mn)



unismooth5(Ma) unismooth5(Mu) unismooth5(Mn) orthosmooth5(Mn)



convol2d(Mn, W) convol2d(Mn, W^T) convolve3(Mn, W3) convolve5(Mn, W5)

Рис. 2. Встроенные функции линейной фильтрации

Fig. 2. Built-in Line Filtering Functions

Медианная фильтрация изображений

Возможности оконной фильтрации изображений не исчерпываются линейным алгоритмом (3). Среди других, *нелинейных* операций с яркостями пикселей, попавших в скользящее по рисунку окно, можно назвать выборку минимального, максимального, средних квадратичного, геометрического, гармонического и других математических величин, например, *медианы* – срединного по расположению числа в упорядоченной по возрастанию последовательности чисел.

Работа встроенного *медианного фильтра* $\text{medfilt}(M)$, предназначенного для очистки монохромных изображений M от импульсных (пиксельных) помех, основана на поочередном совмещении центра квадратного окна фиксированного размера 3×3 с каждым пикселем рисунка M_{ij} , сортировке яркостей покрытых окном пикселей и запоминании в элементе возвращаемой матрицы S_{ij} медианы этой последовательности.

Желая реализовать свойства ориентированной (горизонтальной или вертикальной) линейной фильтрации, присущей функции convol2d , создадим универсальный аналог медианного фильтра матрицы M с окном произвольных размеров $H \times D$, где H и D — *нечетные* (1, 3, 5, 7, ...) габариты окна с полями вокруг центральной точки шириной сверху и снизу $h=(H-1)/2$, а слева и справа $d=(D-1)/2$ пикселей. В приведенной ниже функции $\text{medfilW } H \times D$ -окно, сканирующее все пиксели матрицы M , можно задавать не только квадратным, но и как в функции convol2d , *прямоугольным*, в том числе, однострочным ($H=1, h=0$) или одностолбцовым ($D=1, d=0$). Это позволяет фильтровать не только импульсные, но и координатно ориентированные *сплошные* протяженные помехи типа царапин и трещин, а именно: горизонтальные царапины рекомендуется сглаживать вертикальными $H \times 1$ -масками, а вертикальные – горизонтальными масками размерами $1 \times D$.

```

medfilW(M, H, D) := | "Медианный фильтр в окне размером H*D"
                    | [ n ← cols(M) - 1  h ← (H - 1) ÷ 2  d ← (D - 1) ÷ 2 ]
                    | for i ∈ 0..m ← rows(M) - 1
                    |   | ( y ← max(0, i - h)  Y ← min(m, i + h) )
                    |   | for j ∈ 0..n
                    |   |   | ( x ← max(0, j - d)  X ← min(n, j + d) )
                    |   |   | Si,j ← median(submatrix(M, y, Y, x, X))
                    | S

```

Сверху и справа на рис. 3 показаны изображение N , полученное импульсным нормально распределенным зашумлением поцарапанного рисунка $M=\langle\text{Царап.bmp}\rangle$ функцией $\text{nor}(M,s)$ с СКО $s=50$ и результаты его медианной фильтрации MathCAD-функцией medfilt в окне 3×3 и универсальной функцией medfilW в квадратных окнах $3 \times 3 \div 9 \times 9$. Очевидно, что в 3×3 -окне обе функции работают одинаково. Во втором и третьем рядах сконструированная функция medfilW испытана на неквадратных окнах.

Сопоставление размеров, плотности, яркости и контраста оставшихся на изображениях шероховатостей позволяет сделать новые выводы и подтвердить ранее сделанные предсказания о свойствах медианной фильтрации монохромных изображений окнами разных размеров и конфигураций:

- импульсные (точечные) помехи расплылись в пятна, размер которых примерно совпадает с размером окна фильтрации; что касается наблюдаемого контраста пиксельных помех с окружающим фоном, с ростом размера окна от 3×3 до 9×9 он неуклонно уменьшается вплоть до еле различимого;



Рис. 3. Универсальная медианная фильтрация

Fig. 3. Universal Median Filtering

- это же свойство размывания точечных помех приводит к расплыванию и ухудшению четкости границ не только площадных шумов (пятен), но и полезных фигур, составляющих сюжет изображения; при этом наиболее сильно размываются границы, ориентированные вдоль максимального размера окна;
- медианная фильтрация справляется с возложенной на нее задачей качественнее, чем функции линейного сглаживания, работа которых показана на рис. 2; особенно наглядно ее преимущества проявляются при устранении шумов в виде отдельных точек и линий толщиной менее половины максимального размера окна (после сортировки экстремальные яркости пикселей окна группируются на краях числовой последовательности («перец» в начале, «соль» в конце), оставляя в середине (медиане) яркости фоновых пикселей, благодаря чему контраст зашумленного пиксела в центре окна существенно понижается);
- горизонтальные царапины хорошо сглаживаются вертикально вытянутыми окнами фильтра, а вертикальные – горизонтальными окнами; наклонные и толстые штрихи следует устранять медианным фильтром с квадратным окном;
- помехи в форме пятен размерами более, чем $\max\{H, D\}$, фильтруются плохо, сглаживаются только их контрастные границы.

Адаптивная медианная фильтрация изображений

Приведенные примеры медианной фильтрации зашумленного изображения M как встроенной функцией $\text{medfilt}(M)$ с фиксированным 3×3 -окном, так и универсальной функцией $\text{medfilW}(M, H, D)$ с окнами произвольных размеров $H \times D$ демонстрируют разное качество удаления шумов различного типа и ставят закономерные вопросы о выборе оптимального размера окна и правомочности применения одного и того же размера на всех участках изображения, отличающихся разными яркостями, плотностями и типами помех. Ответом на эти вопросы является усовершенствование предложенного в [1] алгоритма *адаптивной медианной фильтрации* изображения $M \in \mathbb{R}^{(m+1) \times (n+1)}$, подбирающего в каждом пикселе M_{ij} с индексами $i \in [0, m]$ и $j \in [0, n]$ наиболее подходящий размер квадратного $(2d+1) \times (2d+1)$ -окна, начиная с минимальной ширины всех полей вокруг его центральной точки $d=1$. Перед алгоритмом ставятся следующие цели:

- удалить бинарные (черные и белые) импульсные помехи и максимально сгладить шумы с другими функциями распределения (равномерными, нормальными и т. п.);
- минимизировать размытие границ протяженных объектов, составляющих основу сюжета изображения.

Реализующая эти задачи функция

```
medfilA(M) := | "Адаптивный медианный фильтр"
               | D ← floor(min(m ← rows(M) - 1, n ← cols(M) - 1) ÷ 2)
               | for i ∈ a ← 0..m
               |   for j ∈ 0..n
               |     for d ∈ 1..D
               |       | ( y ← max(f ← 0, i - d)  Y ← min(m, i + d) )
               |       | O ← submatrix(M, y, Y, max(0, j - d), min(n, j + d))
               |       | ( mi ← min(O)  me ← median(O)  ma ← max(O) )
               |       | ( f ← 1  break ) if mi < me < ma
               |       | [ Ai,j ← if[(mi < Mi,j < ma) · f, Mi,j, me]  a ← max(a, d) ]
               | ( A 2a + 1 )
```

настраивает во вложенном цикле $i=0, m, j=0, n$ для каждого пиксела изображения M_{ij} его адаптивную медианную яркость A_{ij} , руководствуясь следующей логикой:

- во внутреннем цикле $d=1, D$, где $D = \lfloor \min\{m, n\} / 2 \rfloor$, производится поиск ширины поля $d \leq D$, при которой размер окна $(2d+1) \times (2d+1)$ не превышает минимального размера изображения $2D+1$. Для этого из матрицы M выбирается прямоугольный блок O покрытых окном пикселей и вычисляются их экстремальные $mi = \min\{O\}$, $ma = \max\{O\}$ и медианное $me = \text{median}\{O\}$ значения яркостей;
- при выполнении неравенств $mi < me < ma$ бинарные шумы, попавшие в окно, сгруппируются на краях упорядоченной последовательности $\text{sort}(O)$ – «перец» на левом, а «соль» на правом. Если при этом еще и $mi < M_{ij} < ma$, то центр окна также не будет засорен бинарным шумом, что позволяет сохранить его яркость M_{ij} в (i, j) -м элементе возвращаемой матрицы $A_{ij} = M_{ij}$ и минимизировать искажения, вносимые обработкой изображения. В противном случае при $mi = M_{ij}$ либо $M_{ij} = ma$ сохраняется менее зашумленное медианное значение $A_{ij} = me$, соответствующее обычному медианному фильтру;
- если же $mi = me$ либо $me = ma$, то экстремальные яркости заполнили не менее половины окна O . Это бывает при большой плотности шумов и недостаточном значении d . После инкрементирования $d++$ выполнение предыдущего шага повторяется до тех пор, пока $d \leq D$;

- по окончании цикла подбора величины d элементу матрицы A_{ij} присваивается значение медианы me как наиболее компромиссного результата фильтрации.

Функция $medfilA(M)$, работа которой иллюстрируется на рис. 4, возвращает список, включающий матрицу адаптивно-медианных яркостей A и максимально достигнутый размер $a=2d_{max}+1$ квадратного $a \times a$ -окна, где d_{max} – максимальный размер поля, полученный во всех циклах подбора значений d для всех пикселей изображения M_{ij} .

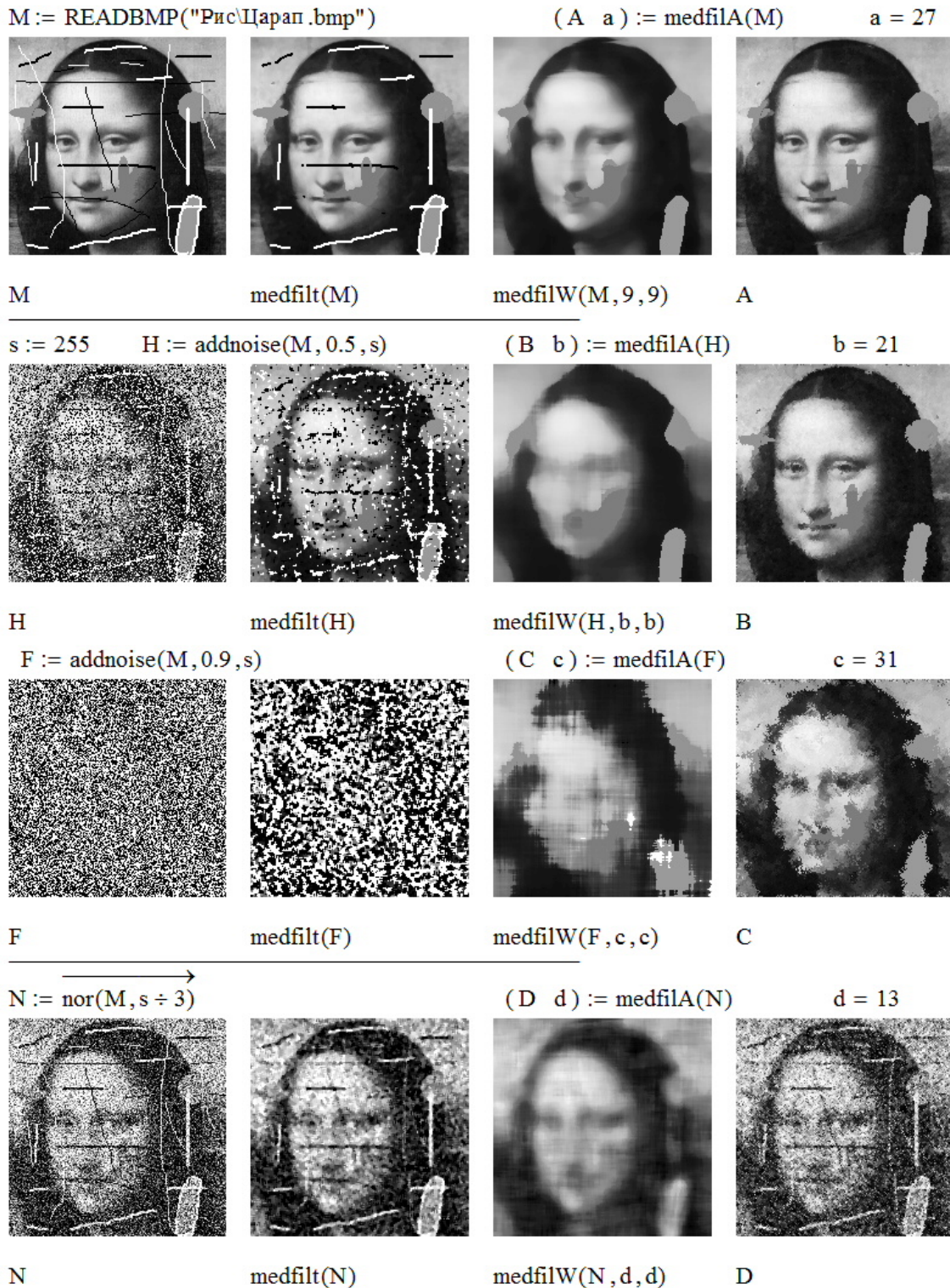


Рис. 4. Сравнение функций медианной фильтрации

Fig. 4. Comparison of median filtering functions

В представленной программе проведено сравнение трех медианных алгоритмов фильтрации изображения M =«Царап.bmp», содержащего царапины и пятна разных размеров и яркостей. В верхнем ряду встроенный фильтр $medfilt(M)$ смог удалить своим 3×3 -окном только тонкие, толщиной в один пиксел, царапины, тогда как адаптивный фильтр $medfilA(M)$ с максимальной шириной окна $a=27$ удалил их все, сохранив при этом четкость границ. Для сравнения алгоритм $medfilW(M,9,9)$ с вручную подобранными размерами окна 9×9 , удалившими следы царапин, сильно размыл контуры фигуры. В двух центральных рядах к изображению M добавлены импульсные шумы $addnoise(M,p,s)$ с параметром $s=255$, делающим их бинарными. При вероятности $p=0.5$ функция $medfilA(H)$ с максимальным размером окна $b=21$ удалила и их, и царапины полностью и без размытия границ сплошных объектов, чего не смог сделать алгоритм $medfilW(H,b,b)$ с фиксированным $b \times b$ -окном. И даже при 90 % плотности импульсного шума, полностью скрывшего исходный рисунок в хаосе изображения F , алгоритм $medfilA(F)$ с максимальным размером окна $c=31$ смог более-менее «вытянуть» знакомый образ по сравнению с сильно смазанным изображением $medfilW(F,c,c)$, полученным при постоянном размере окна $c \times c$. Наконец, в нижнем ряду показаны весьма посредственные результаты фильтрации, в том числе, и адаптивной, гауссовского шума в изображении N .

Выводы

Сравнение встроенных в MathCAD функций фильтрации шумов в растровых изображениях и вновь разработанных алгоритмов и функций медианной фильтрации однозначно показало более высокое качество очистки последними разнообразных помех – импульсных, линейных и сплошных.

Библиографический список

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Яне, Б. Цифровая обработка изображений [Текст] / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
3. Кирьянов, Д.В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1/0 [Текст] / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

*Дата поступления
в редакцию: 14.03.2022*

УДК 658.512

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_36

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ В ЗАДАЧАХ ОБЪЕМНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ДАННЫХ

М.Х. Прилуцкий

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: pril@iani.unn.ru

Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
Саров, Россия

О.В. Кривошеев

ORCID: 0000-0002-9987-591X e-mail: OLvkrivosheev@rosatom.ru

Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
Саров, Россия

Рассматриваются задачи объемного планирования в условиях неполноты данных. Построена общая математическая модель, в рамках которой поставлена многокритериальная задача объемного планирования. Предложены процедуры восполнения недостающих исходных данных, основанные на методах машинного обучения. Предложен эффективный алгоритм решения задачи объемного планирования, основанный на последовательном решении систем линейных двусторонних алгебраических неравенств транспортного типа.

Ключевые слова: производственные ресурсы, объемное планирование, неполнота исходных данных, методы машинного обучения, многокритериальная задача, решение систем линейных двусторонних алгебраических неравенств.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прилуцкий, М.Х. Распределение производственных ресурсов в задачах объемного планирования в условиях неполноты данных / М.Х. Прилуцкий, О.В. Кривошеев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 36-43. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_36

DISTRIBUTION OF PRODUCTION RESOURCES IN VOLUMETRIC PLANNING PROBLEMS UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE DATA

M.Kh. Prilutsky

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: pril@iani.unn.ru

Russian Federal Nuclear Center –
The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

O.V. Krivosheev

ORCID: 0000-0002-9987-591X e-mail: OLvkrivosheev@rosatom.ru

Russian Federal Nuclear Center –
The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

Abstract. Problems of volumetric planning under conditions of incomplete data are considered. A general mathematical model is constructed, within the framework of which a multi-criteria problem of volumetric planning is set. Procedures for filling of missing source data based on machine learning methods, are proposed. Effective algorithm for solving of the volumetric planning problem is proposed, based on the sequential solution of systems of linear bilateral algebraic inequalities of transport type.

Key words: production resources, extensive planning, incomplete initial data, machine learning methods, multi-criterion task, solving of systems of linear bilateral algebraic inequalities.

FOR CITATION: M.Kh. Prilutsky, O.V. Krivosheev. Distribution of production resources in volumetric planning problems under conditions of incomplete data. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 36-43. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_36

Введение

Процесс распределения производственных ресурсов [1] определяется довольно общей концепцией, в рамках которой рассматривается широкий класс задач распределения ресурсов, относящихся к теории расписаний [2] и формализуемых в сетевых канонических структурах. Принципиальная сложность, помимо большой размерности, заключается в том, что проблематично точно задать исходные параметры, особенно когда речь идет о планировании производства новых высокотехнологичных изделий. Поэтому для ряда исходных параметров вместо точного и подробного описания числовых значений необходимо оперировать с обобщенными, приближенными оценками, использование которых приводит, как правило, к неадекватным результатам. Подобные системы мы будем называть *системами распределения производственных ресурсов в условиях неполноты данных*.

Задачи этого класса всегда актуальны: это обусловлено значительным многообразием сфер производственной деятельности, порождающих подобные проблемы. К наиболее типичным в этом случае отраслям производства, где находят применение задачи распределения ресурсов, относятся: организационно-экономические (управление производственной деятельностью, цифровизация процессов управления, планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ); разработка программного обеспечения; изготовление сложных наукоемких изделий; строительство объектов и инфраструктуры; управление ресурсами многопроцессорных вычислительных комплексов при использовании технологий параллельных вычислений и др.

1. Содержательное описание проблемы распределения производственных ресурсов при решении задач планирования в условиях неполноты данных

В рамках концепции [2] будем моделировать процессы распределения производственных ресурсов сетевой канонической структурой – взвешенными ориентированными графами без петель и контуров, элементам которых поставлены в соответствие определенные характеристики. Проблема оптимального планирования заключается в определении порядка выполнения заданной совокупности работ и стратегии распределения ресурсов между работами, при которых определенные обобщенные показатели функционирования системы принимают экстремальные значения.

Особенностями рассматриваемых производственных систем являются условия неполноты данных. Для выделенных фрагментов текущего плана производства, где еще не определена полная технология изготовления, не выделены конкретные единицы необходимых ресурсов, а заданы лишь группы соответствующих ресурсов – рабочие группы, подразделения, цеха и др., требуется предоставлять возможность учитывать для работ соответствующие им ресурсы с разным уровнем детализации. Детализация зависит от текущей проработки технологического процесса. Поэтому математические модели, формализующие процессы планирования, должны позволять одновременно описывать ресурсы с различным уровнем детализации. Для этого при распределении производственных ресурсов в условиях неполноты данных осуществляется перестроение входных параметров модели изготовления изделий. Это происходит следующим образом: в случае неполного описания группы операций, например, комплектов, узлов или подузлов, происходит замена на объединенную операцию, потребляемый ресурс которой определяется как новый ресурс, представляющий собой объединение ресурсов, соответствующих объединяемым операциям. Длительность и гранулярность таких

объединенных операций задаются пользователем, исходя из доступной информации о «близких» технологических процессах, которые предприятие уже использовало в своей практике. Такой подход обладает следующими важными преимуществами:

- в модели могут одновременно присутствовать как изделия с детализированным, так и с неполным описанием технологического процесса;
- степень детализации изделий с неполным описанием может управляться путем различной гранулярности объединяемых операций. В объединенную операцию могут быть включены операции, которые определяются исходя из доступной у пользователя информации о «близких» технологических процессах, которые предприятие уже использовала в своей практике.

Для реализации указанного подхода, с целью повышения достоверности решения задач распределения производственных ресурсов в условиях неполноты данных, могут быть использованы методы машинного обучения. Канонический подход к решению комплекса задач производственного планирования включает в себя взаимосвязанную последовательность задач планирования [2]. Это – задачи объемного планирования, объемно-календарного планирования и сменно-суточного планирования. В задаче объемного планирования исходные данные, определяющие математическую модель, учитываются без конкретизации. Решается задача распределения общего плана предприятия по различным показателям искомого плана, таким как заказы, изделия, комплекты, узлы, такты планирования, подразделения предприятия, группы ресурсов, ресурсы и др. План предприятия в задачах объемного планирования задается в объемных показателях (нормо-часы, рубли, условные тонны). В задаче объемно-календарного планирования уже учитываются номенклатура изделий, время функционирования системы. Каждая работа для своего выполнения использует определенную совокупность ресурсов согласно заданному для этой работы технологическому маршруту. Для каждой работы определены время и затраты ресурсов на ее выполнение, которое характеризуется не только потреблением, но и производством ресурсов (полуфабрикатов), используемых в дальнейшем процессе производства. При обычных для таких задач условиях (работа выполняется без перерывов, конкретный ресурс не может одновременно использоваться несколькими работами, работа не может начать выполняться, если она полностью не обеспечена необходимыми ресурсами) требуется построить такое расписание выполнения работ, которому соответствуют «наилучшие» оценки качества функционирования системы. В задачах сменно-суточного планирования для каждой работы указана длительность изготовления и ресурсы, которые должны быть использованы для ее выполнения. Для каждого ресурса указано время его поступления в систему. Оптимальным решением задачи сменно-суточного планирования является план производства, обеспеченный ресурсами, для которого достигают экстремальные значения критерии, определяющие условия эффективного функционирования производственной системы.

В условиях неполноты данных формализация математических моделей объемного, объемно-календарного и сменно-суточного планирования позволяет для выделенных фрагментов текущего плана производства, для которых не определены конкретные единицы необходимых ресурсов, определять в объемных показателях необходимые группы ресурсов, которые обеспечат выполнение этих фрагментов плана.

2. Задача объемного планирования

2.1 Содержательное описание.

Решается задача распределения общего плана предприятия по различным показателям искомого плана: заказам, изделиям, комплектам, узлам (сборочным единицам), подузлам, деталям, тактам планирования, подразделениям предприятия, группам оборудования и др. С целью сохранения преемственности в математических подходах к получению конструктивных решений [2,5] план предприятия задается в объемных показателях планирования – нормо-часах, рублях, условных тоннах. Формально задача объемного планирования может быть

поставлена как задача определения таких объемов работ, для которых выполняются ограничения, связанные с заданными показателями искомого плана, и достигают экстремальные значения критерии, определяющие условия эффективного функционирования производственной системы [2-4].

2.2. Математическая модель и постановка задачи.

Для задач рассматриваемого класса для сохранения содержательного смысла вместо векторов варьируемых переменных используются многоиндексные матрицы неизвестных. В таких задачах суммирование может осуществляться по одному или нескольким индексам. Число индексов в задачах распределения ресурсов может быть достаточно большим. Так, в [3] рассматривается четырехиндексная, в [2] – пятииндексная система ограничений. Поэтому для удобства изложения мы будем пользоваться обозначениями, принятыми в [4]. Пусть $N(s)$ – множество натуральных чисел от 1 до s . Каждому натуральному l из этого множества поставим в соответствие параметр (индекс) j_l , который может принимать значения из множества $J_l = \{1, 2, \dots, n_l\}$, $n_l \geq 2, l \in N(s)$. Пусть $f = \{k_1, k_2, \dots, k_t\}, f \subseteq N(s)$. Назовем t -индексом упорядоченный набор $F_f = (j_{k_1}, j_{k_2}, \dots, j_{k_t})$, тогда множество всех t -индексов выражается через декартово произведение k_t множеств $E_f = J_{k_1} \times J_{k_2} \times \dots \times J_{k_t}, t = \overline{1, s}$, на которых определены индексы. Каждому t -индексу F_f поставим в соответствие действительное число $z_{F_f}, F_f \in E_f$. Тогда совокупность таких чисел для всех возможных значений индексов $j_{k_1}, j_{k_2}, \dots, j_{k_t}$ определяет t -индексную матрицу, которая обозначается как $\{z_{j_{k_1} j_{k_2} \dots j_{k_t}}\} = \{z_{F_f}\}$. Если $\bar{f} = N(s) \setminus f$, то через $F = F_f F_{\bar{f}}$ обозначим s -индексный набор $(j_{k_1}, j_{k_2}, \dots, j_{k_t}, j_{k_{t+1}}, \dots, j_{k_s})$. Полагаем для общности, что если $f = \emptyset$, то E_f состоит из специально выделенного 0-индекса F_0 , где $F = F_0 F$, и запись $\sum_{F_f \in E_f} z_{F_f} = \sum_{j_{k_1} \in J_{k_1}} \sum_{j_{k_2} \in J_{k_2}} \dots \sum_{j_{k_t} \in J_{k_t}} z_{F_f}, F_{\bar{f}} \in E_{\bar{f}}$ определяет многоиндексную матрицу в сокращенной записи. Математическая модель проблемы объемного планирования с использованием многоиндексных матриц может задаваться через систему линейных двусторонних алгебраических неравенств транспортного типа (коэффициенты матрицы ограничений могут принимать только значения из множества $\{1, -1, 0\}$):

$$a_{F_{\bar{f}}} \leq \sum_{F_f \in E_f} x_{F_f F_{\bar{f}}} \leq b_{F_{\bar{f}}}, F_{\bar{f}} \in E_{\bar{f}}, f \in M, \quad (1)$$

где $M \subseteq 2^{N(s)}$ и $a_{F_{\bar{f}}}$ и $b_{F_{\bar{f}}}$ определяют минимальные и максимальные величины, в рамках которых должны находиться объемы работ, определяющие искомые планы [2, 5-8].

С помощью ограничений (1) фактически можно записать двусторонние, односторонние неравенства и ограничения типа «равно» [2,9]. В задаче объемного планирования необходимо найти такие величины $x_{F_f F_{\bar{f}}}$, для которых выполняются условия типа (1) и достигают минимальные значения критерии, которые в рассматриваемой постановке определяются контролируемыми ограничениями системы. В качестве контролируемых ограничений, в зависимости от особенностей производственных систем, могут выступать любые из ограничений, составляющих математическую модель проблемы объемного планирования.

Так, если I – множество номеров подразделений предприятия, J – множество номеров заказов, K – множество номеров изделий, L – множество номеров комплектов, S – множество узлов, D – множество номеров деталей, T – множество номеров тактов планирования, то математическая модель проблемы объемного планирования будет представлять собой систему линейных, семииндексных двусторонних алгебраических неравенств. Если x_{ijklst} – объем работ, который будет выполнен в подразделении i по заказу j изделию k комплекту l узлу s детали d в такт планирования t , и заданы ограничения на минимальный $B_{kst}^-(a_{F_{\bar{f}}})$ и максимальный $B_{kst}^+(b_{F_{\bar{f}}})$ объем работ, который должен быть выполнен по изделию k узлу s в такт

планирования t , $0 \leq B_{kst}^- \leq B_{kst}^+$, $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, s \in S, d \in D, t \in T$, то соответствующие ограничения математической модели будут иметь вид:

$$B_{kst}^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} x_{ijklst} \leq B_{kst}^+, k \in K, s \in S, t \in T, \quad (2)$$

Тогда формально задача объемного планирования для подразделений предприятия может быть поставлена как задача определения таких величин: x_{ijklst} – объемы работ, которые должны быть выполнены в подразделении i по заказу j изделию k комплекту l узлу s детали d в такт планирования t , для которых выполняются ограничения математической модели типа (2), и на которых достигается экстремальное значение критерия оптимизации, который определяет условия эффективного функционирования производственной системы. Критерии могут формироваться на основе любого ограничения типа (2) математической модели. Пусть для производственной системы в качестве контролируемых ограничений выступают ограничения $C_j^- \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{ijklst} \leq C_j^+, j \in J$, где C_j^-, C_j^+ определяют соответственно минимальные и максимальные объемы работ, планируемые предприятием по заказу j , $j \in J$. Тогда в качестве критериев оптимальности для рассматриваемой задачи может быть выбран функционал $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+) \rightarrow \min, j \in J$, где $\bar{x}_j = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{ijklst}$.

Функции $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+)$ являются неотрицательными по обе стороны от нуля, и в нуле принимающими нулевые значения. Эти функции определяют оценки отклонений искомых показателей от «желательных» показателей плана. В качестве таких функций могут быть выбраны кусочно-линейные, а свертку можно провести как линейную комбинацию этих функций. В этом случае для формальной постановки задачи необходимо, чтобы пользователь указал углы наклона линейных участков функций и коэффициенты свертки. Однако, как показал опыт внедрения [2, 5, 6], пользователь может лишь указать границы для величин отклонений, в которых эти величины являются «отличными», «очень хорошими», «хорошими», «удовлетворительными» и др. Тогда функции отклонений $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+)$ должны быть кусочно-постоянными, разбивающими множество величин отклонений по каждому критерию на области «качества» отклонений. Такими функциями могут быть функции, область значений которых задается множеством целых неотрицательных чисел от 1 до p (1 – «отлично», 2 – «очень хорошо» и т.д.). Определим функцию $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+)$ следующим образом. Для каждой компоненты j рассмотрим совокупность вложенных друг в друга сегментов $S_j^{t_j}, S_j^{t_j} \subseteq S_j^{t_j+1}, t_j = \overline{1, p-1}, p \geq 1, j \in J$. Тогда $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+) = t_j$, если значение аргумента функции принадлежит сегменту $S_j^{t_j}$, но не принадлежит вложенному сегменту $S_j^{t_j+1}$. После сделанных преобразований в качестве критериев оптимальности определены функции $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+) \rightarrow \min, j \in J$. Сдержательно введение данных критериев означает, что для каждого заказа мы стремимся определить такой объем работ, который определяет наилучшее из возможных условий. При этом «лучшим» условием для заказа j является выделение этому заказу объем работ из сегмента, для которого $t_j = 1$, а «худшим» - выделение объема работ из сегмента, для которого $t_j = p$. При условии, что для заказа j значение функции равно $t_j = p$, означает, что соответствующий сегмент просто совпадает с двусторонним ограничением математической модели по этому заказу. Получили многокритериальную задачу с критериями $f_j(\bar{x}_j, C_j^-, C_j^+) \rightarrow \min, j \in J$, и ограничениями типа (2). Отличительная особенность поставленной задачи заключается в том, что если нам известно допустимое решение системы ограничений задачи объемного планирования, то нам известен вектор значений номеров сегментов, соответствующих этому решению. С другой стороны, задание вектора значений номеров сегментов определяет систему линейных двусторонних алгебраических неравенств, состоящую из ограничений исходной математической модели и совокупности из $|J|$ линейных двусторонних алгебраических неравенств, соответствующих вектору значений номеров сегмен-

тов. Отсюда, если $|J| = n$, то существует np различных наборов значений сегментов. Каждому из них соответствует система линейных двусторонних алгебраических неравенств транспортного типа. Будем говорить, что набор значений сегментов «допустимый», если соответствующая ему система линейных двусторонних ограничений транспортного типа совместна.

2.3. Определение параметров неполных данных с использованием методов машинного обучения.

Предлагаемый подход восполнения неполных данных продемонстрируем на следующем примере. Пусть по заказу j_0 изделия k_0 комплекту l_0 существует узел s_0 , для которого не определены ограничения на объемы работ, требуемые для его выполнения. Пусть существуют схожие изделия (из тех, которые предприятие уже ранее изготавливало), для которых все исходные параметры заданы. Предлагаемый подход восполнения недостающих данных состоит из следующих шагов. На первом шаге (*поиск соответствующих узлов*) алгоритма восстановления для узла s_0 находят соответствующие узлы в схожих изделиях. На втором шаге (*восстановление ограничений на объемы работ, требуемые для изготовления узла s_0*) для узла s_0 на основании соответствующих схожих узлов восстанавливаются требуемые ограничения. Далее восстановленные данные используются в алгоритме решения задачи объемного планирования. Восполнение исходных данных происходит следующим образом. Для узла s_0 с неполным описанием находится множество аналогичных узлов. Вводится «мера схожести» между узлами, и тогда задача поиска наиболее схожего узла ставится как оптимизационная задача поиска наиболее схожего узла. При оценке меры схожести для каждого узла строится вектор признаков, учитывающий множество комплектов, в которые входит узел s_0 и множество подузлов, входящих в узел s_0 . Тогда мера схожести узлов определяется как свертка мер схожести узла s_0 , множества комплектов, в которые входит узел s_0 и множество подузлов, входящих в узел s_0 . При этом принципиальным является вопрос определения коэффициентов свертки, так как от этих коэффициентов зависит достоверность восполняемой недостающей информации. Поиск оптимальных значений коэффициентов свертки осуществляется методами машинного обучения. Рассматривается обучающее множество, учитывающее размер обучающей выборки, исходный узел s_0 , множество узлов аналогов. Формируется целевая функция потерь как мера ошибочных распознаваний соответствующего узла среди узлов изделий аналогов. Тем самым задача обучения значений весовых коэффициентов свертки меры схожести узлов ставится как задача оптимизации.

Одной из проблем, возникающих при решении практических задач машинного обучения, является переобучение модели. С целью контроля возможного переобучения, множество данных разбивается на обучающее множество и валидационное множество. Тогда, при решении задачи поиска коэффициентов свертки, контролируются функция потерь, рассчитанные отдельно на обучающем и валидационном множествах. При этом рекордное значение вектора весовых коэффициентов определяется на основании валидационного множества.

2.4. Алгоритмы решения задачи объемного планирования.

Построенная математическая модель учитывает следующие основные особенности, обусловленные использованием многоиндексных параметров с различной индексной размерностью: ограничения математической модели представляют собой систему линейных алгебраических двусторонних неравенств транспортного типа, каждое из которых получается суммированием по некоторым индексам; критерии оптимизационных задач задаются в виде ступенчатых функций, аргументами которых так же являются суммы значений варьируемых параметров по некоторым индексам [3].

Для решения поставленной многокритериальной задачи предлагается осуществить свертку критериев оптимальности [7], для чего на множестве частных критериев оптимальности установим полный линейный порядок. Не уменьшая общности, путем перенумерации частных критериев оптимальности, будем считать, что чем меньше номер критерия, тем критерий «предпочтительнее», согласно введенному порядку. Очевидно, что если $\rho = (v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ - набор значений номеров сегментов, где n - число частных критериев

оптимальности, а $v_i \in \{1, \dots, p\}$, то оптимальное решение поставленной задачи достигается на таком наборе, для которого выполняется:

- v_1^0 – номер сегмента, при котором набор $\rho = (v_1^0, p, p, \dots, p)$ является допустимым, при условии, что либо $v_1^0 = 1$, либо при значении $v_1^0 - 1$ система ограничений не совместна;
- v_2^0 – номер сегмента, при котором набор $\rho = (v_1^0, v_2^0, p, \dots, p)$ является допустимым, при условии, что либо $v_2^0 = 1$, либо при значении $v_2^0 - 1$ система ограничений не совместна;
- v_n^0 – номер сегмента, при котором набор $\rho = (v_1^0, v_2^0, \dots, v_i^0, \dots, v_n^0)$ является допустимым, при условии, что либо $v_n^0 = 1$, либо при значении $v_n^0 - 1$ система ограничений не совместна.

Отсюда следует, что для решения задачи объемного планирования необходимо найти вектор $\rho^0 = (v_1^0, v_2^0, \dots, v_i^0, \dots, v_n^0)$, для чего нужно проверить на совместность np систем линейных алгебраических двусторонних неравенств транспортного типа. Учитывая тот факт, что для введенной системы сегментов имеет место «вложенность» сегментов $S_j^t \subseteq S_j^{t+1}$, $t_j = \overline{1, p-1}$, $p \geq 1$, $j = \overline{1, n}$, то число проверок на совместность имеет порядок $n \log_2 p$. Как показал опыт внедрения [2, 4, 5], для задач объемного планирования обычно выполняются условия, при которых задачи могут быть сведены к задаче распределения однородного ресурса в сильносвязной иерархической структуре [8]. Это классы задач, для которых множество M состоит из системы вложенных друг в друга подмножеств индексов. Эти задачи на языке теории графов ставятся следующим образом. Обозначим через $G = (V, A)$, $A \subseteq V^2$ орграф, который представляет собой корневое ориентированное дерево. Пусть R_i и Q_i соответственно множество вершин графа, непосредственно предшествующих вершине i и непосредственно следующих после вершины i . Вершины графа разобьем на множества $\{i_0\}$, V^t , V^k – корень дерева, множество листьев и остальные вершины соответственно, при этом $R_{i_0} = \emptyset$, $|R_i| = 1$, $i \in V \setminus \{i_0\}$, $Q_i \neq \emptyset$, $i \in V \setminus V^t$, $Q_i = \emptyset$, $i \in V^t$. При выполнении этих условий из [8] следуют необходимые и достаточные условия совместности системы линейных двусторонних алгебраических неравенств транспортного типа, основанные на алгоритме приведенных границ с вычислительной сложностью $O(n)$, предложенном в [8]. В общем случае для проверки на совместность систем линейных неравенств известны различные классические результаты линейной алгебры (теорема Александрова – Фань-Цзы, теорема Черникова [9]). Кроме того, для проверки совместности и получения решения совместных систем могут быть использованы первый этап двухэтапного симплекс-метода, метод эллипсоидов [10] с оценкой $O(n^3(n+m)L)$, алгоритм Кармаркара [11] с оценкой $O(n^{4.5} \log n)$, где n – количество неизвестных в системе, а m – количество неравенств. Кроме точных методов, для решения систем линейных неравенств могут быть использованы итерационные методы, например, релаксационный метод ортогональных проекций Агмона-Мозкина [12] и его модификация [13], хорошо зарекомендовавшая себя для случая транспортных систем линейных двусторонних многоиндексных неравенств [14].

Заключение

Полученные результаты составили основу разработанных программных средств распределения производственных ресурсов при решении задач планирования для предприятий ВПК (АО «Уралтрансмаш», АО «Концерн «Алмаз-Антей», ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ). Внедрение разработанных программных средств в практику планирования позволяет сделать вывод об адекватности построенных математических моделей реальным условиям функционирования производственных высокотехнологичных предприятий.

Библиографический список

1. **Лазарев, А.А.** Теория расписаний. Минимизация суммарного запаздывания для одного прибора / А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. – М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2006.
2. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов, О.В. Кривошеев // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 9. С. 650-657.
3. **Прилуцкий, М.Х.** Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 1. С. 78-82.
4. **Раскин, Л.Г.** Многоиндексные задачи линейного программирования (теория, методы, приложения) / Л.Г. Раскин, И.О. Кириченко. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
5. **Кривошеев, О.В.** Анализ тенденций развития цифровых платформ для выбора архитектурных решений при создании цифрового предприятия // В сборнике: Информационные системы и технологии – 2019. Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции. 2019. С. 288-292.
6. **Афраймович, Л.Г.** Многопродуктовые потоки в древовидных сетях / Л.Г. Афраймович, М.Х. Прилуцкий // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 57-63.
7. **Прилуцкий, М.Х.** Многокритериальное распределение однородного ресурса в иерархических системах. // Автоматика и телемеханика, 1996. № 2. С. 24-29.
8. **Прилуцкий, М.Х.** Распределение однородного ресурса в иерархических системах древовидной структуры. // Труды международной конференции «Идентификация систем и задачи управления SICPRO'2000». – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2000, С. 2038-2049.
9. **Черников, С.Н.** Линейные неравенства / С.Н. Черников. – М.: Наука, 1968. – 488 с.
10. **Пападимитриу, Х.** Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
11. **Franklin J.** Convergence in Karmarkar's Algorithm for Linear Programming. SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 24, No. 4 (Aug., 1987). Pp. 928-945.
12. **Motzkin T.S., Schoenberg I.J.** The relaxation method for linear inequalities // Caned. J. Moth. 1954. V. 6. № 3. P. 393-404.
13. **Афраймович, Л.Г.** Многоиндексные задачи распределения ресурсов в иерархических системах / Л.Г. Афраймович, М.Х. Прилуцкий // Автоматика и телемеханика. 2006. № 6. С. 194-205.
14. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4(127). С. 36-43.

*Дата поступления
в редакцию: 14.03.2022*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.55

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_44

ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ ЯДЕРНОГО ЭНЕРГОИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ВТГР ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В.Ф. Головко

ORCID: 0000-0003-3501-9767 e-mail: vfgolovko@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***И.В. Дмитриева**

ORCID: 0000-0003-3083-5028 e-mail: dmitrieva_iv@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Рязанов**

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: a_v_ryazanov@mail.ru

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

Представлен анализ надежности атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с использованием реакторных установок (РУ) различной единичной мощности. Рассматриваются различные конфигурации АЭТС с РУ и традиционными котельными агрегатами, используемыми в качестве основных и резервных источников тепла, исследуется их надежность в зависимости от единичной мощности установок. Предложена комбинированная схема АЭТС, предполагающая подключение РУ к источникам тепла, обеспечивающим соответствующую надежность его подачи. Данный способ использования ВТГР для технологических производств требует минимальных доработок существующих камер сгорания и трубопроводов системы разводки горячего воздуха при высокой безопасности транспортировки тепла. Результаты исследования могут быть использованы для анализа надежности и экономических оценок АЭТС.

Ключевые слова: ядерный энергоисточник, реактор ВТГР, ядерный реактор, реактор при технологическом производстве, высокотемпературный реактор, тепло для производственных нужд, высокотемпературный технологический процесс, производство водорода.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Головко, В.Ф. Выбор конфигурации ядерного энергоисточника на основе ВТГР для технологического применения / В.Ф. Головко, И.В. Дмитриева, А.В. Рязанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 44-57. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_44

CONFIGURING NUCLEAR POWER SOURCE BASED ON HTGR FOR TECHNOLOGICAL USE

V.F. Golovko

ORCID: 0000-0003-3501-9767 e-mail: vfgolovko@mail.ru

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

I.V. Dmitrieva

ORCID: **0000-0003-3083-5028** e-mail: **dmitrieva_iv@okbm.nnov.ru**
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Ryazanov

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a_v_ryazanov@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Analysis of reliability of a nuclear power technological plant (NPTP) using reactor plants (RP) of various unit capacity, is presented. Various configurations of NPTPs with RP and traditional boiler units used as main and backup heat sources, are considered, and their reliability is researched depending on the unit capacity of the plants. Combined scheme of the NPTP is proposed, involving the connection of RP to heat sources that ensure the appropriate reliability of its supply. This method of using HTGR for technological production requires minimal improvements to existing combustion chambers and pipelines of the hot air distribution system with high safety of heat transportation. Results of the study can be used to analyze reliability and economic assessments of NPTP.

Key words: nuclear power source, HTGR reactor, nuclear reactor, reactor at technological production, high-temperature reactor, heat for production needs, high-temperature technological process, hydrogen production.

FOR CITATION: V.F. Golovko, I.V. Dmitrieva, A.V. Ryazanov. Configuring nuclear power source based on HTGR for technological use. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 44-57.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_44

Введение

В структуре энергопотребления России основная доля (до 70 %) потребляемого органического топлива приходится на обеспечение теплом промышленных производств, на транспорт и отопление жилых массивов. Реакторные установки с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами (ВГТР), гелиевый теплоноситель которых может нагреваться до 950 °С, являются альтернативой источникам технологического тепла для различных производств, использующих органическое топливо (химические и нефтеперерабатывающие заводы, металлургические процессы, производство водорода и др.) Температурный потенциал в совокупности с повышенными характеристиками безопасности современных модульных ВГТР в наибольшей мере соответствуют требованиям, предъявляемым промышленными технологическими производствами к источнику ядерной энергии. Однако для поддержания непрерывного технологического процесса в течение длительного времени необходимы высокая готовность и надежность подачи тепла, в то время как единичные РУ, в том числе, с ВГТР, обладают более низкой внутренне присущей готовностью, чем требуется, вследствие остановки на перегрузку топлива или для замены и ремонта отдельных элементов. Поэтому при использовании РУ в этих целях необходима их резервная избыточность [1, 2].

Требования технологических производств

Анализ требований к источнику тепла по мощности, температурам и надежности для разных технологических процессов выполнен на основе немногочисленной опубликованной отечественной и зарубежной информации [3, 4].

Требуемые мощности по отечественным данным:

- от 200 МВт – нефтедобыча из песков;
- 500 МВт – для нефтеперерабатывающего завода;
- 2400 МВт – оптимальная мощность перспективного производства водорода с ядерным энергоисточником;

- более 10 000 МВт – для крупных промышленных химических и металлургических предприятий.

Требуемые мощности по зарубежным данным:

- средний нефтеперерабатывающий завод – 643 МВт и 1 100 МВт (7 % – пар, 76 % – тепло, 17 % – электричество); с комплексной нефтепереработкой (каталитический крекинг, гидрокрекинг, реформинг, гидроочистка) намного больше – до 2 356 МВт;
- извлечение и переработка битума из нефтеносных песков – от 1 000 до 1 270 МВт (более 90 % в виде пара);
- производства водорода посредством парового реформинга метана – от 130 до 500 МВт (56 % – пар, 37 % – тепло, 7 % – электричество);
- производства водорода посредством термохимического разложения воды в йодносернистом цикле – от 500 до 2400 МВт (производство водорода, кислорода, а также электричества и пара низкого давления);
- для производства 800 тыс. т. алюминия в год – 317 МВт (т) и 544 МВт (эл.)

Как следует из данного обзора, ВТГР с тепловой мощностью от 200 до 1000 МВт хорошо соответствуют потребностям большинства производств.

Требуемый уровень температур

Требуемый уровень температуры в основных технологических процессах:

- добыча и переработка нефти – от 250 до 600 °С, отдельные процессы термического и каталитического крекинга – до 950 °С;
- извлечение битума из нефтеносных песков – до 350 °С, с каталитическим крекингом – до 950 °С;
- газификация угля – от 700 до 950 °С;
- химическое производство – в большинстве процессов ниже 300 °С, в некоторых (производство стирола, акрилонитрила) от 400 до 700 °С, в процессах с крекингом (производство этилена, пропилена, бензола, ксилола) – до 900 °С;
- производство удобрений – от 400 до 600 °С;
- производство металлов – выше 960 °С;
- производство стекла – около 1500 °С;
- производство цемента – 1500 °С, в производствах с катализатором – 800 °С;
- производство водорода посредством парового реформинга метана – от 500 до 980 °С;
- производства водорода посредством электролиза воды и термохимического разложения;
- воды в йодно-сернистом цикле – от 700 до 950 °С.

Из всех реакторных технологий технология ВТГР единственная располагает диапазоном от 250 до 950 °С, который может применяться в высокотемпературных технологических процессах. Как видим, в большинстве технологических производств в настоящее время и на ближайшую перспективу температура потребляемого тепла находится в диапазоне до 700-750 °С, что идеально соответствует возможностям ВТГР. Предельный для ВТГР уровень температур от 700 до 950 °С востребован в процессах производства водорода, химическом производстве пропилена и этилена. В таком высокотемпературном диапазоне основные научно-технические барьеры связаны с созданием новых материалов и компонентов оборудования (в системах передачи энергии), преодоление которых нацелено на долгосрочную перспективу. В производствах с температурами выше 950 °С к ВТГР должны добавляться или электрические источники тепла, или источники на основе сжигания органического топлива.

Требования по надежности

Многие традиционные производства (например, металлургические и химические) имеют очень высокие эксплуатационные коэффициенты использования мощности, приближающиеся к 95-98 %. Нефтеперерабатывающий завод выдвигает требование по увеличению времени непрерывной работы энергоисточника с 7 000 до 8 000 ч в год при средней наработке на отказ 16 000 ч. Это требование соответствует значению $K_{\text{ти}}$ 91,3 % при среднем времени восстановления работоспособного состояния оборудования в диапазоне от 24 до 240 ч и значению $K_{\text{г}}$ в диапазоне от 99,9 до 98,5 % соответственно.

Следует отметить, что в случае, например, добычи вязкой нефти из нефтеносных песков с использованием пара аварийное прекращение поставки пара приводит к быстрому охлаждению песков и большим затратам энергии и времени на их повторный нагрев. В этом случае допустимо лишь кратковременное снижение мощности энергоисточника до уровня, обеспечивающего поддержание необходимой температуры нефтеносного слоя. Для ряда технологических процессов также существует проблема эксплуатационной готовности. В частности, для металлургии (в доменном производстве) вероятность безотказной работы должна быть на уровне 99,9 %, поскольку аварийная остановка приводит к таким нарушениям технологического процесса, после которых необходим длительный пусковой период для выхода на стационарный режим работы.

Таким образом, ключевым требованием к источнику технологического тепла является его высокая надежность, которая должна обеспечиваться необходимым резервированием мощности.

Характеристики надежности ВТГР

Анализ надежности выполняется на основе оценки коэффициента технического использования $K_{\text{ти}} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{ппр}} + T_{\text{н}}}$ и коэффициента готовности $K_{\text{г}} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{н}}}$, где T_p – суммарное за срок службы время работы блока на мощности; $T_{\text{ппр}}$ – суммарное за срок службы время простоя блока - на перегрузку и планово-предупредительный ремонт (ППР); $T_{\text{н}}$ – суммарное за срок службы время неплановых простоев.

В ядерной энергетике широкое распространение получил также коэффициент использования мощности, представляющий собой отношение фактической энерговыработки РУ за определенный период времени к максимально возможной за этот же период, которую она бы произвела, работая на номинальном уровне мощности в течение календарного времени без остановок:

$$\text{КИУМ} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{ппр}} + T_{\text{н}}} \cdot \frac{N_{\text{ср}}}{N_{\text{ном}}}$$

где:

$N_{\text{ср}}$ – средняя мощность установки на интервале времени T_p ;

$N_{\text{ном}}$ – номинальная установленная мощность.

При работе РУ только на номинальном уровне мощности $K_{\text{ти}} = \text{КИУМ}$, и по величине КИУМ можно судить о $K_{\text{ти}}$. Для сравнения на рис. 1 приведены КИУМ для АЭС с реакторными установками шести основных типов. Верхняя граница находится на уровне 85 %. Учитывая, что максимальные КИУМ достигаются при мощности, близкой к номинальной, можно сделать вывод, что максимальный $K_{\text{ти}}$ АЭС лежит в пределах 85-86 %. Поскольку $K_{\text{ти}}$ АЭС в основном определяется продолжительностью плановых остановок РУ (перегрузками), можно предположить, что максимальный $K_{\text{ти}}$ РУ составляет также около 86 %.

Оценка показателей надежности РУ с ВТГР выполнялась на примере разработанных проектов: типа ВГМ [6] – тепловой мощностью 220 МВт с активной зоной из шаровых твэлов, перегружаемой на работающем реакторе, и типа МГР-Т [7] – мощностью 600 МВт с

кольцевой призматической активной зоной, объединенного с системой преобразования энергии в прямом замкнутом газотурбинном цикле (модификация ГТ-МГР [8] для целей промышленного производства водорода.).

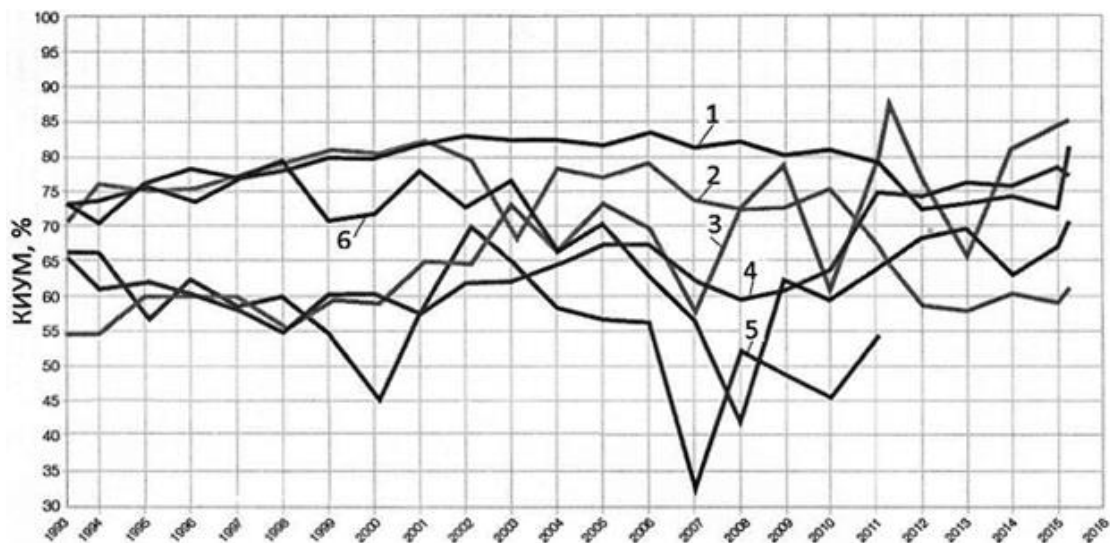


Рис. 1. Данные по средним КИУМ за период 1993-2016 гг. [5]:

1 – легководный реактор (LWR); 2 – кипящий реактор (BWR);

3 – реактор большой мощности канальный (РБМК); 4 – реактор с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением (PHWR); 5 – магноксовый реактор (MAGNOX);
6 – усовершенствованный газоохлаждаемый ядерный реактор (AGR)

Fig. 1. Data on average Capacity Factor for the period from 1993 to 2016 [5]:

1 – light-water reactor (LWR); 2 – boiling-water reactor (BWR);

3 – high-power channel-type reactor (RBMK); 4 – pressurized heavy-water reactor (PHWR);
5 – MAGNOX; 6 – advanced gas-cooled reactor (AGR)

В проекте ВГМ с активной зоной из шаровых твэлов при работе без остановки на перегрузку продолжительность простоев определяется плановыми остановками для замены оборудования, выработавшего свой ресурс. В этих условиях $K_{ти}$ оценивается около 86 %. На рис. 2 показано влияние увеличения ресурса оборудования (газодувок и высокотемпературного промежуточного теплообменника) на показатели надежности РУ.

Несовпадение во времени частоты остановок оборудования усиливается при увеличении их ресурса, что предопределяет замедление темпа роста $K_{ти}$ на рис. 2. Эту закономерность необходимо учитывать при обеспечении ресурса оборудования. Достижимый ресурс отдельного оборудования подтверждается опытом эксплуатации аналогов в составе газоохлаждаемых реакторов. Так, например, газодувки АЭС «Хинкли-Пойнт-В» [9] рассчитаны на работу без ремонта в течение 30 лет с проведением осмотров рабочих узлов и деталей каждые пять лет. Они наработали почти 1 млн ч с коэффициентом готовности 99,4 % за период 1978-1985 гг. В РУ ВГМ при таком коэффициенте готовности газодувок можно ожидать увеличения надежности до 88 %.

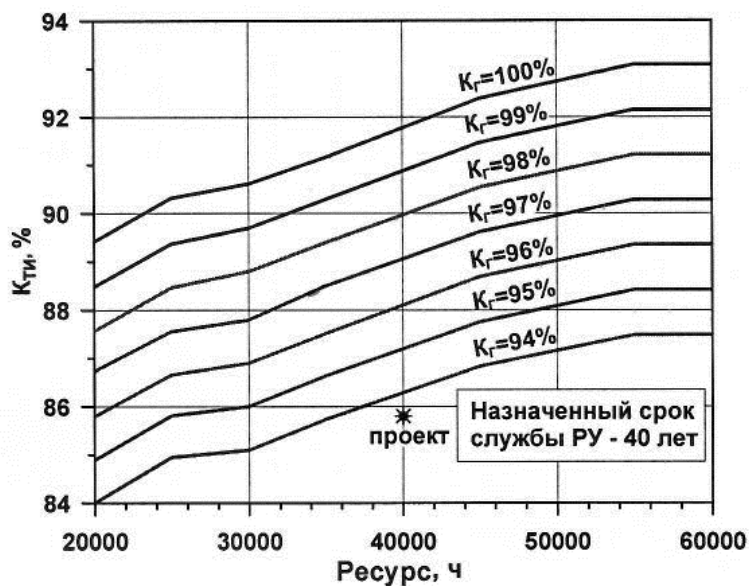


Рис. 2. Зависимость K_{Ti} реакторной установки ВГМ от ресурса оборудования

Fig. 2. Dependence K_{Ti} of reactor unit VGM on the equipment resource

Для РУ ГТ-МГР с кольцевой призматической активной зоной продолжительность простоев в основном определяется плановыми перегрузками топлива. На рис. 3 приведена диаграмма, иллюстрирующая цикличность работы РУ ГТ-МГР с продолжительностью одной микрокампании 303,5 эффективных суток. Минимальное время остановок составляет 30,5 суток (перегрузка), более продолжительные остановки соответствуют плановым перегрузкам, совмещенным с плановыми заменами и ремонтами отдельного оборудования. Для учета неплановых (аварийных) остановок реактора, с помощью вероятностных методов оценивались возможное количество отказов оборудования и суммарное время простоев РУ по причине данных отказов.

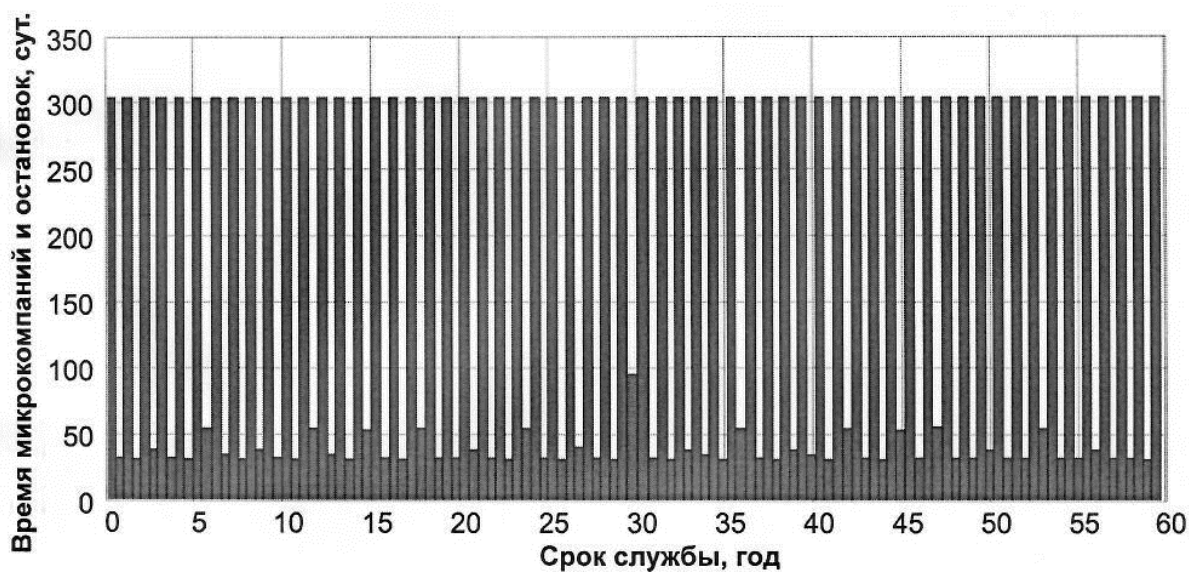


Рис. 3. Диаграмма работы РУ ГТ-МГР

Fig. 3. Diagram of the work of RU GT-MHR

На рис. 4 показано изменение показателей надежности РУ ГТ-МГР в зависимости от продолжительности микрокампании (проектная точка: $K_{\text{ти}}=84,6\%$, $K_r=95,5\%$). Из анализа следует, что снижение $K_{\text{ти}}$ из-за плановых простоев установки при эксплуатации на 100 % мощности может составлять до 12 %. Наибольший «вклад» в продолжительность плановых простоев вносят ежегодные перегрузки топлива, связанные с заменой и перестановками тепловыделяющих сборок. Время подготовки к перегрузке и вывода реактора на мощность после перегрузки (включая время, затраченное на останов и расхолаживание реактора, монтаж / демонтаж оборудования перед и после перегрузки топлива, проверки перед выходом на мощность, вывод реактора на мощность) составляет 19 % от суммарного времени простоев РУ во время плановых остановок, что соответствует 2,3 % снижения $K_{\text{ти}}$.

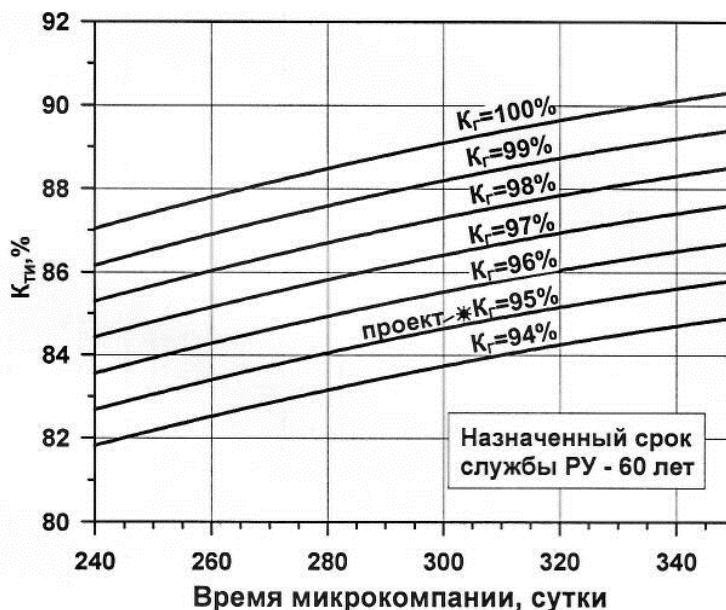


Рис. 4. Изменение $K_{\text{ти}}$ реакторной установки ГТ-МГР с призматической зоной

Fig. 4. Changing $K_{\text{ти}}$ reactor unit GT-MHR with a prismatic zone

Расчетное снижение $K_{\text{ти}}$ установки, оцененное с использованием данных по безотказности и ремонтпригодности компонентов РУ, может достигать 4 %. Для повышения $K_{\text{ти}}$ должно быть предусмотрено, по возможности, совмещение плановых остановов на перегрузку с заменой и ремонтом оборудования реактора. Анализ характеристик надежности существующих проектов ВТГР показывает, что требования потребителей тепла существенно выше уровня надежности, обеспечиваемого единичной реакторной установкой.

Кроме того, из-за различия мощностей модульных ВТГР и потребностей промышленных потребителей тепла возникает серьезная проблема. Так, например, для нефтеперерабатывающего завода мощностью 500 МВт (рис. 5) или перспективной установки для производства водорода мощностью 2 400 МВт требуется использование нескольких РУ. Также в некоторых случаях требования к продолжительности непрерывного технологического процесса выше, чем может обеспечивать РУ. Например, для нефтеперерабатывающего завода требуется 8 000 ч (333 суток), в то время как продолжительность микрокампании ГТ-МГР составляет 303 суток.

Проблема разномасштабности, очевидно, решается за счет количества реакторных блоков. Выбор реакторного модуля из имеющихся проектов определяется оптимальной кратностью блоков для обеспечения требуемой мощности АЭС.

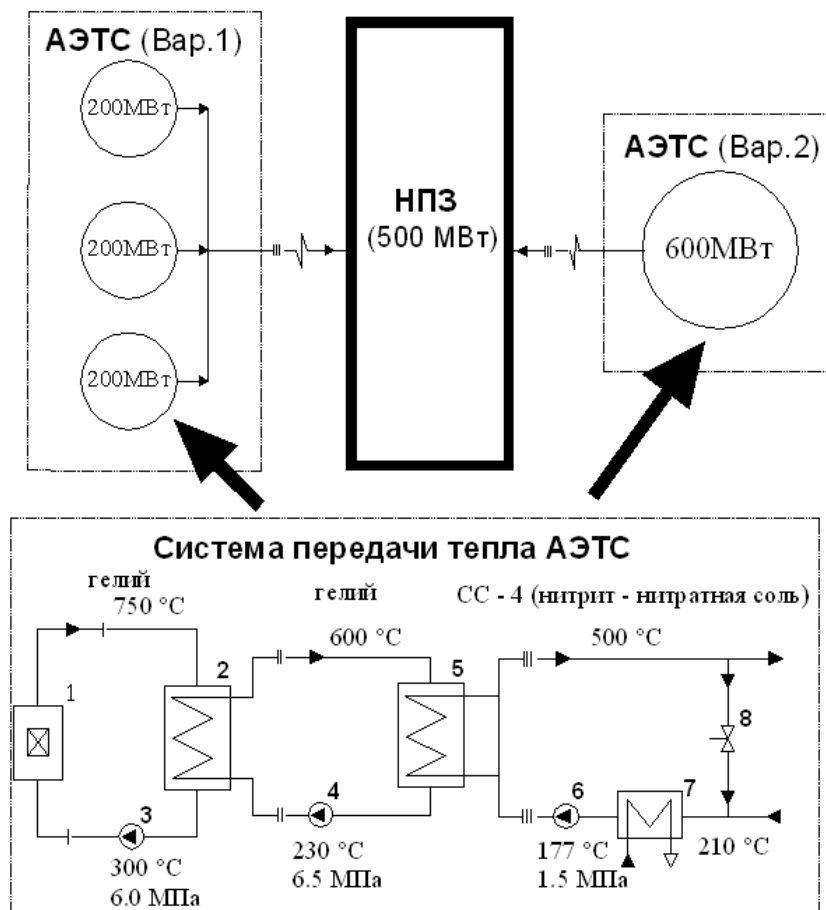


Рис. 5. Варианты тепловых схем АЭТС для нефтеперерабатывающего завода:
 I – первый контур; II – промежуточный контур; III – сетевой контур;
 1 – реактор; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – главная циркуляционная газодувка;
 4 – циркуляционная газодувка промежуточного контура; 5 – сетевой теплообменник;
 6 – циркулятор сетевого контура; 7 – парогенератор; 8 – байпасный клапан

Fig. 5. Variants of thermal schemes of NPP for an oil refinery:
 I – primary circuit; II – intermediate circuit; III – network circuit;
 1 – reactor unit; 2 – intermediate heat exchanger; 3 – main circulating gas blower;
 4 – circulating gas blower of the intermediate circuit; 5 – network heat exchanger;
 6 – network circuit circulator; 7 – steam generator; 8 – bypass valve

На рис. 6 приведены показатели надежности для нескольких вариантов конфигурации ядерного энергоисточника с РУ типа ГТ-МГР единичной мощностью 600 МВт, которые отличаются количеством блоков.

Оценки выполнены для условий одновременной остановки и перегрузки РУ и отсутствия резервирования, потребная мощность технологического тепла соответствует суммарной мощности РУ в каждом варианте. Как и следовало ожидать, с увеличением количества РУ в составе АЭТС разрыв между необходимым и фактическим уровнем надежности увеличивается. Снижение $K_{ти}$ обусловлено увеличением количества оборудования в составе АЭТС, единичные отказы которого приводят к останову одного из РУ и, соответственно, к увеличению продолжительности неплановых простоев (неплановых снижений мощности ядерного энергоисточника). Доля плановых простоев остается постоянной, что объясняется одновременным выводом РУ на ППР.

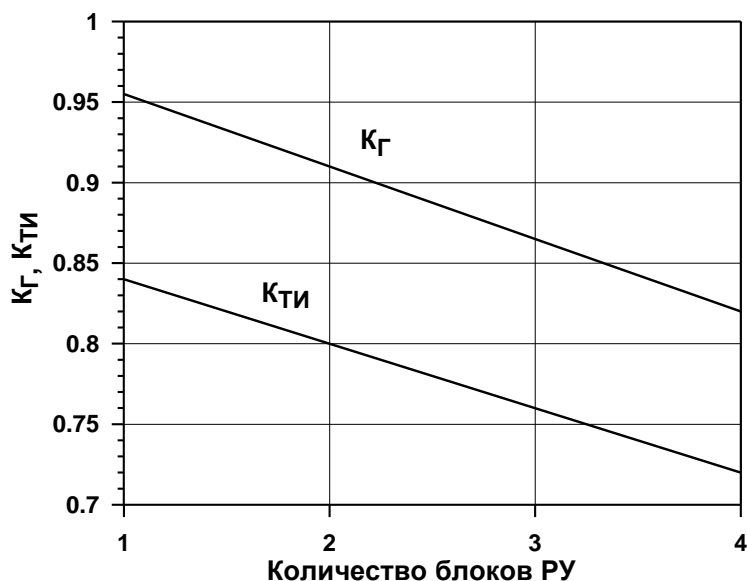


Рис. 6. Зависимость показателей надежности АЭС от количества блоков РУ

Fig. 6. Dependence of NPP reliability indicators on the number of RP

Для повышения показателей надежности реакторного источника тепла необходимо увеличивать продолжительность микрокампании и снижать продолжительность перегрузок топлива (для реактора с призматической активной зоной) и увеличивать ресурс и сокращать время замены (ремонта) отдельного оборудования (для реактора типа ВГМ). Однако полностью сократить разрыв между фактическим и необходимым уровнем надежности АЭС в таких системах невозможно. Одним из решений проблемы является использование резервирования.

Надежность АЭС с резервированием энергоисточников

На рис. 7 представлены результаты оценок надежности различных вариантов конфигурации АЭС для производства водорода с РУ типа ГТ-МГР, отличающихся кратностью резервирования РУ. Мощность АЭС – 2400 МВт, единичная мощность РУ – 600 МВт, количество основных блоков – 4. Под «кратностью резервирования» понимается отношение количества резервных РУ к количеству основных РУ. Режим использования основных РУ – на номинальной мощности, резервных – на номинальной мощности во время перегрузки (и внеплановых простоев) и на мощности собственных нужд этих РУ в остальное время. Предполагается поочередная остановка блоков на перегрузку и ППР (не допускается одновременная остановка нескольких блоков). Резервные блоки могут использоваться как в течение микрокампании, так и, при необходимости, во время плановых остановок.

Полученные результаты показывают, что наличие уже двух резервных РУ существенно снижает вероятность отказа АЭС и приводит к снижению продолжительности внеплановых простоев. При необходимости достижения более высокого уровня надежности АЭС необходимо повышение кратности резервирования РУ. Возможны другие варианты режимов использования блоков АЭС: например, изменение графика нагрузки как основных, так и резервных РУ с целью снижения продолжительности плановых простоев. Так, для варианта 4/4 возможна одновременная работа всех РУ на 50 % мощности. В этом случае за счет увеличения продолжительности эксплуатации на мощности (в силу экономии энергозапаса активной зоны при условии обеспечения соответствующего, увеличенного в два раза, времени непрерывной работы РУ без техобслуживания и ремонта) доля времени плановых простоев АЭС может быть снижена в два раза.

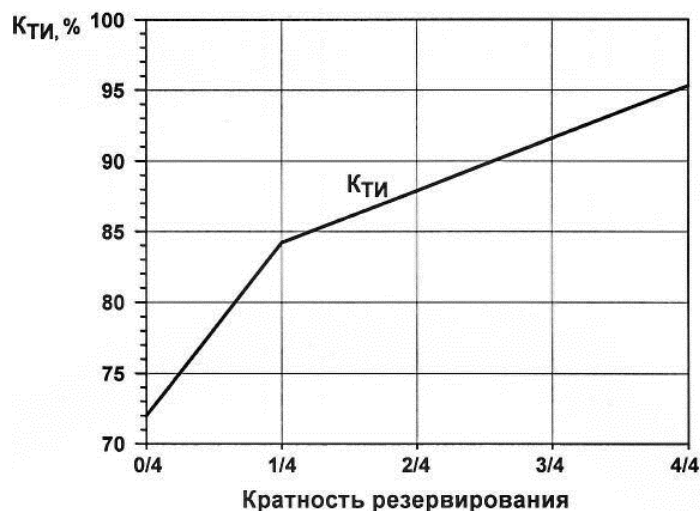


Рис. 7. Зависимость показателей надежности АЭС от кратности резервирования РУ

Fig. 7. Dependence of NPP reliability indicators on the multiplicity of RP redundancy

Анализ возможных вариантов конфигураций АЭС и различных вариантов оптимизации режимов показывает, что для выполнения строгих требований по непрерывной подаче технологического тепла ($K_{ти}$ на уровне 0,999) требуется значительная резервная избыточность блоков. Этот вывод подтверждается представленными в работах [1, 2] результатами анализа АЭС с ВТГР в качестве основных и резервных РУ, при требуемой надежности подачи тепла от АЭС не ниже 99,9 %. В соответствии с разработанной методологией [1], резервирование устанавливается исходя из принципа избыточности « $n+2$ », который предварительно был обоснован с помощью вероятностных расчетов методом Монте-Карло. Данный принцип предполагает, что одна РУ находится на перегрузке и еще две РУ вышли из строя, при этом оставшиеся РУ должны обеспечивать 100 % уровень подачи тепла. Если при моделировании отказов обнаруживается, что не обеспечивается 99,9 % надежность, то добавляются дополнительные резервные РУ. Величина общей резервной мощности зависит от количества основных РУ. Чем больше количество РУ (и, соответственно, меньше относительная мощность РУ), тем меньше, в соответствии с принципом $n+2$, требуемая резервная мощность. Вместе с тем, следует учитывать, что снижение единичной мощности РУ при прочих равных условиях приводит к повышению уровня безопасности. Принцип « $n+2$ », применяемый для надежности 99,9 %, может показаться чрезмерно жестким, реализация которого повлечет неоправданные затраты. Высокое требование по надежности 99,9 % отражает потребности непрерывной длительной работы некоторых технологических производств. Для других производств с более низкими требованиями по надежности, составляющими 98 или 99 %, такое небольшое снижение может оказать значительное влияние на количество резервных РУ.

Общий вывод, который может быть сделан из анализа использования ВТГР для промышленных производств с высокими требованиями по надежности, состоит в том, что, несмотря на бесспорные преимущества ВТГР, АЭС в такой конфигурации (РУ в качестве основных и резервных модулей) неприемлема по экономическим соображениям. Поскольку удорожание АЭС в основном обусловлено капитальной стоимостью резервных РУ на уровне основных РУ, решением проблемы могла бы быть замена резервных РУ на традиционные газовые котлы (ГК). Конфигурация РУ-ГК предпочтительна как из-за низкой капитальной стоимости ГК, так и в связи со способностью быстро переходить из состояния без нагрузки в состояние полной нагрузки. В [2] был выполнен анализ надежности различных конфигураций АЭС, где в качестве резервных источников рассматривались как ВТГР

(мощностью 350 и 600 МВт), так и традиционные газовые котлы (ГК). В табл. 1 представлены некоторые результаты анализа, для сравнения приведен также вариант только с ГК, используемыми в качестве основных и резервных источников (указано их суммарное количество).

Таблица 1.

Варианты конфигурации энергоисточника

Table 1.

Power source configuration options

Потребность в технологическом тепле, МВт	Количество основных блоков × мощность блока, МВт	Количество резервных блоков × мощность блока, МВт		К _{ГТ} , %	
		с ВТГР	с ГК	с ВТГР	с ГК
200	1×600 ВТГР	3×600 ВТГР	3×200 ГК	99,99	99,91
	1×350 ВТГР	3×350 ВТГР	3×200 ГК	99,99	99,91
	4×200 ГК			99,92	
400	1×600 ВТГР	3×600 ВТГР	5×200 ГК	99,99	99,99
	2×350 ВТГР	3×350 ВТГР	4×200 ГК	99,95	99,98
	6×200 ГК			99,99	
600	1×600 ВТГР	4×600 ВТГР	6×200 ГК	99,95	99,95
	2×350 ВТГР	3×350 ВТГР	5×200 ГК	99,93	99,96
	7×200 ГК			99,97	
1500	3×600 ВТГР	4×600 ВТГР	8×200 ГК	99,98	99,97
	5×350 ВТГР	5×350 ВТГР	6×200 ГК	99,98	99,94
	12×200 ГК			99,95	

Как видно из табл. 1, в конфигурациях РУ-РУ количество резервных блоков не меньше, чем основных. При потребной мощности до 600 МВт количество резервных ГК в конфигурациях РУ-ГК соизмеримо с суммарным количеством блоков в конфигурациях ГК-ГК. С увеличением потребной мощности количество резервных блоков в конфигурации РУ-ГК, по сравнению с количеством в ГК-ГК, уменьшается: для 1500 МВт до двух раз. На основании анализа [2] делается вывод, что затраты для АЭС, использующих ГК в качестве резерва, значительно ниже в связи с более низкими капитальными затратами и низким коэффициентом использования мощности резервных ГК, благодаря чему потенциальный рост цен на органическое топливо не являются доминирующим в общих затратах.

Предлагаемый вариант конфигурации АЭС

Учитывая результаты проведенных анализов, из которых следуют повышенные требования к резервной мощности, предлагается вариант конфигурации АЭС со встраиванием РУ в существующую на технологическом производстве структуру источников тепла, обеспечивающих соответствующую надежность его подачи.

Во всех известных схемах использования ВТГР для энергообеспечения технологических процессов (рис. 5) реакторное тепло через замкнутый контур передается технологической среде в теплообменниках поверхностного типа. Реализация данных схем требует разработки специального теплообменного оборудования, систем передачи тепла и систем регулирования, либо их существенной доработки для адаптации к существующим технологическим производствам, основанным на схемах с органическим топливом. В отличие от этого, в предлагаемом способе передачи тепла в промежуточном контуре циркулирует подогреваемый реакторным теплом воздух, забираемый из атмосферы (рис. 8), что позволяет использовать с минимальными доработками камеры сгорания и теплообменное оборудование существующих систем подвода тепла к технологическим потребителям.

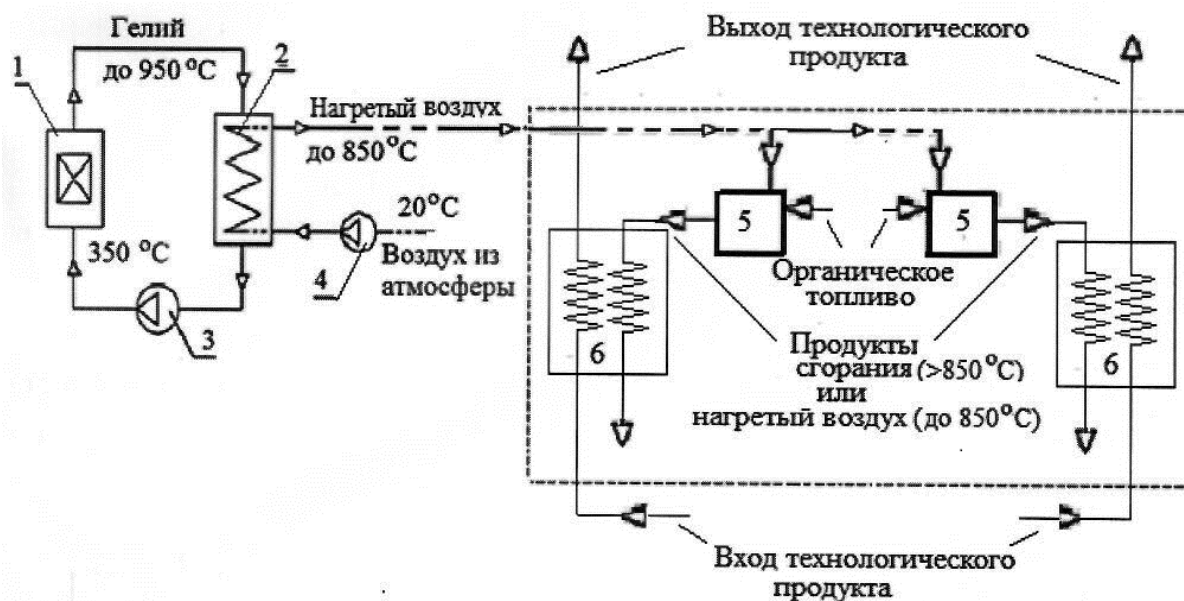


Рис. 8. Предлагаемая схема передачи тепла к высокотемпературным технологическим процессам:

- — контур передачи тепла к высокотемпературным: технологическим процессам;
 1 — ВТГР; 2 — высокотемпературный промежуточный теплообменник;
 3 — главный циркуляционный компрессор; 4 — компрессор; 5 — камеры сгорания;
 6 — теплообменные аппараты

Fig. 8. The proposed scheme of heat transfer to high-temperature technological processes:

- - heat transfer circuit to high-temperature: technological process; 1 — HTGR;
 2 — high-temperature intermediate heat exchanger; 3 — main circulation compressor;
 4 — compressor; 5 — combustion chambers; 6 — heat exchangers

Предлагаемый способ позволяет снизить или исключить потребление органического топлива благодаря высокой температуре подаваемого в существующие печи воздуха. Так, при температуре воздуха $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно снизить расход топлива на 75 %, по сравнению с воздухом атмосферной температуры (рис. 9). Расчетные оценки получены для следующих условий: температура продуктов сгорания $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$; коэффициент избытка воздуха (превышение над теоретическим количеством воздуха, необходимым для сжигания единицы топлива) 5; коэффициент полноты горения топлива 0,98; теплотворная способность топлива $4\cdot 10^4$ кДж/кг. Поступление технологического продукта в первый контур РУ при аварийной разгерметизации технологических контуров исключается ввиду устранения его контакта с теплоносителем первого контура.

При этом свойственные РУ регламентные режимы работы (пуск, останов, аварийное расхолаживание) обеспечиваются соответствующими системами отвода тепла от РУ к конечному поглотителю (например, через дополнительные воздушные теплообменники). В этих режимах РУ непрерывность технологического процесса и параметры технологического производства сохраняются неизменными за счет перехода (переключения) на традиционную систему теплоснабжения на сжигании органического топлива.

Рассматриваемый вариант соответствует тенденции реконструкции угольных электростанций с целью замены угольных котлов на малые модульные реакторы. Предложения подобного рода (компании Bryden Wood, Массачусетского технологического института, университета Буффало, компаний Microsoft и KPMG [10]), по утверждению разработчиков, позволяют реализовать такую трансформацию электростанций наиболее быстрым и дешевым образом с максимальным сохранением рабочих мест и инфраструктуры.

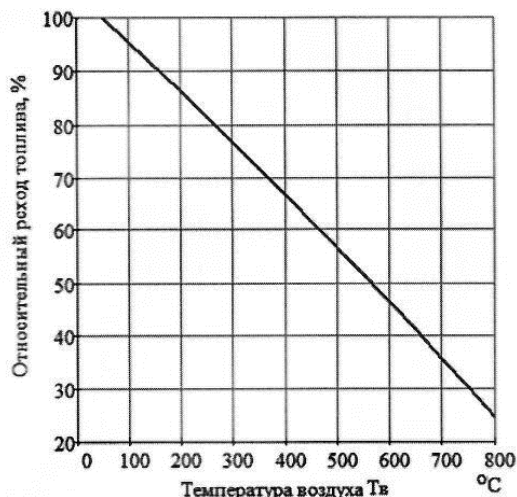


Рис. 9. Зависимость относительного расхода топлива от температуры подаваемого воздуха (к расходу при $T_v=50^\circ\text{C}$)

Fig. 9. The dependence of the relative fuel consumption on the temperature of the supplied air (to the consumption at $T_v=50^\circ\text{C}$)

Заклучение

Использование ВГТР в качестве источников тепла для технологических производств требует резервирования РУ для выполнения высоких требований по надежности, выдвигаемых большинством технологических процессов. С точки зрения капитальных затрат и безопасности, предпочтительна конфигурация АЭТС с РУ, используемыми в качестве основных источников, и традиционными котельными агрегатами на органическом топливе – в качестве резервных.

Предлагается конфигурация АЭТС со встраиванием РУ в существующую на технологическом производстве структуру источников тепла, которые самостоятельно обеспечивают требуемую надежность. Реализация предлагаемого способа потребует минимальных доработок существующих камер сгорания и трубопроводов системы разводки горячего воздуха при высокой безопасности транспортировки тепла, по сравнению с известными способами использования ВГТР для технологических производств.

Настоящий анализ может быть полезен при выборе конфигурации АЭТС как источника тепла для технологических производств, для анализа надежности и выполнения экономических оценок.

Работа выполнена в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Библиографический список

1. **Е.М. Herd**, L.J. Lommers, and F.H. Southworth. HTGR Strategies to Meet Process Heat Reliability and Availability Needs, Paper 10225, Proceedings of ICAPP 2010, San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010.
2. **Е.М. Herdl**, L.J. Lommers, F.H. Southworth, Impact of Plant Size on Strategies for Reliable Process Heat Supply, Paper 107, Proceedings of HTR 2010, Prague, Czech Republic, October 18-20, 2010.
3. **Проценко, А.Н.** Основные требования к ядерным источникам энергии для технологических производств и высокотемпературные ядерные реакторы / А.Н. Проценко, И.Г. Белоусов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Атомно-водородная энергетика и технология. 1980. Вып. 3.

4. Survey of HTGR Process Energy Applications. MPR-3181, Revision 0, May 2008.
5. **C. Peachey**. Load factors to end March 2016, Nucl. Eng. Int., Aug. 2016 Vol. 61. № 711. Зр. 40-44.
6. **Кирюшин, А.И.** Концепция безопасности опытно-промышленной реакторной установки ВГМ / А.И. Кирюшин, В.В. Булыгин, Н.Г. Кузавков, В.С. Воронцов, Н.Г. Кодочигов, В.Ф. Головки, Ю.П. Сухарев [Текст] // 3-я Ежегодная научно-техническая конференция Ядерного общества, «Ядерные технологии в завтрашнем мире» 14-18 сентября 1992 г, Санкт-Петербург, Россия.
7. **Митенков, Ф.М.** Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – энергоисточник для промышленного производства водорода / Ф.М. Митенков, Н.Г. Кодочигов, А.В. Васяев, В.Ф. Головки, Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин, А.Я. Столяревский // Атомная энергия. 2004. Т.97. Выш. 6. С.432-446.
8. **Kiryushin A.I.**, Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine // Nucl. Eng. and Design, 1997, V.173, p.119-129.
9. **Harth R.**, et.al., Experience Gained from the EVA II and KVK Operation, Nucl. Eng. Des. 121 (1990). 173-182.
10. Газета «Страна РОСАТОМ», №3 (515), январь 2022.

*Дата поступления
в редакцию: 30.03.2022*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГБЛОКА ПРИ ОПЕРАТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.Ю. Тучков

ORCID: 0000-0002-5752-7757 e-mail: TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

П.В. Поваров

ORCID: 0000-0002-6370-545X e-mail: PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

А.И. Тихонов

ORCID: 0000-0002-6402-2036 e-mail: TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

М.Н. Козловский

ORCID: 0000-0002-0065-9505 e-mail: Kozlovskiy_mn@sniip-atom.ru

ООО «Инновационная фирма СНИИП АТОМ»

Москва, Россия

В.П. Поваров

ORCID: 0000-0001-9092-9160 e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

Нововоронеж, Россия

Исследуется проблематика использования математических моделей энергоблоков при оперативной эксплуатации современных атомных электрических станций (АЭС). Возможности новейших автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) позволяют с помощью датчиков вести контроль базовых показателей работы блока: нейтронного потока, расхода, температуры, давления. В переходных процессах, когда количество поступающих сигналов растет лавинообразно, вероятность неправильных действий или пропуск правильного управляющего действия могут стать причиной нарушения нормальной эксплуатации. Опасность также представляют медленно изменяющиеся параметры. Процесс, потенциально приводящий к нарушению эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации, может развиваться в течение длительного времени. Очевидно, для отслеживания этих негативных тенденций от оператора требуется проводить анализ архивных данных.

Естественным развитием систем верхнего блочного уровня энергоблока является создание подсистем АСУ ТП для формирования советующих решений, позволяющих снизить информационную нагрузку на оператора при анализе большого объема архивных и текущих данных. Одним из инструментов для решения этой задачи при оперативной эксплуатации энергоблока является использование математической модели энергоблока, интегрированной в состав АСУ ТП.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, модель энергоблока, система информационной поддержки оператора, сигнализация, функции СИПО, валидация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тучков, М.Ю. Использование программной модели энергоблока при оперативной эксплуатации / М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, М.Н. Козловский, В.П. Поваров // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 58-68 DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_58

USE OF POWER UNIT SOFTWARE MODEL DURING OPERATION

M.Yu. Tuchkov

ORCID: **0000-0002-5752-7757** e-mail: **TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

P.V. Povarov

ORCID: **0000-0002-6370-545X** e-mail: **PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

A.I. Tikhonov

ORCID: **0000-0002-6402-2036** e-mail: **TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

M.N. Kozlovskiy

ORCID: **0000-0002-0065-9505** e-mail: **Kozlovskiy_mn@sniip-atom.ru**
JSC «SNIIP»
Moscow, Russia

V.P. Povarov

ORCID: **0000-0001-9092-9160** e-mail: **povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru**
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP
Novovoronezh, Russia

Abstract. Problems of power unit mathematical model use during operation of modern nuclear power plants (NPP) are researched. Capabilities of the latest automated process control systems (APCS) allow, with the help of sensors, to monitor the unit performance basic indicators: neutron flux, flow rate, temperature, pressure. In transients, when the number of incoming signals increases in an avalanche manner, the probability of incorrect actions or skipping of correct control action can cause disruption of normal operation. Slowly changing parameters are also dangerous. Process that potentially leads to a breach of operational limits and limits of safe operation can develop during long time. Obviously, to track these negative trends, the operator is required to analyze archived data.

Natural development of the power unit upper block level systems is the creation of APCS subsystems for the formation of advisory solutions that reduce the information load on the operator when analyzing a large volume of archival and current data. One of the tools for solving this problem during operation of the power unit is the use of power unit mathematical model integrated into APCS.

Key words: PWR-1200, power unit model, operator information support system, alarm system, ISOS-functions, validation.

FOR CITATION: M.Yu. Tuchkov, P.V. Povarov, A.I. Tikhonov, M.N. Kozlovskiy, V.P. Povarov. Use of power unit software model during operation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 58-68.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_58

Введение

В комментариях к НП-001-15 (РБ-152-18) [1] указано, что требование п.3.4.5.1 ставит перед разработчиком проекта атомных станций (АС) задачу отыскания такого способа обобщения информации о текущем состоянии безопасности АС, который позволил бы оператору по минимальному числу обобщенных параметров быстро оценить обстановку на блоке АС и принять решение. Обобщенная информация о текущем состоянии реакторной установки (РУ) и блока АС в целом также может быть получена в результате вычислений, реализуемых си-

стемой информационной поддержки оператора. Хорошей практикой является учет возможности диагностики состояния АС посредством системы информационной поддержки оператора при разработке руководств по управлению запроектными (в том числе? тяжелыми) авариями [2]. Основой функционирования системы информационной поддержки оператора (СИПО) в части принятия решений в задачах управления технологическим процессом является модель энергоблока, позволяющая проводить моделирование различных режимов эксплуатации.

ООО «ИФ СНИИП АТОМ» разработан макет СИПО энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС, в составе которого реализована, в том числе, программная модель (ПМ) энергоблока, включающая в себя:

- распределенную динамическую модель нейтронно-физических и тепло-гидравлических процессов в активной зоне;
- одномерную двухфазную модель тепло-гидродинамических процессов в основном оборудовании первого и второго контуров;
- модель основных регуляторов, защит и блокировок, реализованных в системах безопасности и управления реактором;
- модель электрогенератора и основных систем собственных нужд энергоблока.

Характерной особенностью расчета реакторных установок является взаимное влияние нейтронно-физических и теплофизических процессов в активной зоне. Это приводит к необходимости проведения сопряженных расчетов, когда результаты нейтронно-физического расчета становятся выходными параметрами для теплофизического расчета и наоборот. В дополнение к этому, различные регулирующие воздействия со стороны АСУ ТП оказывают влияние как на нейтронно-физические, так и на теплофизические процессы. В результате процедура осуществления расчета развития физических процессов энергоблока выглядит как последовательный циклический вызов всех трех расчетных компонентов математической модели (рис. 1). По окончании цикла расчетов производится возврат в начало цикла и запуск следующего цикла. Характерная величина глубины расчета по времени за один цикл составляет 0,1 с. Для инициализации начального состояния модели используются пакеты данных, формируемые системой верхнего блочного уровня (СВБУ). В качестве инициализирующего может использоваться как последний поступивший от СВБУ пакет данных, так и один из пакетов, записанных в архив. Пакеты данных формируются в СВБУ и поступают в ПМ с периодичностью 1 раз в секунду и записываются в архив, поэтому запуск расчета с помощью ПМ может быть произведен с состояния энергоблока на произвольную дату и время с точностью до секунды, на которую имеются архивы эксплуатационных данных.

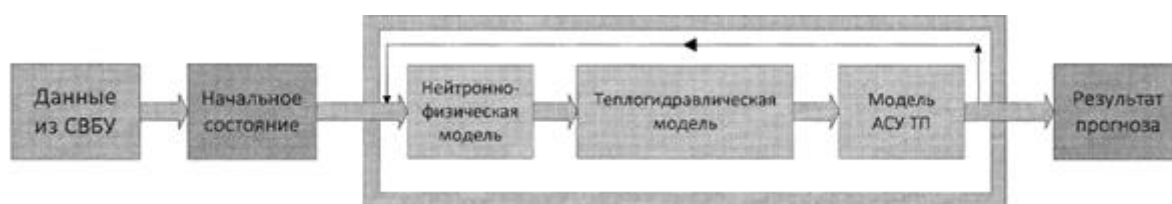


Рис. 1. Блок-схема основного расчетного цикла

Fig. 1. Block diagram of the main calculation cycle

Одним из преимуществ программной модели является ее быстродействие, позволяющее осуществлять расчет со скоростью на порядок, превышающей скорость протекания реального технологического процесса.

Нейтронно-физическая модель активной зоны

Модель энергоблока позволяет использовать на выбор одну из следующих моделей активной зоны реактора:

- точечная модель активной зоны, рассматривающая реактор в точечном приближении;
- распределенная нейтронно-физическая модель активной зоны.

Точечное приближение позволяет рассчитывать изменение мощности реактора без учета пространственного распределения делящихся материалов, шлаков и отравителей в активной зоне, а также расположения отдельных органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Точечная модель нейтронной кинетики используется для моделирования таких переходных режимов энергоблока, при которых пространственное распределение нейтронного поля реактора не успевает заметно измениться. Неравномерность нейтронного поля, а, следовательно, и поля энерговыделения по активной зоне не оказывает существенного влияния на протекающие процессы. Полагаем, что за время протекания переходных процессов не изменяются концентрация борной кислоты и отравление реактора ксеноном и самарием. Модель кинетики реактора при представлении спектра запаздывающих нейтронов шестью группами имеет вид:

$$M_k: \begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{\ell} \rho n - \frac{1}{\ell} \beta n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{\ell} \beta_i n - \lambda_i C_i \\ \rho = \alpha_T (\theta_c - \theta_{c0}) + \alpha_r (\theta_r - \theta_{r0}) + \alpha_p \mu_p \end{cases} \quad (1)$$

где:

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$;

n – нейтронный поток;

ℓ – среднее эффективное время жизни запаздывающих нейтронов в реакторе;

C_i – концентрация источников нейтронов i -й группы;

β_i – постоянная распада источников запаздывающих нейтронов;

λ_i – постоянная распада ядра-излучателя i -группы;

β – общая доля запаздывающих нейтронов относительно полного числа мгновенных нейтронов;

ρ – реактивность реактора, которая изменяется вследствие изменения температуры топлива и теплоносителя, положения регулирующих стержней и считается аддитивно зависящей от этих факторов;

α_T, α_r – температурные коэффициенты реактивности теплоносителя и ядерного топлива (UO_2);

θ_r, θ_c – температура ядерного топлива (UO_2) и средняя температура теплоносителя;

α_p – коэффициент эффективности регулирующих стержней;

μ_p – относительное перемещение этих стержней.

Точечная модель кинетики реактора достаточно правильно описывает динамику интегральных характеристик реактора. Распределенная нейтронно-физическая модель активной зоны реализована на базе программного комплекса SVS-kr, который включает в себя комплексы программ SVL и SVC. Программный комплекс SVL предназначен для подготовки нейтронно-физических констант. Программный комплекс SVC используется для трехмерного нейтронно-физического расчета активных зон. Вышеперечисленные программные комплексы аттестованы Ростехнадзором (аттестационные паспорта № 247, № 248, № 249). Заявленная точность программных комплексов по различным параметрам приводится в аттестационных паспортах. Дискретизация активной зоны для трехмерного нейтронно-физического расчета производится покассетно. Каждая тепловыделяющая сборка (ТВС) разбивается на 16 участков по высоте. Поскольку активная зона содержит 163 ТВС, расчетная модель активной зоны состоит из 2608 расчетных призм.

Теплогидравлическая модель

Теплогидравлическая модель реализована на базе расчетного кода собственной разработки. В расчетном коде реализована одномерная двухфазная теплофизическая модель, охватывающая основные процессы, протекающие в системах энергоблока. Система главных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в первом и втором контурах энергоблока, может быть записана следующим образом.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \alpha \rho_f}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_f \mathbf{v}_f) - \Gamma \quad (2)$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_g}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_g \mathbf{v}_g) + \Gamma \quad (3)$$

Уравнение сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса):

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}_f}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_f \mathbf{v}_f \otimes \mathbf{v}_f) + \mathbf{D}_f - \nabla p - \rho_f \mathbf{g} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_g \mathbf{v}_g}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_g \mathbf{v}_g \otimes \mathbf{v}_g) + \mathbf{D}_g - \nabla p \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = -(\rho_f \mathbf{v}_f \nabla h_f) + Z_{Tf} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} - Z_{\Gamma f} \quad (6)$$

$$\rho_g (1-\alpha) \frac{\partial h_g}{\partial t} = -(\rho_g \mathbf{v}_g \nabla h_g) + Z_{Tg} + (1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial t} + Z_{\Gamma g} \quad (7)$$

Уравнения состояния (замыкающие соотношения):

$$\begin{aligned} \rho &= f_1(p, h) \\ \frac{\partial \rho}{\partial p} &= f_2(p, h) \\ \frac{\partial \rho}{\partial h} &= f_3(p, h) \\ T &= f_4(p, h) \\ \mu &= f_5(T) \end{aligned} \quad (8)$$

где:

v – скорость; ρ – плотность;

α – объемная доля воды;

Γ – межфазный перенос массы;

P – давление; h – энтальпия;

λ – теплопроводность;

μ – коэффициент динамической вязкости;

T – температура;

D – диссипативный член;

Z_T – член учитывающий теплообмен через стенку и межфазный теплообмен;

Z_{Γ} – член учитывающий перенос тепла при изменении фазового состояния;

g – ускорение свободного падения;

f, g – индексы для жидкой и паровой фазы, соответственно.

В дополнение к вышеприведенным уравнениям записывается уравнение переноса нерастворимых примесей для моделирования транспорта борного поглотителя в первом контуре реакторной установки. Совместное решение системы уравнений (2)-(8) позволяет получить набор значений теплофизических величин (давление, энтальпия, температура, плотность для каждого объема расчетной схемы), а также значения массовых скоростей для каждой гидравлической связи расчетной схемы. В силу того, что решаемые уравнения нестационарны, получаемое решение является набором состояний рассматриваемой системы для раз-

личных срезов по времени на произвольную глубину прогнозирования вперед от некоторого заданного начального состояния.

Система уравнений (2)-(8) после дискретизации решается с помощью численных методов. Дискретизация подразумевает разбиение элементов расчетной схемы на отдельные расчетные узлы и связи. Теплогидравлическая модель энергоблока создается из набора расчетных схем, которые представляют собой наборы взаимосвязанных элементов оборудования. Расчетные схемы могут включать:

- трубы и камеры смешения;
- баки с уровнем раздела фаз;
- гидравлические связи между отдельными элементами;
- трубчатки теплообменных аппаратов;
- запорно-отсечную и регулируемую арматуру, обратные клапаны;
- насосы;
- электронагреватели;
- турбинные ступени.

На рис. 2-4 представлены расчетные схемы первого контура, системы продувки-подпитки и второго контура соответственно.

Модель АСУ ТП

Модель АСУ ТП реализована на базе отдельного программного модуля, обобщающего логику работы модельных схем контроля и управления. Комплект расчетных схем для модели АСУ ТП формируется с помощью редактора схем, который является составной частью программной среды «КРУИЗ». Наборы совместно скомпилированных схем воспроизводят алгоритмы работы основных регуляторов энергоблока, а также защит и блокировок. Расчетные схемы формируются на основе GET-схем типовых программно-технических средств (ТПТС), а также технического проекта АСУ ТП энергоблока и документации генерального конструктора РУ, поэтому модель АСУ ТП в целом повторяет логику, заложенную в АСУ ТП энергоблока. Общее количество расчетных схем системы управления составляет примерно 1000 единиц. Важно отметить, что алгоритмы работы регуляторов блока, ТЗБ, защиты в программную модель блока верифицированы по результатам пусконаладочных работ (ПНР).

Важно оптимизировать степень детализации расчетной схемы модели блока, для адекватного моделирования характерных переходных процессов. Валидация ПМ была проведена на базе архивных данных, полученных на этапе опытно-промышленной эксплуатации при проведении ПНР энергоблока. ПМ за счет своей высокой адекватности позволяет значительно «приблизиться» к реальному объекту, что обеспечивает отличие между результатами виртуальных и натуральных испытаний в пределах $\pm 5\%$.

В ПМ энергоблока разработаны модели основных исполнительных механизмов, включая электродвигатели и приводы задвижек.

К основным параметрам регулирования энергоблока относятся:

- мощность реактора;
- давление пара во втором контуре;
- давление в первом контуре;
- уровень в компенсаторе давления;
- уровень в парогенераторе;
- скорость разогрева-расхолаживания первого контура и компенсатора давления.

NOV6_1k

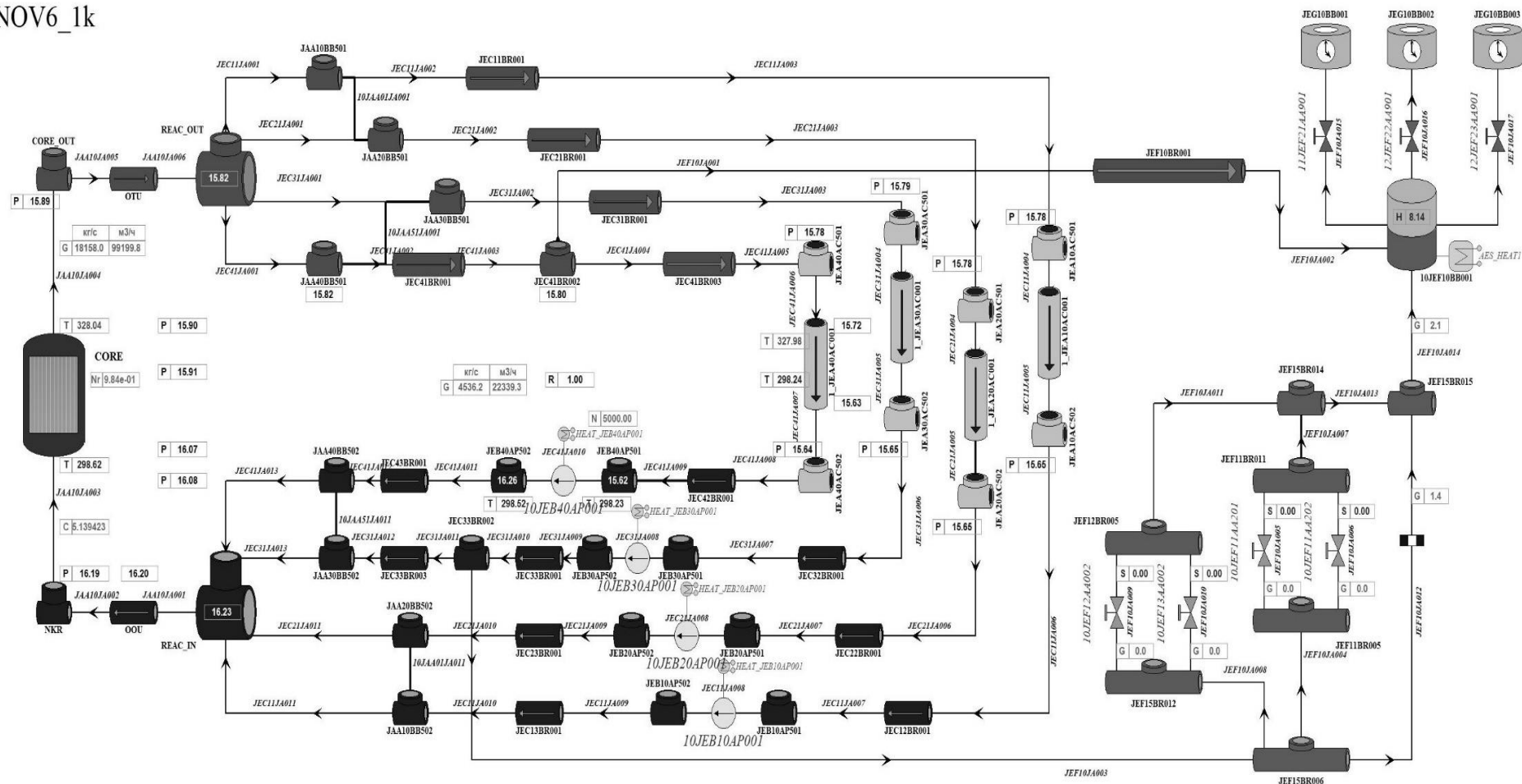


Рис. 2. Расчетная схема первого контура

Fig. 2. Design scheme of first circuit

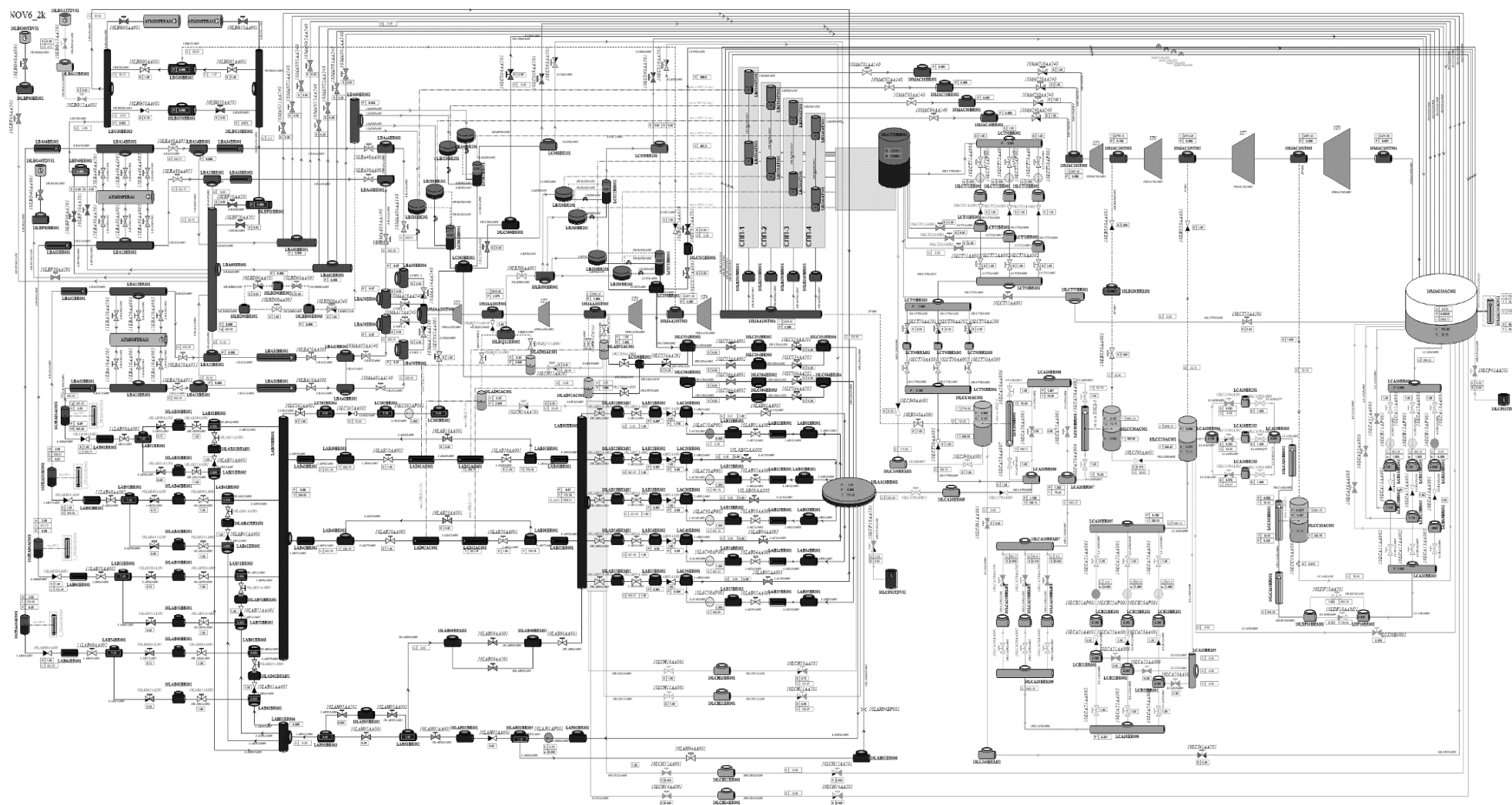


Рис. 4. Расчетная схема второго контура

Fig. 4. Design scheme of second circuit

Системы регулирования управляют мощностью реактора и турбины таким образом, чтобы при желаемом уровне мощности первый и второй контуры работали в энергетическом и материальном балансе. Особенностью моделирования регуляторов (и модели АСУ ТП в целом) является то, что отдельные параметры не только уточняются в процессе пусконаладочных работ, но и претерпевают изменения. В таком случае модель узла регулирования проходит через серию последовательных этапов:

- создание прототипа модели регулятора;
- разработка алгоритмов управления согласно проектной документации;
- тестирование и настройка параметров модельного регулятора по эксплуатационным данным;
- корректировка модели регулятора при изменении его параметров на энергоблоке в процессе пусконаладочных работ.

Функции СИПО

Спектр задач, решаемый с помощью ПМ, весьма разнообразен. В системе информационной поддержки оператора (СИПО) осуществляется мониторинг основного оборудования энергоблока. Функция предназначена для раннего выявления нарушений в работе основного оборудования энергоблока и систем контроля путем решения следующих задач:

- моделирование в реальном времени основного технологического процесса энергоблока (включая нейтронно-физический расчет активной зоны; теплогидравлический расчет первого и второго контуров, моделирование работы автоматики АСУ ТП);
- контроль достоверности показаний датчиков систем нормальной эксплуатации (СНЭ) и систем безопасности (СБ), в том числе, путем анализа взаимного соответствия показаний датчиков и расчетных величин;
- контроль состояния основного оборудования (положение арматуры, включение насосов, уровни в баках и т.д.) с выводом обобщенной и детализированной информации;
- суммирование текущего ресурса насосов, количества циклов открытия-закрытия арматуры, срабатываний предохранительных клапанов (если есть датчики);
- формирование архива для выявления медленно изменяющихся изменений характеристик оборудования (производительности, изменение эффективности теплообменников и т.д.)

Взаимное сравнение показаний замеров, получаемых из системы верхнего блочного уровня (СВБУ) и расчетных величин позволяют выявить деградацию средств измерений (при расхождении значений расчетной величины с измеряемой). Контроль автоматического управления (сравнение работы блочной АСУ ТП с моделью алгоритмов) позволяет выявить неработоспособные модули и недостоверность показаний концевых выключателей.

Еще одной функцией СИПО, основанной на быстродействии модели, является автоматическое прогнозирование параметров состояния основного оборудования энергоблока с выдачей предупредительной сигнализации о прогнозируемом выходе контролируемых параметров за эксплуатационные пределы в предположении отсутствия управляющих действий оператора в интервале времени, на который рассчитывается прогноз, начиная с текущего состояния. Таким образом, будущие события могут быть предсказаны с высокой точностью. А своевременное уведомление оператора о возможном выходе параметра за установленные пределы позволяет исключить нарушение нормальной эксплуатации. Прогнозирование развития технологического процесса также может быть запросным. В СИПО возможно моделирование последовательности событий и, после анализа результатов расчета, выбора наиболее оптимальная стратегия управления энергоблоком, функция СИПО «Рекомендации по управлению технологическим процессом» при этом будет осуществлять контроль правильности выбранной последовательности шагов.

Заключение

Прогнозирование состояния энергоблока в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации возможно с помощью программной модели энергоблока, подстраиваемой по эксплуатационным данным и включающей в себя нейтронно-физический расчет активной зоны реактора, теплогидравлический расчет первого и второго контуров и модель автоматики, управляющей основным технологическим оборудованием энергоблока.

Использование ПМ в широком диапазоне задач позволяют автоматизировать часть функций, возложенных на оператора. В настоящее время не идет речь о полной замене оператора подобными компьютерными системами. Последнее слово в принятии решения остается за человеком. Сейчас СИПО является инструментом по снижению информационной нагрузки операторов. Однако в дальнейшем, с увеличением контролируемых параметров, подобные системы станут необходимостью [3], а часть управляющих воздействий им можно будет делегировать.

Библиографический список

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП 001 15). РБ-152-18, М.: Ростехнадзор, 2018.
2. **Стацура, Д.Б.** Использование программной модели блока при совершенствовании проектных решений и оптимизации управления технологическим процессом [Текст] / Д.Б. Стацура., М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, С.П. Падун, А.П. Воробьев, М.М. Майорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №4. 2020. С37-49.
3. **Гусев, И.Н.** О проблеме интеллектуальной поддержки операторов для современных автоматизированных систем управления технологическим процессом энергоблоков с ВВЭР [Текст] / И.Н. Гусев, В.П. Поваров, М.Ю. Тучков, А.С. Кужиль, М.М. Майорова, С.П. Падун // Ядерная и радиационная безопасность. № S1. 2019. С. 46-54.

*Дата поступления
в редакцию: 30.03.2022*

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.1-46

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_69

ВЫБОР ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ МОНОБЛОЧНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

С.А. ГорожанкинORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ruДонбасская национальная академия строительства и архитектуры
*Макеевка, Донецкая Народная республика***Н.В. Савенков**ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ruДонбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, Донецкая Народная республика

Рассмотрены схемы построения серийных роботизированных коробок передач, предназначенных для автомобилей различных категорий. Выполнена их сравнительная оценка на основании относительных габаритов, влияния компоновочной схемы на реализуемый ряд передаточных чисел, предпочтительности применения и количества зубчатых колес. Поставлена задача уменьшить это количество, и, соответственно, габариты и массу рассматриваемых агрегатов, предназначенных для применения в конструкции автотранспортных средств категорий N_3 и M_3 при сохранении принятого количества передач переднего хода, характерного для многоблочных многоступенчатых коробок передач традиционной конструкции.

Предложены различные схемы многоступенчатых роботизированных коробок передач с использованием как отдельных конструкций механизмов сцепления, так и механизмов сдвоенного сцепления. Рассматриваются конструктивные особенности, основные кинематические соотношения, компоновочные закономерности, возможные законы изменения рядов передаточных чисел и отклонения от этих законов для механических коробок передач известных конструкций. Предложен подход к выбору геометрических параметров зубчатых зацеплений.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, многоступенчатая коробка передач, роботизированная коробка передач, кинематическая схема, передаточное число, количество передач, ряд передаточных чисел, межосевое расстояние, зубчатая передача, оптимизация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горожанкин, С.А. Выбор передаточных чисел моноблочных роботизированных коробок передач / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 69-83.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_69

SELECTION OF GEAR RATIOS OF MONOBLOCK ROBOTIC GEARBOXES

S.A. GorozhankinORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ruDonbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
*Makeevka, Donetsk People's Republic***N.V. Savenkov**ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ruDonbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
Makeevka, Donetsk People's Republic

Abstract. Schemes of construction of serial robotic gearboxes designed for automobiles of various categories, are considered. Their comparative evaluation on the basis of relative dimensions, the influence of layout scheme on implemented sequence of gear ratios, the preference for use, and the number of gears, was carried out. Problem is set to reduce this number, and, accordingly, the dimensions and weight of the considered units intended for use in the construction of motor vehicles of categories N_3 and M_3 while maintaining the accepted number of forward gears specific to multi-block multiple-speed gearboxes of traditional design.

Various schemes of multiple-speed robotic gearboxes using both separate designs of clutch mechanisms and dual clutch mechanisms, are proposed. Structural features, basic kinematic relations, layout patterns, possible laws of change in the sequence of gear ratios and deviations from these laws for mechanical gearboxes of known designs, are considered. Approach to selection of geometric parameters of gears is proposed.

Key words: truck, multiple-speed gearbox, robotic gearbox, kinematic scheme, gear ratio, number of gears, sequence of gear ratios, center distance, gear transmission, optimization.

FOR CITATION: S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov. Selection of gear ratios of monoblock robotic gearboxes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 69-83. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_69

Введение

Роботизированные коробки перемены передач (РКП) широко распространены в конструкции современного автомобиля. Их ключевым отличием от традиционной механической ступенчатой коробки передач (КП) является наличие системы автоматического управления механизмами сцепления, а также выбора и переключения передач. Таким образом, РКП – это механическая ступенчатая КП с автоматическим управлением.

В настоящее время широко применяются два основных типа РКП – оснащенные механизмом двойного сцепления (преселективные) и оснащенные одинарным сцеплением. Основное преимущество первых – относительно малое время переключения передач (до 0,1...0,2 с), а также практически полное отсутствие при этом разрывов энергосилового потока. Наиболее распространены серийные модели DSG (Volkswagen), I-Shift Dual Clutch (Volvo), PDK (Porsche), Alfa TCT (Alfa Romeo), PowerShift (Ford), Twin-Clutch SST (Mitsubishi) и т.д. Среди недостатков данных конструкций – снижение скорости переключений при замедлении автомобиля, увеличение продольного габаритного размера с ростом числа передач, значительное усложнение конструкции и более высокая стоимость. Основным преимуществом второго типа РКП является простота конструкции, которая фактически повторяет устройство традиционной механической ступенчатой КП и может быть создана на базе ее серийной модели. К этому типу РКП относятся: MultiMode (Toyota), Easytronic (Opel), Allshift (Mitsubishi), I-Shift (Volvo) и т.д. В грузовых автомобилях и автобусах применение РКП также эффективно, поскольку использование автоматических коробок передач традиционных типов (гидромеханических и бесступенчатых) для тяжелых грузовиков и тягачей встречает значительные конструктивные сложности. Кроме того, ввиду относительно невысокого среднего эксплуатационного КПД этих агрегатов, существенно возрастает путевой расход топлива. Вследствие указанных причин, для таких АТС рациональным является применение РКП. В настоящее время создано значительное число их конструкций, причем количество передач в таких агрегатах обычно лежит в пределах 8-20 [1].

Обычно при числе передач более шести механические КП снабжены делителем и (или) демультпликатором, которые значительно расширяют их возможности в плане увеличения числа передач и расширения диапазона передаточных чисел (ПЧ). Аналогичные схемы также применены и при конструировании РКП, например I-Shift AT2412D фирмы Volvo [2]. Использование столь сложного агрегата (фактически эту КП следует рассматривать как многоблочную, содержащую три сопряженных блока – одна основная и две КП) нельзя считать рациональным. Одним из направлений, позволяющим избежать увеличения размеров и обеспечить все преимущества РКП, становится компоновка многоступенчатой РКП по преселективной схеме.

Основной целью настоящей работы является исследование и оптимизация трехвальных схем с механизмом «двойного сцепления», хорошо зарекомендовавшим себя в конструкциях преселективных РКП.

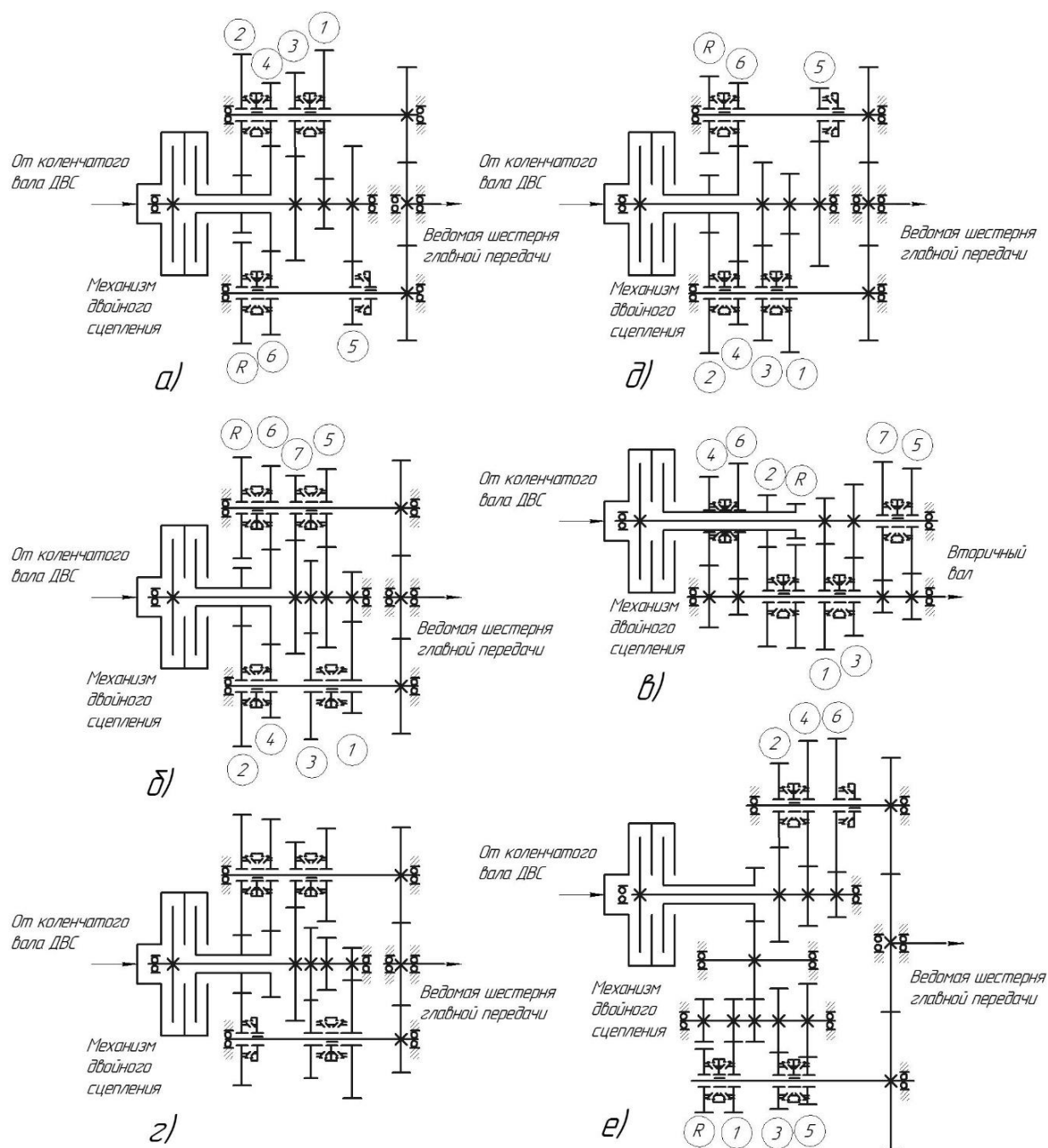


Рис. 1. Распространенные схемы серийных преселективных РКП:

a) DSG-6(DQ-250); б) DSG-7(DQ-200); в) DSG-7-OB5/OCJ/OCL/OCK (DL 501 / DL 382), Porsche PDK; г) Alfa TCT; д) Ford PowerShift; е) Mitsubishi Twin-Clutch SST (TC-SST)

Fig. 1. Common schemes of serial preselective RGB:

a) DSG-6(DQ-250); б) DSG-7(DQ-200); в) DSG-7-OB5/OCJ/OCL/OCK (DL 501 / DL 382), Porsche PDK; г) Alfa TCT; д) Ford PowerShift; е) Mitsubishi Twin-Clutch SST (TC-SST)

Теоретический анализ

В общем случае для моноблочной ступенчатой механической КП число зубчатых колес передач переднего хода составляет $2n_m$ (n_m – общее число передач переднего хода), не считая 2-3 дополнительных колес передачи заднего хода. Для многоступенчатых КП, оснащенных делителем и демультипликатором, рассматриваемая величина может составлять $1 \cdot n_m$ [3]. Общее количество зубчатых колес n_k , реализующих работу преселективной РКП, определяется зависимостью:

$$n_k = \sum_1^i n_{Si} + n_{II} = n_m \cdot \frac{n_k}{n_m}, \quad (1)$$

где n_m – количество передач переднего хода, реализуемое в КП; n_{II} – количество зубчатых колес постоянного зацепления; n_{Si} – количество зубчатых колес в i -й условной приводной плоскости; i – количество условных приводных плоскостей в КП.

Отношение в правой части приведенного выражения (n_k/n_m) представляет собой отношение общего количества зубчатых колес КП, реализующих передачи переднего хода, к их общему числу, и при прочих равных определяет технический уровень редуктора [4], а также его КПД [5]. Так, например, в КП модели DSG-6(DQ-250) (рис. 1а) общее количество приводных плоскостей составляет $i=5$, две из которых реализуются первичным валом четных передач, а оставшиеся – первичным валом нечетных передач. Количество приводных плоскостей с тремя зубчатыми колесами составляет 1 – для шестой и четвертой передачи, а количество приводных плоскостей с двумя зубчатыми колесами (что характерно для КП традиционных схем) составляет 4 – для 2-й, 3-й, 1-й и 5-й передач. Количество колес постоянного зацепления составляет $n_{II} = 5$ (с учетом колес заднего хода). В этом случае для КП DSG-6(DQ-250) $n_k = 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 5 = 3 \cdot 1 + 4 \cdot (2 \cdot 1) + 5 = 16$ или $2,67 \cdot n_m$. В табл. 1 данный параметр приведен для схем, изображенных на рис. 1. Достоинством схем а), б), г) и д), ввиду наличия зубчатых передач постоянного зацепления, является возможность организации с помощью этих передач функции главной передачи. Это решение находит применение в конструкциях АТС с поперечным расположением двигателя, расположенного около ведущей оси. При этом общее количество зубчатых колес в трансмиссии может быть уменьшено. Основное преимущество схемы в), получившей распространение на автомобилях с продольным расположением ДВС – сравнительно меньший радиальный размер, но больший осевой, а также уменьшенное количество зубчатых колес (ввиду отсутствия шестерен постоянного зацепления). В общем случае, с увеличением числа передач n_m , величина n_k асимптотически приближается к значению $n_k = \sum n_{Si}$; с ростом n_{Si} осевой размер КП сокращается, n_k уменьшается, но реализовать требуемый ряд передаточных чисел становится сложнее – ввиду компоновочных ограничений.

Для механических ступенчатых КП традиционной конструкции с цилиндрическими передачами величина n_k определяется выражением:

$$n_k = 2 \cdot \left[(n_{дел} - 2) + 1 + \frac{n_m + n_{\delta}}{n_{дем} \cdot n_{дел}} + n_{дем} \right] + n_{II}, \quad [n_{дем} > 1]; \quad (2)$$

$$n_k = 2 \cdot \left[(n_{дел} - 2) + 1 + \frac{n_m + n_{\delta}}{n_{дем} \cdot n_{дел}} \right] + n_{II}, \quad [n_{дем} = 1], \quad (3)$$

где $n_{дел}$ и $n_{дем}$ – количество передач, реализуемое делителем и демультипликатором соответственно, n_{δ} – количество заблокированных общих передаточных чисел.

По данным табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что самый худший по критерию n_k/n_m (МАЗ 6422) вариант рассмотренных схем многоблочных КП всего лишь на 23 % превосходит самый лучший по тому же критерию вариант РКП (DSG-7-OB5)

Таблица 1.

Параметры серийных преселективных РКП

Table 1.

Parameters of serial preselective RGB

Параметр	Volkswagen DSG-6(DQ- 250)	Volkswagen DSG-7 (DQ-200)	Volkswagen DSG-7-OB5	Alfa Romeo Alfa TCT	Ford PowerShift	Mitsubishi Twin-Clutch SST
n_m	6	7	7	6	6	6
n_k	$2,67 \cdot n_m$	$2,57 \cdot n_m$	$2,43 \cdot n_m$	$2,83 \cdot n_m$	$2,67 \cdot n_m$	$3,5 \cdot n_m$
n_{II}	5	5	3	6	5	6

Таблица 2.

Параметры серийных многоступенчатых механических многоблочных КП

Table 2.

Parameters of serial multiple-speed mechanical multi-block GB

Параметр	Volvo I-Shift AT2412D	КамАЗ 5410	МАЗ-239	МАЗ 6422
n_m	12	10	9	8
$n_{дел}$	2	2	1	1
$n_{дем}$	2	1	2	2
n_{II}^*	3	3	3	3
$n_б$	0	0	1	0
n_k	$1,25 \cdot n_m$	$1,5 \cdot n_m$	$1,89 \cdot n_m$	$1,88 \cdot n_m$
*- зубчатые колеса, реализующие передачу заднего хода				

Предлагаемые в настоящей работе схемы преселективных РКП для грузовых автомобилей и автобусов показаны на рис. 2. Агрегаты отличаются уменьшенным числом зубчатых колес, которое в общем случае составляет $1,5n_m + n_{II}$. Это может быть осуществлено по различным схемам.

Конструкция, схема которой представлена на рис. 2а, позволяет существенно уменьшить длину валов и, соответственно, их прогиб при нагрузках. Продольные размеры РКП уменьшаются, хотя ее поперечный габарит (ширина) возрастает. Однако, учитывая, что для ее ширины при установке на грузовые автомобили значительных ограничений обычно нет, такое решение является приемлемым, причем вторичный и промежуточные валы могут располагаться в разных плоскостях (V-образно). Отличительной особенностью приведенной схемы является постоянное зацепление каждого из колес вторичного вала с обоими промежуточными валами. Таким образом, для каждой i -й условной приводной плоскости (от «С» до «Н», рис. 2а) параметр $n_{Si} = 3$ – формула (1). Другим достоинством такой РКП является возможность увеличения числа передач до 12-16 и расширения диапазона передаточных чисел без дополнительных агрегатов (делителя и демультипликатора). Число зубчатых колес при этом составляет $1,5n_m + 7$ (с учетом задней передачи). Например, для 12-ступенчатой РКП рассматриваемой схемы ($n_m=12$) суммарное количество зубчатых колес, с учетом передачи заднего хода, составляет 25 или $2,08 \cdot n_m$. В то же время для традиционных моноблочных механических ступенчатых КП $2,42 \cdot n_m$, а для многоступенчатых КП с делителем и демультипликатором $1,25 \cdot n_m$ (рис. 3).

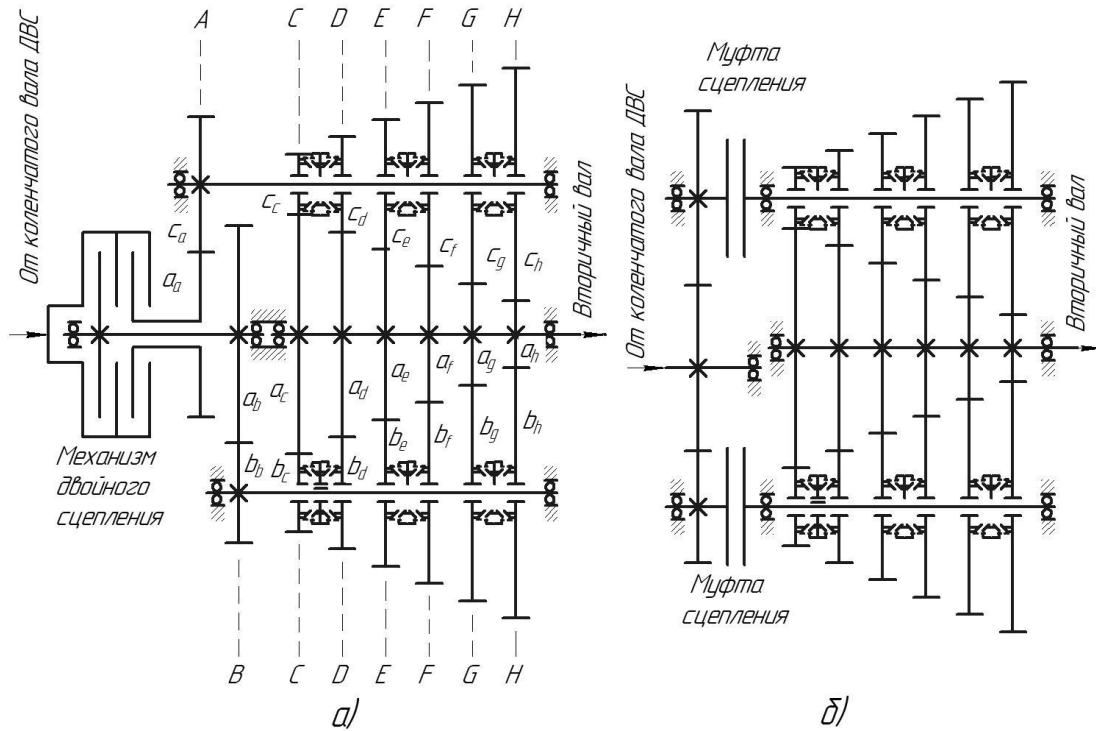


Рис. 2. Предлагаемые схемы роботизированных КП с двумя промежуточными валами (зубчатые колеса заднего хода условно не показаны):
 а) с механизмом сдвоенного сцепления; б) с двумя механизмами сцепления

Fig. 2. Proposed schemes of robotic gearboxes with two intermediate shafts (reverse gear wheels are not conventionally shown):
 a) with a dual clutch mechanism; b) with two clutch mechanisms

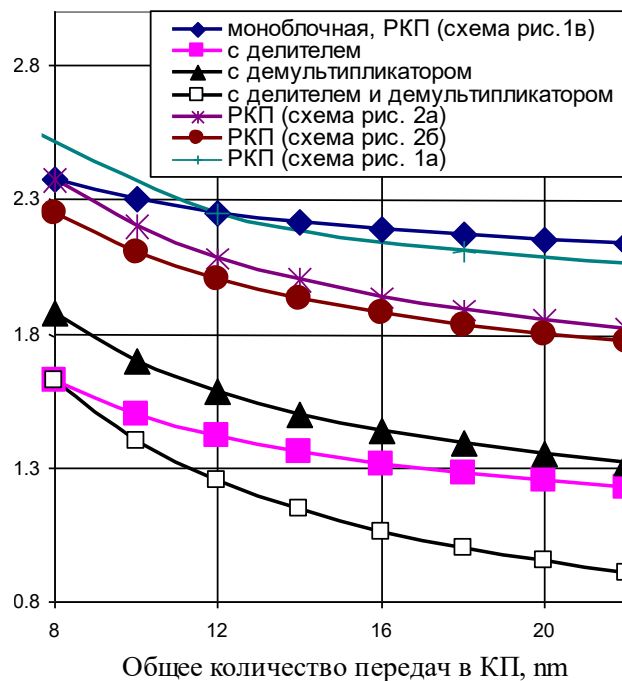


Рис. 3. Зависимость отношения n_k/n_m от количества передач переднего хода для различных конструкций механических ступенчатых КП

Fig. 3. Dependence of the n_k/n_m ratio on the number of forward gears for various designs of mechanical step-by-step gearbox

Отношение n_k/n_m для схемы 2а можно уменьшить путем использования двух разделенных механизмов сцепления, включаемых попеременно при разгоне автомобиля (рис. 2б). В этом случае минимальное число зубчатых колес при $n_m=12$ сокращается до 24 ($2 \cdot n_m$). Но такое решение едва ли приемлемо, поскольку механизм сдвоенного сцепления практически исключает возможность подключения обоих промежуточных валов при движении, в то время как отдельные механизмы сцеплений не исключают их одновременного включения. Кроме того, схема, приведенная на рис. 2б, вероятнее всего, конструктивно сложнее, чем введение всего одного дополнительного зубчатого колеса в соответствии со схемой рис. 2а. Здесь передаточные числа КП, имеющей m передач переднего хода (в рассматриваемом примере их 12), определяются следующим образом:

1) для передач с нечетным порядковым номером (при передаче энергосилового потока через верхний промежуточный вал «с») результирующее ПЧ определяется произведением ПЧ зубчатой передачи постоянного зацепления U_{ac} (работающего в плоскости «А» и приводящей промежуточный вал «с», рис. 2а) и ПЧ соответствующей зубчатой передачи промежуточный вал «с» – вторичный вал «а» (работающей в одной из плоскостей «С»... Н):

$$U_1 = U_H = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_c}{c_c} = U_{ac} \cdot \frac{a_c}{c_c}; \quad U_3 = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_d}{c_d} = U_{ac} \cdot \frac{a_d}{c_d}; \quad U_5 = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_e}{c_e} = U_{ac} \cdot \frac{a_e}{c_e};$$

$$U_7 = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_f}{c_f} = U_{ac} \cdot \frac{a_f}{c_f}; \quad U_9 = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_g}{c_g} = U_{ac} \cdot \frac{a_g}{c_g}; \quad U_{11} = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_h}{c_h} = U_{ac} \cdot \frac{a_h}{c_h},$$

где a_a, c_a – делительные радиусы соответственно шестерни и зубчатого колеса передачи постоянного зацепления привода промежуточного вала нечетных передач «с»; $a_c \dots a_h$ – делительные радиусы зубчатых колес вторичного вала «а»; $c_c \dots c_h$ – делительные радиусы шестерен промежуточного вала нечетных передач «с»; U_H – ПЧ низшей передачи в КП;

2) для передач с четным порядковым номером (при передаче энергосилового потока через нижний промежуточный вал «b»), результирующее ПЧ определяется произведением ПЧ зубчатой передачи постоянного зацепления U_{ab} (работающего в плоскости «В» и приводящей промежуточный вал «b», рис. 2а), и ПЧ соответствующей зубчатой передачи промежуточный вал «b» – вторичный вал:

$$U_2 = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_c}{b_c} = U_{ab} \cdot \frac{a_c}{b_c}; \quad U_4 = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_d}{b_d} = U_{ab} \cdot \frac{a_d}{b_d}; \quad U_6 = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_e}{b_e} = U_{ab} \cdot \frac{a_e}{b_e};$$

$$U_8 = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_f}{b_f} = U_{ab} \cdot \frac{a_f}{b_f}; \quad U_{10} = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_g}{b_g} = U_{ab} \cdot \frac{a_g}{b_g}; \quad U_{12} = U_B = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_h}{b_h} = U_{ab} \cdot \frac{a_h}{b_h},$$

где a_b, b_b – делительные радиусы соответственно шестерни и зубчатого колеса передачи постоянного зацепления привода промежуточного вала четных передач «b»; $b_c \dots b_h$ – делительные радиусы шестерен промежуточного вала четных передач «b»; U_B – ПЧ высшей передачи в КП.

Таким образом, зависимости, определяющие результирующие ПЧ рассматриваемой КП, могут быть представлены в общем виде:

- для передач с нечетным порядковым номером ($m=1,3,5 \dots$):

$$U_{n(m)} = U_{ac} \cdot \frac{a_{(m)}}{c_{(m)}} = U_{ac} \cdot U_{axc(m)}, \quad (1)$$

- для передач с четным порядковым номером ($m=2,4,6 \dots$):

$$U_{ч(m)} = U_{ab} \cdot \frac{a_{(m)}}{b_{(m)}} = U_{ab} \cdot U_{axb(m)}, \quad (2)$$

где $a_{(m)}$ – делительный радиус зубчатого колеса вторичного вала «а» при включенной передаче m ; $c_{(m)}$ – делительный радиус шестерни промежуточного вала «с» при включенной пере-

даче m ; $b_{(m)}$ – делительный радиус шестерни промежуточного вала «b» при включенной передаче m ; $U_{axc(m)}$ – передаточное число зубчатой пары промежуточный вал «с» – вторичный вал «а», обеспечивающее формирование ПЧ передачи с нечетным порядковым номером m ; $U_{axb(m)}$ – передаточное число зубчатой пары промежуточный вал «b» – вторичный вал «а», обеспечивающее формирование ПЧ передачи с четным порядковым номером m .

Рассмотренные параметры для каждой из передач, участвующие в формировании общего ПЧ коробки передач, приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Составляющие для определения ПЧ 12-ступенчатой РКП предлагаемой схемы

Table 3.

Constituents for determining of GR of the 12-step RGB of the proposed scheme

Параметры режима РКП	Порядковый номер включенной передачи переднего хода, m											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ПЧ постоянного зацепления, привод промежуточного вала	U_{ac}	U_{ab}	U_{ac}	U_{ab}	U_{ac}	U_{ab}	U_{ac}	U_{ab}	U_{ac}	U_{ab}	U_{ac}	U_{ab}
Плоскость работы зубчатой передачи постоянного зацепления	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В
$a_{(m)}$	a_c		a_d		a_e		a_f		a_g		a_h	
$c_{(m)}$	c_c	-	c_d	-	c_e	-	c_f	-	c_g	-	c_h	-
$b_{(m)}$	-	b_c	-	b_d	-	b_e	-	b_f	-	b_g	-	b_h
Плоскость передачи с промежуточного вала на вторичный вал, n	С		D		E		F		G		H	

С учетом обеспечения необходимых значений U_H и U_B , соответственно, при включении низшей и высшей передач, на зависимости (1) и (2) накладываются частные условия:

$$U_{n(1)} = U_{ac} \cdot \frac{a_{(1)}}{c_{(1)}} = U_{ac} \cdot \frac{a_c}{c_c} = \frac{c_a}{a_a} \cdot \frac{a_c}{c_c} = U_H, \quad (3)$$

$$U_{ч(m=nm)} = U_{ab} \cdot \frac{a_{(m=nm)}}{b_{(m=nm)}} = U_{ab} \cdot \frac{a_{(m=nm)}}{b_{(m=nm)}} = \frac{b_b}{a_b} \cdot \frac{a_{(m=nm)}}{b_{(m=nm)}} = U_B, \quad (4)$$

где n_m – количество передач переднего хода, реализуемое КП.

В соответствии с приведенными соотношениями, характерными для рассматриваемой конструкции КП, низшее ПЧ U_H всегда обеспечивается промежуточным валом нечетных передач «с» и зубчатыми передачами, работающими в плоскостях «А» и «С», а высшее ПЧ U_H – промежуточным валом четных передач «b» и зубчатыми передачами, работающими в плоскости «В» и плоскости, обеспечивающей реализацию высшего передаточного числа (при $m=n_m$) и передаточного числа предпоследней передачи (при $m= n_m - 1$).

Приведенные условия обусловлены тем, что:

- 1) количество передач переднего хода в рассматриваемой конструкции является четным;
- 2) процесс разгон автомобиля на передаче $1 \leq m < n_m$ всегда сопровождается подключенной шестерней передачи $m+1$ к соответствующему промежуточному валу при разомкнутом сцеплении, приводящем этот вал; таким образом, один промежуточный вал реализует четные передачи, а другой – нечетные.

Рассмотрим компоновочные закономерности РКП, выполненной по схеме рис. 2а, обусловленные взаимным расположением валов и зубчатых колес:

- 1) $a_n + b_n = \text{const}$ и $a_n + c_n = \text{const}$, где n – индекс зубчатой передачи (от «А» до «Н»); таким образом, для конструкции, приведенной на рис. 2а:
 $a_a + c_a = a_c + c_c = a_d + c_d = a_e + c_e = a_f + c_f = a_g + c_g = a_h + c_h = \text{const} = a_{w(c)}$;

$$a_b + b_b = a_c + b_c = a_d + b_d = a_e + b_e = a_f + b_f = a_g + b_g = a_h + b_h = \text{const} = a_{w(b)},$$

где $a_{w(c)}$ и $a_{w(b)}$ – межосевые расстояния между вторичным валом и промежуточным валом «с», а также между вторичным валом и промежуточным валом «b».

Ряд передаточных чисел, реализуемый в КП рассматриваемой схемы (рис. 2а), с одной стороны, должен достаточно близко приближаться к ряду ПЧ, определяемому техническим заданием на проектирование, а с другой – удовлетворять компоновочным геометрическим закономерностям при обеспечении минимальных габаритов и заданных показателей прочности и долговечности агрегата. Выполним исследования предлагаемой схемы многоступенчатой КП в отношении возможности реализации различных рядов передаточных чисел. В качестве этих рядов выбраны зависимости, определяемые общим уравнением прогрессии с переменным знаменателем [6]:

$$U_{Ж(m)} = \sqrt{\varphi^{(m-n_m)(m-1)}} \cdot n_m^{-1} \sqrt{U_{(H)}^{n_m-m} \cdot U_{(B)}^{m-1}}, \quad (5)$$

где $U_{Ж(m)}$ – предпочтительное общее ПЧ коробки передач при включенной передаче переднего хода с порядковым номером m ; n_m – общее количество в КП передач переднего хода; φ – показатель прогрессии.

Уравнение (5) является универсальным, так как при различных φ позволяет получить простейшие ряды передаточных чисел (рис. 4).

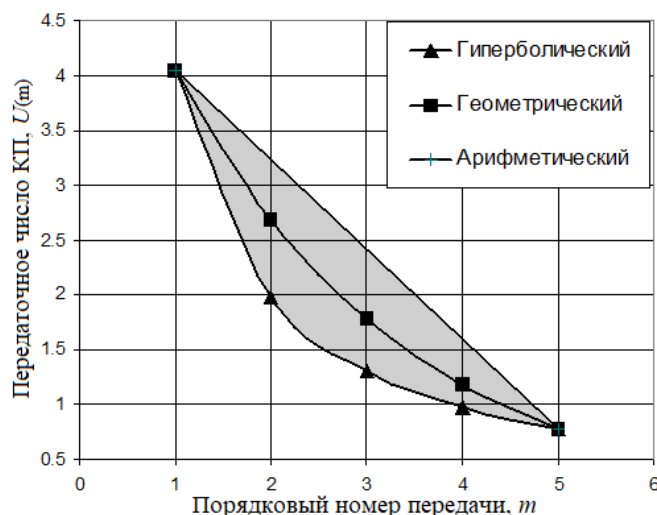


Рис. 4. Простейшие законы построения рядов передаточных чисел трансмиссии (при фиксированных значениях U_H и U_B)

Fig. 4. The simplest laws of constructing of transmission gear ratio sequences (with fixed values of U_H and U_B)

Показатель φ принимается постоянным при расчете всех значений $U_{Ж(m)}$ в пределах одной КП. При $\varphi = 1$ реализуемый в итоге ряд ПЧ представляют собой геометрическую прогрессию – один из простейших и относительно распространенных в автомобильной промышленности рядов ПЧ, который, кроме прочих известных достоинств (обеспечение некоторого баланса между топливной экономичностью и тягово-скоростными эксплуатационными свойствами) [7], является предпочтительным с компоновочной позиции при конструировании многовальных многоступенчатых коробок передач.

При $\varphi > 1$ ряд ПЧ коробки передач приближается к гиперболическому ряду.

При $\varphi < 1$ приближается к арифметическому ряду.

На рис. 4 затемненный участок представляет собой возможную область расположения законов построения ряда ПЧ коробки передач при различных значениях показателя прогрес-

сии φ . Далее рассмотрим вопрос возможности реализации предпочтительного ряда передаточных чисел, заданным уравнением (5), за счет рационального выбора геометрических параметров КП конструкции, приведенной на рис. 2а, для различных сочетаний количества передач переднего хода и диапазона передаточных чисел. В соответствии с зависимостями (1) и (2) ПЧ КП определяются следующими соотношениями:

- для ряда нечетных передач КП рассматриваемой конструкции ПЧ определяется условием:

$$U_{n(m)} = \begin{cases} U_{ж(m)}(m) & \text{если } m < (n_m - 1) \\ U_{ac} \cdot U_{axc}(U_{ab}, a_{W(b)}) & \text{если } m = (n_m - 1) \end{cases} \quad (6)$$

Запись 1-й строки логического оператора объясняется тем, что сам по себе (в конструктивном отношении) нечетный ряд передаточных чисел может обеспечить реализацию любого ряда передаточных чисел – как и традиционная ступенчатая КП. Однако при $m = n_m - 1$ делительный радиус $a_{(m)}$ соответствующего зубчатого колеса вторичного вала не может быть выбран произвольно по условию обеспечения требуемого ряда ПЧ, поскольку этот геометрический параметр также участвует в обеспечении четного передаточного числа U_B и принадлежащему предпочтительному ряду ПЧ. В качестве примера можно рассмотреть 11-ю передачу КП (рис. 2а). Делительный радиус a_h участвует в формировании ПЧ как 11-й передачи, так 12-й, высшей передачи. А поэтому, поскольку приоритет отдается обеспечению значения U_B для высшей передачи (в соответствии с ранее принятыми условиями), ПЧ предпоследней, 11-й, передачи будет определено исключительно ранее принятыми геометрическими параметрами: a_h , a_a и a_c . Таким образом, ПЧ предпоследней передачи (U_{axc}), принадлежащей нечетному ряду передач КП, в общем виде определяется системой из трех уравнений, составленных для высшей передачи и обуславливающих рассмотренные компоновочные закономерности КП:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad \frac{c_{(m-1)} + a_{(m)}}{a_{(m)} + b_{(m)}} = \frac{a_{W(c)}}{a_{W(b)}} \\ 2) \quad c_{(m-1)} + a_{(m)} = a_{W(c)} \\ 3) \quad \frac{a_{(m)}}{b_{(m)}} = \frac{U_B}{U_{ab}} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Система содержит три неизвестных: $a_{(m)}$, $b_{(m)}$ и $c_{(m-1)}$. После нахождения данных параметров U_{axc} определяется по зависимости (1): $U_{axc} = a_{(m)} / c_{(m-1)}$. Для 12-ступенчатой КП (рис. 2а) уравнение (7) приобретает вид:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad \frac{c_h + a_h}{a_h + b_h} = \frac{a_{W(c)}}{a_{W(b)}} \\ 2) \quad c_h + a_h = a_{W(c)} \\ 3) \quad \frac{a_h}{b_h} = \frac{U_B}{U_{ab}} \end{array} \right\} \quad (8)$$

Рассмотрим решение системы уравнений. Оно производится в относительном виде – все геометрические размеры КП соотносятся к межосевому расстоянию $a_{W(c)}$, а величина $a_{W(c)}$ принимается равной 1:

выразим $a_{(m)}$ из 2-го уравнения системы (7): $a_{(m)} = 1 - c_{(m-1)}$;

выполним подстановку полученного выражения в уравнение 3 системы (7):

$$(1 - c_{(m-1)}) / b_{(m)} = U_B / U_{ab};$$

выразим из полученного соотношения $b_{(m)}$:

$$b_{(m)} = (1 - c_{(m-1)}) \cdot U_{ab} / U_B;$$

выполним подстановку полученного выражения в уравнение 1 системы (7):

$$c_{(m-1)} + (1 - c_{(m-1)}) / ((1 - c_{(m-1)}) + (1 - c_{(m-1)}) \cdot U_{ab} / U_B) = a_{W(b)}^{-1};$$

упростим полученное уравнение и выразим $c_{(m-1)}$:

$$c_{(m-1)} = (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} + a_{W(b)}^{-1} - 1) / (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} / U_B + a_{W(b)}^{-1});$$

определим U_{axc} :

$$U_{axc} = a_{(m)} / c_{(m-1)} = (1 - (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} + a_{W(b)}^{-1} - 1) / (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} / U_B + a_{W(b)}^{-1})) / (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} + a_{W(b)}^{-1} - 1) / (a_{W(b)}^{-1} \cdot U_{ab} / U_B + a_{W(b)}^{-1}).$$

Соответственно, при заданном параметре U_B , U_{axc} будет являться функцией $U_{axc} = f(U_{ab}, a_{W(b)})$, что и отражено в выражении (6). По аналогии с (6), для ряда четных передач КП рассматриваемой конструкции ПЧ определяется условием:

$$U_{\varphi(m)} = \begin{cases} U_{ab} \cdot U_{axb}(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) & \text{если } m < n_m \\ U_B & \text{если } m = n_m \end{cases} \quad (9)$$

Запись 1-й строки логического оператора определяется формулой (2) и объясняется тем, что ПЧ всех четных передач (кроме последней) получены от делительных радиусов $a_{(m)}$ зубчатых колес вторичного вала, которые уже принимают участие в формировании ряда нечетных передач (6), повторяющего предпочтительный ряд ПЧ. Поэтому степень соответствия передаточных чисел нечетных передач предпочтительному ряду ПЧ (которому в общем случае принадлежат все нечетные ПЧ КП кроме $m-1$) определяется параметром U_{ab} и функцией $U_{axb} = f(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$. Данная функция, по аналогии с (7), определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad \frac{c_{(m-1)} + a_{(m)}}{a_{(m)} + b_{(m)}} = \frac{a_{W(c)}}{a_{W(b)}} \\ 2) \quad c_{(m-1)} + a_{(m)} = a_{W(c)} \\ 3) \quad \frac{a_{(m)}}{c_{(m-1)}} = \frac{U_{(m-1)}}{U_{ac}} \end{array} \right\} ; \quad (10)$$

Рассмотрим решение системы уравнений при $a_{W(c)} = 1$:

- выразим $a_{(m)}$ из 2-го уравнения: $a_{(m)} = 1 - c_{(m-1)}$;
- выполним подстановку полученного выражения в уравнение 3 системы (10):
- $(1 - c_{(m-1)}) / c_{(m-1)} = U_{(m-1)} / U_{ac}$;
- выразим из полученного соотношения $c_{(m)}$:
- $c_{(m-1)} = 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1)$;
- выполним подстановку полученного выражения в уравнение 1 системы (10):
- $(1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) + (1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1))) / ((1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1)) + b_{(m)}) = a_{W(b)}^{-1}$
- выразим из полученного выражения $b_{(m)}$:
- $b_{(m)} = (1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) + 1 - c_{(m-1)} - a_{W(b)}^{-1} \cdot (1 - c_{(m-1)})) / a_{W(b)}^{-1} =$
- $= (1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) + 1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) - a_{W(b)}^{-1} \cdot (1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1))) / a_{W(b)}^{-1}$;
- определим на основании (2) U_{axb} :
- $U_{axb} = U_{ab} \cdot a_{(m)} / b_{(m)} = U_{ab} \cdot (1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1)) / (1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) + 1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1) - a_{W(b)}^{-1} \cdot (1 - 1 / (U_{(m-1)} / U_{ac} + 1))) / a_{W(b)}^{-1}$;
- т.к. $U_{(m-1)}$ для ряда четных передач является ПЧ ряда нечетных передач, то выполним замену: $U_{(m-1)} = U_{n(m-1)}$ – формула (6):
- $U_{axb} = U_{ab} \cdot a_{(m)} / b_{(m)} = U_{ab} \cdot (1 - 1 / (U_{n(m-1)} / U_{ac} + 1)) / (1 / (U_{n(m-1)} / U_{ac} + 1) + 1 - 1 / (U_{n(m-1)} / U_{ac} + 1) - a_{W(b)}^{-1} \cdot (1 - 1 / (U_{n(m-1)} / U_{ac} + 1))) / a_{W(b)}^{-1}$.

Полученное в итоге выражение определяет в итоге ряд передаточных чисел четных передач КП. Соответственно, U_{axb} , по аналогии с U_{axc} является функцией: $U_{axc} = f(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$. Это отражено в выражении (9). Таким образом, фактический ряд передаточных чисел рассматриваемой КП определяется выражением, содержащем условия (6) и (9):

$$U_{\phi(m)} = \begin{cases} U_{n(m)}(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) & \text{если } m \text{ нечетное} \\ U_{\varphi(m)}(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) & \text{если } m \text{ четное} \end{cases} \quad (11)$$

Целевая функция для оценки степени соответствия фактического ряда ПЧ КП $U_{\Phi(m)} = f(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$ предпочтительному $U_{Ж(m)} = f(m)$ предлагается следующая:

$$F = f(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) = \frac{1}{n_m} \left(\left(\sum_{m=1}^{n_m} \left| 1 - \frac{U_{Ж(m)}}{U_{\Phi(m), U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}}} \right| \right) + Y(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) \right), \quad (12)$$

где $Y = f(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$ – функция показателя граничных условий Y .

Функция критерия F принимает минимальное значение, равное 0, при полном соответствии фактического ряда передаточных чисел предпочтительному. Если показатель Y принимает значение, равное 0, все граничные условия выполняются и КП принципиально может быть сконструирована для выбранных входных параметров:

$$Y = f(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) = \sum_{m=1}^{n_m} \begin{cases} 0 & \text{если } U_{\Phi(m), U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}} > Z(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}); \\ K & \text{иначе} \end{cases}; \quad (13)$$

$$Z = f(m, U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}) = \begin{cases} U_{\Phi(m+1), U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac}} & \text{если } m < n_m, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (14)$$

где K – положительное число, кратно превышающее максимальное допустимое относительное отклонение ПЧ фактического ряда от предпочтительного; пара вложенных функций Y и Z обеспечивает основное условие построения ряда ПЧ – с увеличением порядкового номера передачи, передаточное число должно уменьшаться; таким образом, при выполнении этого условия функция Y принимает нулевое значение.

Соответственно, задача рационального выбора геометрических параметров КП, обеспечивающих максимально возможное соответствие фактического ряда ПЧ предпочтительному, сводится к решению задачи оптимизации, для которой:

- критерием является минимальное значение целевой функции F ;
- параметрами – U_{ab} , $a_{W(b)}$ и U_{ac} ;
- ограничениями – функция Y , а также возможные дополнительные ограничения по относительным габаритным размерам многоступенчатого редуктора или отдельным ПЧ, например: $0,22 < U_{ab} < 4,5$; $0,22 < U_{ac} < 4,5$, – ограничение на минимальное и максимальное ПЧ, реализуемое в пределах одной зубчатой пары; $0,5 < a_{W(b)} < 3$ – ограничение на относительное межосевое расстояние КП и т.д.

При этом исходными данными (входными параметрами) для выполнения процедуры оптимизации являются:

- диапазон передаточных чисел КП: $D_{КП} = U_H/U_B$;
- ПЧ нижней передачи U_H ;
- количество передач переднего хода n_m ;
- показатель прогрессии предпочтительного ряда ПЧ φ .

Для решения поставленной задачи может быть применено множество методик многопараметрической оптимизации, в том числе, специальные встроенные операторы различных программных продуктов. Например, в программной среде табличного процессора Microsoft Excel может быть применен оператор «Поиск решения» при предварительно заданных начальных приближениях для оптимизационных параметров. В программной среде компьютерной алгебры «Mathcad» может быть применена функция «Minimize»; также с предварительно заданными начальными приближениями. С целью более подробного исследования кинематики предлагаемой схемы РКП, был выполнен оптимизационный расчет ее параметров на предмет возможности соответствия основным кинематическим параметрам серийных многоступенчатых КП. Параметры этих КП и результаты решения поставленной задачи приведены в табл. 4. Данные получены при следующих дополнительных ограничениях:

- передаточное число в пределах одной зубчатой пары от 0,22 до 4,5;
- отношение межосевых расстояний от 0,5 до 3.

Графическое отображение целевой функции $F = f(U_{ab}, a_{w(b)}, U_{ac})$ для параметров КП МАЗ-239 [8], выбранной в качестве примера, приведено на рис. 5. Минимальное значение $F = 0,0162$ эта функция принимает при следующих значениях ее аргументов (параметров оптимизации): $U_{ab} = 1,85$, $a_{w(b)} = 1,054$, $U_{ac} = 2,162$. Соответственно, при этих значениях закон ряда ПЧ будет наиболее близок к выбранному прототипу.

Таблица 4.

**Результаты оптимизационного расчета основных параметров РКП
на основании параметров выбранных серийных КП-прототипов**

Table 4.

**Results of optimization calculation of main parameters of RGB
based on the parameters of selected serial GB prototypes**

Параметры	Обозначение	Модели КП-прототипов			
		Volvo I-Shift AT2412D ¹	КамАЗ 5410 ²	МАЗ-239 ³	МАЗ 6422 ⁴
Количество передач переднего хода	n_m	12	10	9	8
Диапазон ПЧ	$D_{КП}$	14,94	9,595	15,69	10,89
ПЧ низшей передачи	U_H	14,94	7,82	12,24	7,73
Показатель прогрессии ряда ПЧ	φ	1	$\approx 1,01$	$\approx 1,04$	1
Основные кинематические параметры РКП, обеспечивающей вышеприведенные параметры прототипа (рис. 2а)					
Количество передач переднего хода	n_m	12	10	10	8
Передаточное число от первичного вала к валу «b»	U_{ab}	3,167	1,811	1,85	1,659
Относительное межосевое расстояние между валом «a» и валом «b»	$a_{w(b)}$	1,004	1,025	1,054	1
Передаточное число от первичного вала к валу «с»	U_{ac}	4	2,189	2,162	2,333
Передаточное число от вала «a» к валу «b» для высшей передачи	U_B/U_{ab}	0,316	0,45	0,422	0,428
Передаточное число от вала «a» к валу «с» для передачи $m=n_m-1$	U_{axc}	0,317	0,466	0,455	0,428
Передаточное число от вала «a» к валу «b» для 2-й передачи	U_{axb}	3,673	3,21	4,166	3,313
Передаточное число от вала «a» к валу «с» для первой передачи	U_H/U_{ac}	3,735	3,572	5,661	3,313
Среднее относительное отклонение фактического ряда ПЧ от предпочтительного, обусловленного показателем φ	F	0,0021	0,0032	0,0162	$1,5 \cdot 10^{-7}$
¹ 2-хступенчатый делитель, 3-хступенчатая основная КП, 2-хступенчатый демультипликатор; ² 2-х ступенчатый делитель, 5-ти ступенчатая основная КП; ³ 5-тиступенчатая основная КП, 2-хступенчатый демультипликатор (КП с заблокированными вариантами ПЧ).					

Таким образом, предлагаемая схема преселективной РКП в рассмотренном сравнении характеризуется достаточно невысокой величиной среднего относительного отклонения F и позволяет воссоздать ряд передаточных чисел выбранных коробок передач-прототипов.

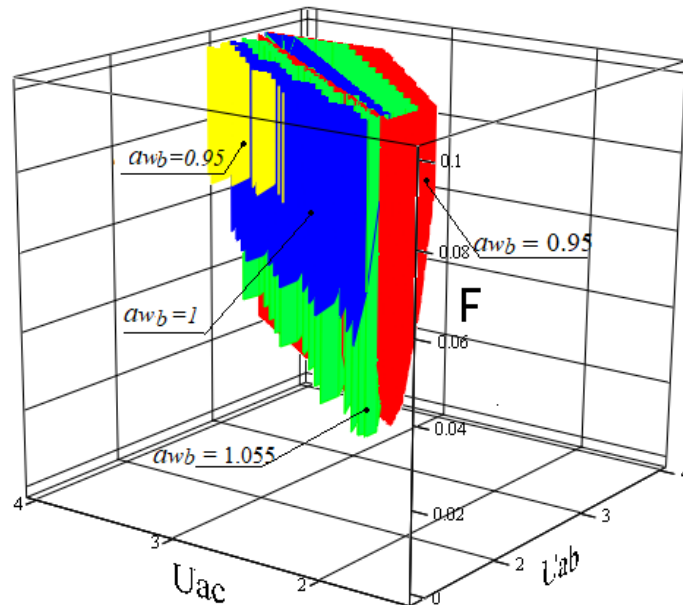


Рис. 5. Функция $F = f(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$ для РКП схемы рис. 2а при воссоздании ряда ПЧ КП МАЗ-239: параметры U_{ac} и U_{ab} заданы диапазонами, а $a_{W(b)}$ – дискретно

Fig. 5. Function $F = f(U_{ab}, a_{W(b)}, U_{ac})$ for RGB of scheme at Fig. 2a during recreation of GR sequence of GB of MAZ-239: U_{ac} и U_{ab} parameters are given by ranges, and $a_{W(b)}$ – discretely

После определения основных соотношений (табл. 4) выполняется подбор геометрических параметров зубчатых передач. Для трех зубчатых колес, лежащих в одной плоскости (для плоскостей С, D, Е и т.д., рис. 2а) может быть применена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2 \cdot \cos \beta \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot x \cdot \tan a}{z_{ac}} + \operatorname{inv} \left(\arctan \frac{\tan a}{\cos \beta} \right) - \operatorname{inv}(0.3) \right]}{z_{ac} \cdot m \cdot \cos \left(\arctan \frac{\tan a}{\cos \beta} \right)} &= a_{Wac} \\ \frac{2 \cdot \cos \beta \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot x \cdot \tan a}{z_{ab}} + \operatorname{inv} \left(\arctan \frac{\tan a}{\cos \beta} \right) - \operatorname{inv}(0.3) \right]}{z_{ab} \cdot m \cdot \cos \left(\arctan \frac{\tan a}{\cos \beta} \right)} &= a_{Wab} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где a_{Wac} и a_{Wab} – абсолютные величины межосевых расстояний между валами «а», «с» и валами «а», «b» соответственно; β – угол наклона зубьев, x – суммарное смещение шестерни и колеса (при этом смещения шестерни вала «с» и шестерни вала «b» могут быть одинаковы: $x = x_c + x_a = x_a + x_b$, разбивка может быть выполнена в соответствии с методом блокирующих контуров [9]); a – угол профиля зацепления; inv – функция инволюты; z_{ac} – суммарное число зубьев зубчатой пары между валами «с» и «а»; z_{ab} – суммарное число зубьев зубчатой пары между валами «b» и «а»; m – нормальный зубчатый модуль.

При выборе параметров зубчатых передач существует необходимость исключения кратности чисел зубьев для всех пар зубчатых колес в КП. Это требует, по возможности, применения колес с числом зубьев, равным простым числам. С учетом этого, представляют интерес числа зубьев ряда 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47..., которые могут работать с колесами с любым четным числом зубьев. Поскольку на каждом из валов (промежуточных и вторичном) возможно применение скорректированных зубчатых колес, становится целесообразным использование равносмещенных передач для каждой пары валов. Это позволяет умень-

шить минимальное число зубьев ведущей шестерни первой и ведомой шестерни последней передач КПП до значений 9-13. Соответственно, снизится число зубьев у колес промежуточных валов, и, таким образом, уменьшатся габариты КП, а также ее металлоемкость. Выбранные геометрические параметры должны удовлетворять допустимым величинам суммарной осевой силы на каждом из валов, напряжений изгиба и контакта, коэффициентов перекрытия, коэффициента плавности работы передачи [10]. Для схемы, приведенной на рис. 2б, передаточные числа U_{ab} и U_{ac} реализуются путем смещения оси первичного вала относительно оси вторичного вала. При этом рациональные параметры данного зацепления, состоящего из трех зубчатых колес, также могут быть найдены на основании системы (15).

Результаты и выводы

Рассмотренная схема РКП и предложенная методика оптимизированного выбора ее основных геометрических параметров обладают рядом преимуществ по отношению к многоступенчатым многоблочным КП традиционной компоновки. При этом обеспечивается возможность реализации практически любого простейшего ряда ПЧ; отклонение от характерного для многоступенчатых КП традиционной схемы геометрического ряда (при $\varphi \neq 1$) не требует применения механизмов блокировки невыгодных передаточных отношений с одновременным сокращением количества передач. Также одноблочная конструкция с механизмом двойного сцепления позволяет при разгоне автомобилей рассматриваемых категорий значительно уменьшить, по отношению к РКП многоблочной схемы, время переключения с низкой передачи на высшую. Соотношение n_k/n_m является выгодным, поскольку располагается между соответствующими показателями многоблочных КП и серийных преселективных РКП. Среди недостатков следует отметить, ввиду применения только двузубчатых передач для реализации общего ПЧ РКП, относительно большие и малые (ускоряющие) передаточные числа этих передач, соответственно, для высшей и низшей передач.

Библиографический список

1. **Heisler Heinz.** Advanced Vehicle Technology / Н. Heisler. – Butterworth-Heinemann, 2002. – 663 p.
2. **Грузовики Вольво:** официальный сайт [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/ATO3512F_Rus_01_306008984.pdf (Дата обращения: 10.01.2022).
3. **Дьяков, И.Ф.** Ступенчатые и планетарные коробки передач механических трансмиссий / И.Ф. Дьяков, В.А. Кузнецов, В.И. Тарханов – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 120 с.
4. **Шейнблит, А.Е.** Курсовое проектирование деталей машин / А.Е. Шейнблит. – М. Высш. шк, 1991. – 432 с.
5. **Кудрявцев, В.Н.** Зубчатые передачи / В.Н. Кудрявцев. – М.-Л.: Машгиз, 1957. – 263 с.
6. **Newman, K.** Modeling the Effects of Transmission Gear Count, Ratio Progression, and Final Drive Ratio on Fuel Economy and Performance Using ALPHA / K. Newman and P. Dekraker // SAE Technical Paper. – 2016. 01-1143.
7. **Литвинов, А.С.** Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
8. **Ярославский моторный завод:** официальный сайт [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.ymzmotor.ru> (Дата обращения: 10.01.2022).
9. **ГОСТ 16530-83.** Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения. – М.: ИПК Издательство стандартов. 2004. – 52 с.
10. **ГОСТ 16532-70.** Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. М.: ИПК Издательство стандартов, 1983. – 43 с.

*Дата поступления
в редакцию: 22.02.2022*

УДК 629.113.01

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_84

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОДВЕСКИ СИДЕНЬЯ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

В.Н. КравецORCID: 0000-0001-6429-2928 e-mail: vnkravets@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Р.А. Мусарский**ORCID: 0000-0003-0828-7758 e-mail: musarsky@list.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Тумасов**ORCID: 0000-0002-3766-4615 e-mail: anton.tumasov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Ф. Кулепов**ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: kulepov@dpingtu.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Орлов**ORCID: 0000-0003-4852-1174 e-mail: lev.n.orlov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Анализируются виброзащитные свойства сиденья легкого коммерческого автомобиля: жесткость, демпфирование и распределение интенсивности вертикальных ускорений вдоль длины салона. Разработана математическая модель, включающая подвески поддрессоренной и неподдрессоренных масс и сиденья. Средствами программного комплекса Matlab вычислена спектральная плотность и среднеквадратические значения (СКЗ) вертикальных ускорений пассажира на сиденье. Это позволило исследовать влияние жесткости и демпфирования подвески сидений и влияние размещения сиденья вдоль салона автобуса на СКЗ вертикальных ускорений. Выявлено, что спектральная плотность ускорений имеет два пика, связанные с собственными колебаниями поддрессоренной и неподдрессоренных масс и человека на поддрессоренном сиденье. Вид спектральной плотности зависит от места положения сиденья вдоль салона. Наиболее комфортабельное место находится вблизи центра поддрессоренной массы. Определены нормируемые величины СКЗ вертикальных ускорений, попадающих на октавные полосы частот.

Ключевые слова: автомобиль Комби, подвеска сиденья, виброзащита, среднеквадратические значения вертикальных ускорений колебаний.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кравец, В.Н. Исследование виброзащитных свойств подвески сиденья легкого коммерческого автомобиля / В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, А.В. Тумасов, В.Ф. Кулепов, Л.Н. Орлов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 84-93. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_84

RESEARCH OF VIBRATION-PROOF PROPERTIES OF A LIGHT COMMERCIAL VEHICLE SEAT SUSPENSION

V.N. Kravets

ORCID: **0000-0001-6429-2928** e-mail: **vnkravets@yandex.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

R.A. Musarskiy

ORCID: **0000-0003-0828-7758** e-mail: **musarsky@list.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Tumasov

ORCID: **0000-0002-3766-4615** e-mail: **anton.tumasov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.F. Kulepov

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

L.N. Orlov

ORCID: **0000-0003-4852-1174** e-mail: **lev.n.orlov@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Vibration-proof properties of a light commercial vehicle seat are analyzed: stiffness, damping, and distribution of intensity of vertical accelerations along the passenger compartment length. Mathematical model is developed that includes suspensions of sprung and unsprung masses and seats. By means of the Matlab software package, the spectral density and root-mean-square values (RMS) of the vertical accelerations of a passenger in the seat were calculated. This made it possible to research the effect of stiffness and damping of the seat suspension and the effect of seat arrangement along a bus passenger compartment on vertical accelerations RMS. It is revealed that the spectral density of accelerations has two peaks associated with the natural oscillations of sprung and unsprung masses and a person in a sprung seat. Type of spectral density depends on position of a seat along the passenger compartment. The most comfortable place is located near the sprung mass center. Normalized values of vertical accelerations RMS falling on octave frequency bands, are determined.

Key words: Combi car, seat suspension, vibration protection, RMS values of vertical accelerations of vibrations.

FOR CITATION: V.N. Kravets, R.A. Musarskiy, A.V. Tumasov, V.F. Kulepov, L.N. Orlov. research of vibration-proof properties of a light commercial vehicle seat suspension. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 84-93. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_

Введение

Автомобили ГАЗ-А32Р32 Комби широко используются в различных, порой неблагоприятных условиях работы. Водитель и пассажиры подвергаются интенсивным колебаниям, иногда превышающими установленные нормы [1-3]. Для их уменьшения необходима система виброзащиты сиденья, а также оптимизация ее параметров: жесткости и демпфирования. Актуальным является также исследование влияния размещения сиденья вдоль длины салона и детального распределения СКЗ вертикальных ускорений по октавным полосам частот.

Методика выполнения работы

На рис. 1 дана математическая модель исследуемой системы виброзащиты.

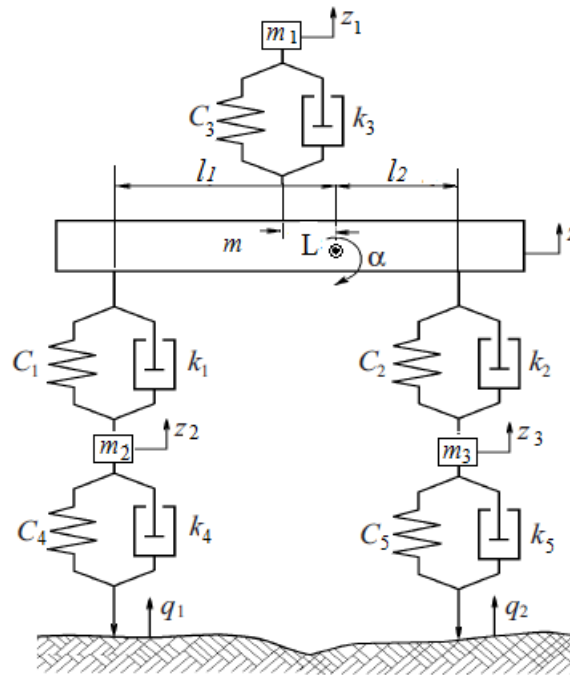


Рис. 1. Математическая модель исследования виброзащитных свойств сиденья экипажа

Fig. 1. Mathematical model for the study of vibration-proof properties of crew seat

Уравнения колебаний экипажа записываются:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{z}_1 + k_3 (\dot{z}_1 - \dot{z} - L\dot{\alpha}) + c_3 (z_1 - z - L\alpha) &= 0, \\
 m \ddot{z} - k_3 (\dot{z}_1 - \dot{z} - L\dot{\alpha}) - c_3 (z_1 - z - L\alpha) + \\
 k_1 (\dot{z} + l_1 \dot{\alpha} - \dot{z}_2) + k_2 (\dot{z} - l_2 \dot{\alpha} - \dot{z}_3) + c_1 (z + l_1 \alpha - z_2) + c_2 (z - l_2 \alpha - z_3) &= 0, \\
 m \rho^2 \ddot{\alpha} + k_1 l_1 (\dot{z} + l_1 \dot{\alpha} - \dot{z}_2) - k_2 l_2 (\dot{z} - l_2 \dot{\alpha} - \dot{z}_3) + c_1 l_1 (z + l_1 \alpha - z_2) - c_2 l_2 (z - l_2 \alpha - z_3) - k_3 L (\dot{z}_1 - \dot{z} - L\dot{\alpha}) - c_3 L (z_1 - z - L\alpha) &= 0 \\
 m_2 \ddot{z}_2 + k_4 (\dot{z}_2 - \dot{q}_1) + c_4 (z_2 - q_1) - k_1 (\dot{z} + l_1 \dot{\alpha} - \dot{z}_2) - c_1 (z + l_1 \alpha - z_2) &= 0, \\
 m_3 \ddot{z}_3 + k_5 (\dot{z}_3 - \dot{q}_2) + c_5 (z_3 - q_2) - k_2 (\dot{z} - l_2 \dot{\alpha} - \dot{z}_3) - c_2 (z - l_2 \alpha - z_3) &= 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Исследование этой системы уравнений проведено с помощью программного комплекса МАТЛАБ. Исходные данные для расчета: $m = 3.5$ – подрессоренная масса [кН*с²/м]; $m_1 = 0.07$ – масса пассажира на сидении [кН*с²/м]; $m_2 = 0.44$ – передняя неподдресоренная масса [кН*с²/м]; $m_3 = 0.65$ – задняя неподдресоренная масса [кН*с²/м]; $k_1 = 16.4$ – коэффициент демпфирования передней подвески [кН с/м]; $k_2 = 16.6$ – коэффициент демпфирования задней подвески [кН с/м]; $k_3 = 0.5$ – коэффициент демпфирования подвески сиденья [кН с/м]; $k_4 = 1.8$ – коэффициент демпфирования переднего колеса [кН с/м]; $k_5 = 1.8$ – коэффициент демпфирования заднего колеса [кН с/м]; $c_1 = 170.4$ – коэффициент упругости передней подвески [кН/м]; $c_2 = 161.7$ – коэффициент упругости задней подвески [кН/м]; $c_3 = 10.0$ – коэффициент упругости подвески сиденья [кН/м]; $c_4 = 1500$ – коэффициент упругости переднего колеса [кН/м]; $c_5 = 2500.0$ – коэффициент упругости заднего колеса [кН/м]; $l_1 = 2.81$ – расстояние от центра тяжести подрессоренной массы до передней подвески [м]; $l_2 = 1.54$ – расстояние от центра тяжести подрессоренной массы до задней подвески [м]; $L = 1.8$ – расстояние от центра тяжести подрессоренной массы до сиденья водителя [м]; $V = 10$ – скорость движения [м/с]; $a_1 = 0.22$ – параметр микропрофиля дороги [1/с]; $bet_1 = 0.44$; – параметр микропрофиля дороги

[1/с]; $\text{sig}=0.012$ – среднеквадратическое значение микропрофиля дороги [м]; $r_0=0.1$ – радиус инерции поддрессоренной массы [м].

Будем считать, что микропрофиль дороги под задними колесами не зависит от микропрофиля под передними колесами и описывается спектральной плотностью, соответствующей экспоненциально-косинусной корреляционной функции [4,5]:

$$S_q(\omega) = \frac{\alpha\sigma^2}{\pi} \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 + \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2} \quad (2)$$

Проведем исследования при постоянной скорости 10 м/с. Спектральная плотность вертикальных ускорений $S_{z_3}(\omega)$ вычисляется с помощью формулы Винера-Хинчина [5].

Спектральные плотности $S_{z_3}(\omega)$ и $S_q(\omega)$ связаны следующей зависимостью:

$$S_{z_3}(\omega) = |W_{z_3}(i\omega)|^2 S_q(\omega), \quad (3)$$

где $W_{z_3}(i\omega)$ – передаточная функция от ординат микропрофиля к вертикальным ускорениям человека на сидении, ω – круговая частота.

На рис. 2 приведена спектральная плотность вертикальных ускорений водителя или пассажира на сиденье. Видно, что спектральная плотность водителя или пассажира имеет два максимальных значения – при низкой частоте в области 1 Гц, связанной с собственными частотами подвески автомобиля и подвески сиденья, и при высокой частоте 9 Гц, связанной с собственными частотами неподдрессоренных масс.

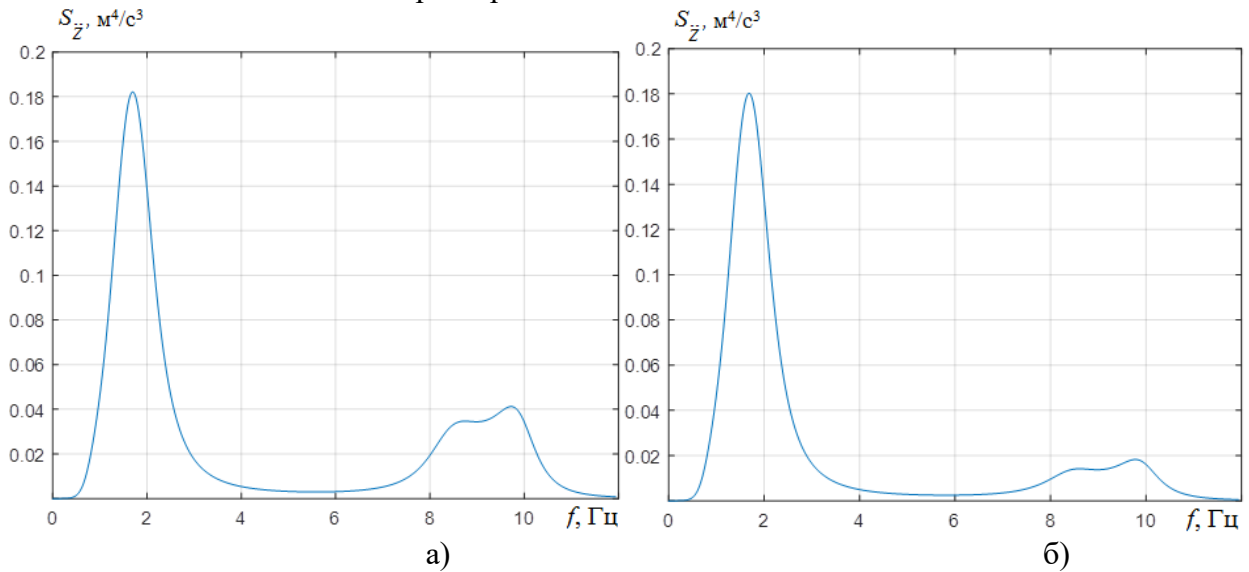


Рис. 2. Спектральная плотность вертикальных ускорений пассажира на сиденье
а) водителя и пассажира на переднем ряду, б) пассажира на заднем ряду

Fig. 2. Spectral density of vertical accelerations of a passenger in the seat
a) driver and passenger in the front row, b) passenger in the back row

Из рис. 2 видно, что низкочастотная составляющая ускорений в районе 1 Гц имеет одинаковую интенсивность как для сидений в первом ряду, так и для сидений во втором ряду. Высокочастотная составляющая в районе 9 Гц ниже для сидений во втором ряду. На рис. 3а показано распределение среднеквадратических вертикальных ускорений вдоль длины салона при движении по асфальтовой – 1 и по изношенной дороге – 2.

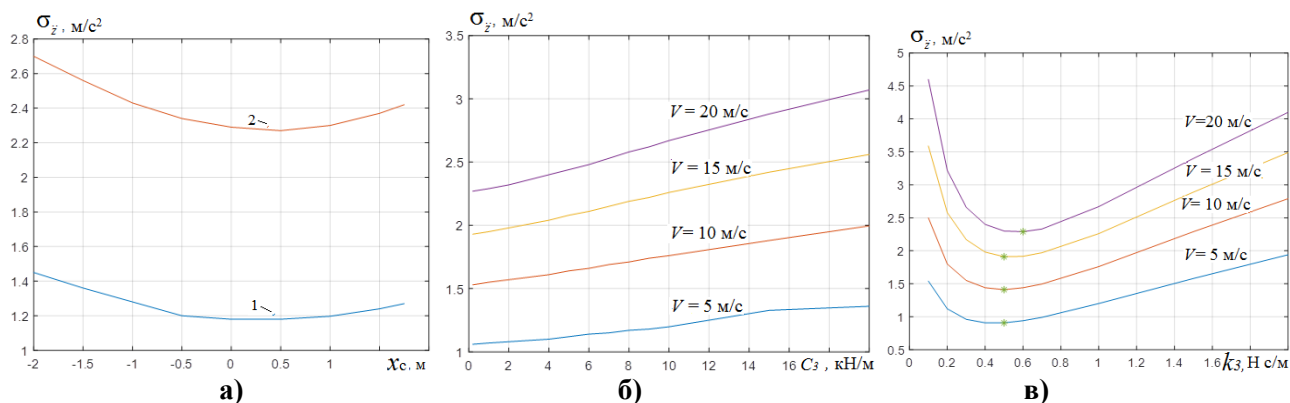


Рис. 3. Результаты расчетов:

- а) распределение среднеквадратических ускорений вдоль длины салона в зависимости от расстояния до центра масс: 1 – асфальтовая дорога, 2 – изношенная дорога,
 б) зависимость среднеквадратических ускорений от жесткости сиденья для скоростей 5, 10, 15, 20 м/с;
 в) изменение среднеквадратического значения вертикальных ускорений (м/с^2) пассажира или водителя на месте сиденья в зависимости от изменения коэффициента демпфирования сиденья кН с/м при скоростях движения $V = 5 \text{ м/с}$, 10 м/с , 15 м/с , 20 м/с

Fig. 3. Calculation results:

- а) distribution of rms accelerations along the passenger compartment length,
 б) depending on the distance to the center of mass: 1 – asphalt road, 2 – worn road,
 б) dependence of RMS accelerations on the seat stiffness for speeds of 5, 10, 15, 20 m/s;
 в) change in RMS value of vertical accelerations (m/s^2) of a passenger or a driver in the seat, depending on the change in coefficient of seat damping kN cm at driving speeds $V = 5 \text{ m/s}$, 10 m/s , 15 m/s , 20 m/s

Из рис. 3а видно, что вертикальные ускорения принимают наименьшие значения в районе расположения центра тяжести подрессоренной массы. Исследуем влияние жесткости сиденья на СКЗ вертикальных ускорений пассажира на сиденье (рис. 3б). Видно, что СКЗ ускорений тем меньше, чем меньше жесткость сиденья [6] и в пределе может быть уменьшено применением конструкции подвески почти нулевой жесткости [7]. Однако применение подвесок почти нулевой жесткости требует автоматического изменения положения статического равновесия при изменении статической нагрузки.

Исследуем изменение СКЗ вертикальных ускорений пассажира или водителя на месте сиденья в зависимости от изменения коэффициента демпфирования сиденья при различных скоростях движения $V = 5 \text{ м/с}$, 10 м/с , 15 м/с , 20 м/с (рис. 3в). Видно, что изменение СКЗ вертикальных ускорений пассажира или водителя на месте сиденья в зависимости от изменения коэффициента демпфирования сиденья кН с/м имеет ярко выраженный минимум при значении $k_3 = 0,5 \text{ кН с/м}$. Оценку влияния колебаний на человека и нормирования допустимого уровня вибраций производят в соответствии с международным стандартом МС ИСО 2631-78 и ГОСТ 12,1,012-90, в которых установлено три границы неблагоприятного воздействия вибраций на человека-оператора: 1) «граница снижения производительности труда», 2) «безопасность», или «предел воздействия» 3) «комфорт» или «предел снижения комфорта».

Приведем пример исследования виброзащитных свойств подвески сиденья автомобиля ГАЗель Некст Комби. Рассмотрим распределение СКЗ ускорений по октавным полосам (рис. 4). 1 – предельные СКЗ по критерию «граница снижения производительности труда», 2 – по критерию «безопасность», 3 – при скорости движения $V = 5 \text{ м/с}$, 4 – при скорости движения $V = 10 \text{ м/с}$, 5 – при скорости движения $V = 15 \text{ м/с}$, 6 – при скорости движения $V = 20 \text{ м/с}$.

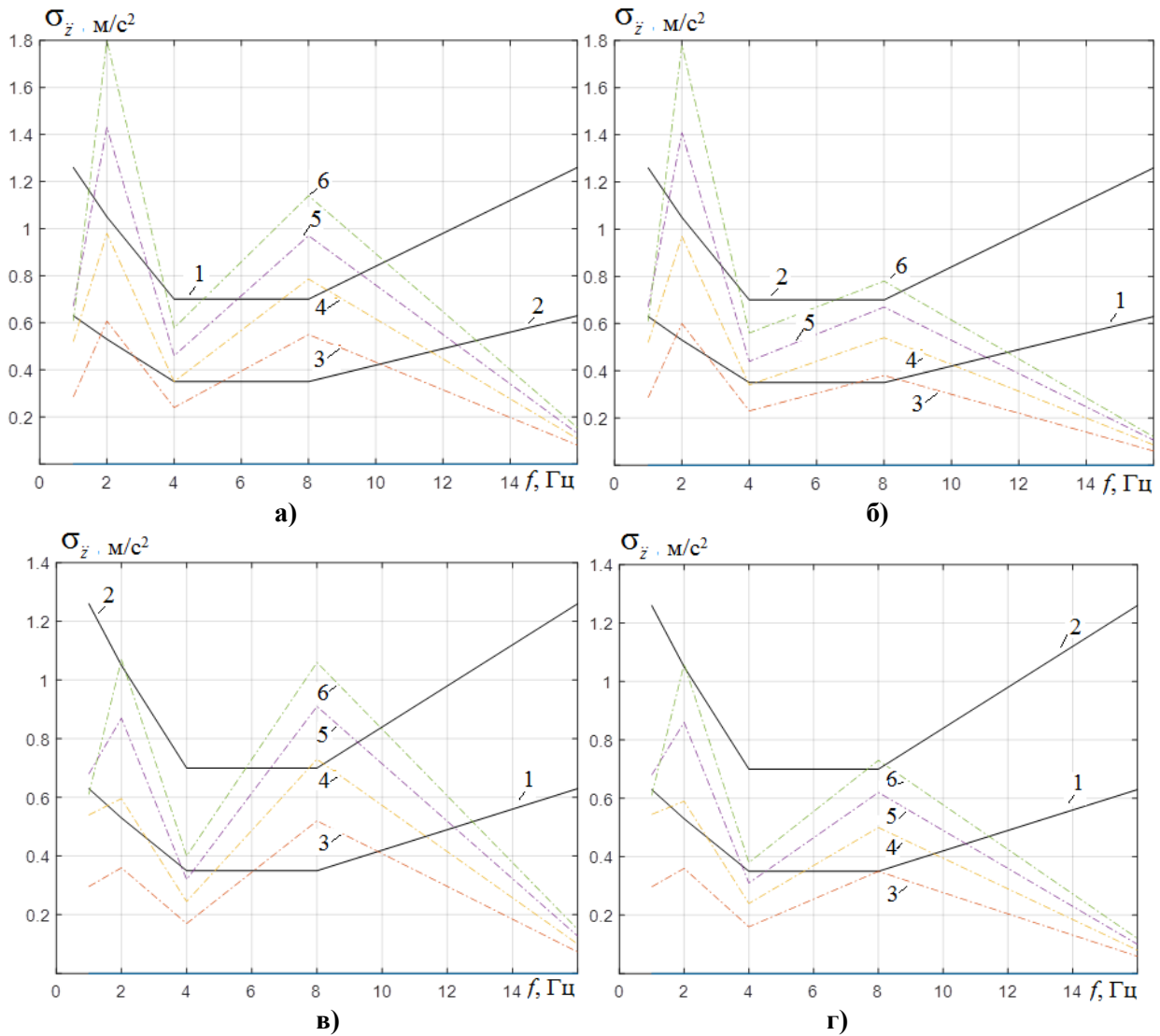


Рис. 4. Среднеквадратические значения ускорений

- а) на месте водителя по октавным полосам при скоростях движения $V=5, 10, 15$ и 20 км/ч и жесткости и демпфировании сиденья $c_3=10$ кН/м, $k_3=0,5$ кН/с/м*
- б) на втором ряду сидений по октавным полосам при скоростях движения $V=5, 10, 15$ и 20 км/ч и жесткости и демпфировании сиденья $c_3=10$ кН/м, $k_3=0,5$ кН/с/м*
- в) на месте водителя по октавным полосам при скоростях движения $V=5, 10, 15$ и 20 км/ч и жесткости и демпфировании сиденья $c_3=5$ кН/м, $k_3=0,5$ кН/с/м*
- г) на втором ряду сидений по октавным полосам при скоростях движения $V=5, 10, 15$ и 20 км/ч и жесткости и демпфировании сиденья $c_3=5$ кН/м, $k_3=0,5$ кН/с/м*

Fig. 4. RMS values of accelerations

- a) in driver's seat as per octave bands at driving speeds $V=5, 10, 15$ and 20 km/h and seat stiffness and damping $c_3=10$ kN/m, $k_3=0.5$ kN/m*
- b) on the second row of seats as per octave bands at driving speeds $V=5, 10, 15$ and 20 km/h and seat stiffness and damping $c_3=10$ kN/m, $k_3=0.5$ kN/m*
- c) in driver's seat as per octave bands at driving speeds $V=5, 10, 15$ and 20 km/h and seat stiffness and damping $c_3=5$ kN/m, $k_3=0.5$ kN/m*
- d) on the second row of seats as per octave bands at driving speeds $V=5, 10, 15$ and 20 km/h and seat stiffness and damping $c_3=5$ kN/m, $k_3=0.5$ kN/m*

Из рис. 4 видно, что санитарные нормы вертикальных ускорений водителя или пассажира на сиденье практически не превышают допустимых значений при скорости движения менее 5 м/с. Сравнение СКЗ ускорений по октавным полосам при жесткости сиденья $c_3=10$ кН /м (а) и б)) и при жесткости сиденья $c_3=5$ кН /м (в) и г)) показывает, что уменьшение жесткости позволяет уменьшить СКЗ ускорений во второй октаве до удовлетворения критерия «безопасность» для сиденья на месте водителя, а также на всех октавах для сиденья во втором ряду. Рассмотрим полученные в результате исследований значения жесткости подвески сиденья ($C_3 = 5$ кН/м) и коэффициента демпфирования сиденья ($k_3 = 0,5$ кН*с/м) с точки зрения практической реализации. Это необходимо по причине конструктивных ограничений для размещения элементов подвески сиденья, а также для оценки эргономики размещения и комфорта человека при движении автомобиля.

Основное влияние на комфорт человека при движении на автомобиле оказывает не только виброн нагруженность места сиденья, но и величина амплитуды перемещения вдоль вертикали. При значительной величине вертикальных перемещений сиденья вместе с человеком может произойти потеря чувства «связанности» с автомобилем, что однозначно приводит к снижению комфортности передвижения. Для предотвращения подобного явления необходимо ввести критерий, который позволит ограничить деформации подвески сиденья. Таким критерием может выступать статический прогиб подвески сиденья, который связывает упругую характеристику подвески со статической нагрузкой:

$$f_{ст} = \frac{T_{ст}}{C_3}, \quad (4)$$

где $T_{ст}$ – вертикальная статическая нагрузка (равна весу человека – m_1g), приходящаяся на подвеску сиденья; C_3 – жесткость подвески сиденья. При подстановке значений статической нагрузки и жесткости подвески сиденья статический прогиб получается равным $f_{ст} = 0.14$ м. Очевидно, что это значительная величина хода подвески, и ее необходимо уменьшить по соображениям комфорта человека. В данной работе предлагается опираться на значение статического прогиба $f_{ст} = 0.035$ м. В таком случае значение жесткости подвески сиденья для дальнейших расчетов принимается $C_3 = 20$ кН /м.

Также на предварительном этапе выбора основных конструктивных параметров в качестве исходной величины может задаваться собственная парциальная частота колебаний подрессоренных масс сиденья:

$$n_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_3 g}{T_{ст}}}, \quad (5)$$

где n_0 – собственная частота колебаний подрессоренных масс сиденья; $T_{ст}$ – статическая нагрузка на подвеску сиденья.

В зависимости от типа системы подрессоривания сиденья, частота собственных колебаний, при которой человек может ощущать себя комфортно изменяется от 1 до 4 Гц [8]. Меньшее значение частоты обеспечивает более высокие показатели плавности движения. Для автомобилей различного назначения на стадии предварительных расчетов частота собственных колебаний при расчетной статической нагрузке может быть различной. В данном случае расчетное значение собственной частоты составляет $n_0 = 2.7$ Гц, что соответствует рекомендуемому диапазону. Учитывая тот факт, что для подвески сиденья необходимо реализовать коэффициент демпфирования порядка 0.5 кН с/м, в данном случае есть возможность рассмотреть в качестве упругодемпфирующего устройства сиденья элементы из эластомерных материалов [9]. Таким материалом может являться резина, либо термоэластопласты. При работе подвески сиденья с эластомерным материалом влияние процесса релаксации на упругую характеристику подобного устройства незначительно, и сила эластомерного элемента может принимать вид:

$$F_э = C_3 \Delta(t) \quad (6)$$

Если рассматривать упрощенную форму эластомерного элемента как в работе [10], а именно в виде цилиндра (рис. 5), то можно рассчитать жесткость эластомера по следующей формуле:

$$C = \frac{2(1 + \mu) \cdot G \cdot K \cdot \pi \cdot r_2^2 \cdot (1 - m^2)}{h}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига [МПа]; K – коэффициент ужесточения эластомера; $m = \frac{r_1}{r_2}$ – параметр формы эластомера; r_1 – радиус внутренней цилиндрической поверхности эластомера [м]; r_2 – радиус внешней цилиндрической поверхности эластомера [м].

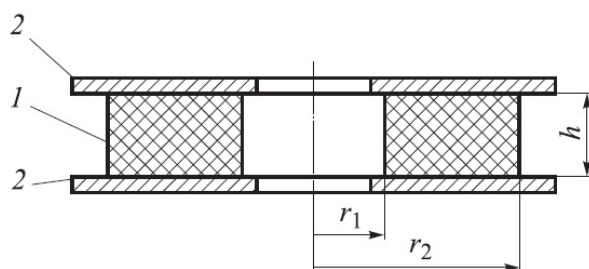


Рис. 5. Цилиндрический эластомерный элемент

Fig. 5. Cylindrical elastomeric element

При рассмотрении конкретной задачи о сжатии цилиндрического эластомера, который является упругодемпфирующим элементом подвески сиденья, было принято допущение, что на торцах эластомера 1, контактирующих с металлическими недеформируемыми пластинами 2, отсутствуют радиальные перемещения (рис. 5). В данном случае жесткость эластомера будет является постоянной величиной, а упругая характеристика выражается линейной зависимостью. Возможная схема установки эластомерных элементов 2 в подвеску сиденья 1 показана на рис. 6.

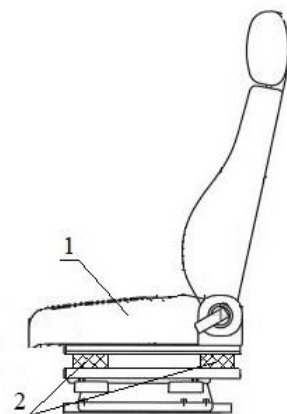


Рис. 6. Установка эластомерных элементов в подвеску сиденья автомобиля

Fig. 6. Installation of elastomeric elements in automobile seat suspension

Выбор достоверных значений коэффициента Пуассона и модуля сдвига играет важную роль при прогнозировании упругих свойств эластомеров. В данном исследовании рассматривался термоэластопласт, для которого $\mu = 0.46$ и $G = 0.28$ МПа. Также были выбраны соотношения между геометрическими параметрами эластомера, которые необходимы для расчета радиусов внутренней и внешней цилиндрической поверхности. В частности, параметр формы имеет значение $m = 0.65$, $K = 1.05$, а высота цилиндрического элемента принимается равной двойному статическому прогибу подвески сиденья $h = 2f_{ст} = 0.07$ м. В ре-

зультате проектного расчета геометрических параметров цилиндрического эластомерного элемента для подвески сиденья с жесткостью $C_3 = 20$ кН/м были получены следующие значения радиусов внутренней и внешней поверхности: $r_1 = 0.0195$ м; $r_2 = 0.030$ м. Эти значения доказывают технологическую возможность создания такого рода подвесок с возможностью реализации требуемых показателей виброзащиты водителя и пассажиров.

Результаты исследования

1. Выявлено, что вид спектральной плотности ускорений вертикальных колебаний пассажира на сиденье имеет два пика при частотах, соответствующих собственным частотам подрессоренной массы и неподрессоренных масс, и зависит от размещения сиденья вдоль длины салона.
2. Показано, что СКЗ ускорений может быть уменьшено конструкцией подвески «почти нулевой» жесткости [7].
3. Показано, что изменение СКЗ вертикальных ускорений пассажира или водителя на месте сиденья в зависимости от изменения коэффициента демпфирования сиденья кН/с/м имеет минимум при значении около 0,5 кН/с/м.
4. Показано, что минимальное значение среднеквадратического вертикальных ускорений пассажира достигается вблизи центра тяжести подрессоренной массы.
5. Показано, что эффективность средств виброзащиты зависит от жесткости и демпфирования подвески сиденья. Для удовлетворения требованиям санитарных норм по критерию «безопасность» необходимо применение подрессоренных сидений малых жесткостей.
6. Предложено использование в качестве упругодемпфирующего устройства подвески сиденья эластомерное устройство, параметры которого могут обеспечить требуемые значения жесткости и коэффициента демпфирования при достаточно простой и технологичной конструкции.

Выводы

1. Исследование разработанной математической системы позволило дать рекомендации по определению оптимальных параметров подвески пассажира на сиденье: жесткости и демпфирования сиденья.
2. СКЗ вертикальных ускорений имеет локальные минимумы в зависимости от изменения жесткости сиденья и в зависимости от изменения коэффициента демпфирования.
3. Исследование разработанной математической системы позволило определить распределение интенсивности вертикальных колебаний вдоль длины салона и найти оптимальное размещение сиденья.
4. Определены значения СКЗ вертикальных ускорений по октавным полосам частот. Показано, что для удовлетворения требованиям санитарных норм по критерию «безопасность» необходимо применение подрессоренных сидений малых жесткостей.
5. Малые значения жесткости могут привести к снижению комфорта водителя и пассажиров по причине больших ходов деформации подвески и уменьшению собственной частоты колебаний подрессоренной части. Следовательно, окончательный выбор значения жесткости подвески сиденья должен базироваться на компромиссе между снижением вибронагруженности, обеспечением комфорта человека, а также возможности технической реализации.

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. **ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) Вибрация и удар.** Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования.
2. **ОСТ 37.001.291-84 Автотранспортные средства.** Технические нормы плавности хода.
3. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля [Текст] / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
4. **Пархиловский, И.Г.** Исследование вероятностных характеристик поверхностей и распространенных типов дорог [Текст] // Автомобильная промышленность. 1968. №8. С. 18-22.
5. **Свешников, А.А.** Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А.А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 460 с.
6. **Синев, А.В.** Исследование активных виброзащитных систем с автоподстройкой частоты [Текст] / А.В. Синев, В.С. Соловьев // В сб. тр. «Виброзащита человека-оператора и колебания в машинах». М.: Наука, 1977. С. 38-40.
7. **Алабужев, П.М.** Виброзащитные системы с квазиулеевой жесткостью [Текст] / П.М. Алабужев, А.А. Гритчин, Л.И. Ким, Г.С. Мигренко, В.Ф. Хон., П.Т. Степанов – Л.: Машиностроение, 1986. – С. 100.
8. **Успенский, И.Н.** Проектирование подвески автомобиля [Текст] / И.Н. Успенский, А.А. Мельников. – М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
9. **Stepanov E.V.** Prospects of Using Hyperelastic Elastomer Materials in Vehicle Suspension Systems / E.V. Stepanov, Y.I. Molev, S.M. Ogorodnov, L.N. Orlov // Trans Tech Publications: Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 909. – pp. 28–37.
10. **Белкин, А.Е.** Расчет эластомерного цилиндрического амортизатора с учетом вязких свойств материала [Текст] / А.Е. Белкин, Н.Л. Нарская // Известия вузов. Машиностроение. 2015. №8 (665). С. 12-18.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2022*

К ВОПРОСУ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СНЕЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ

А.В. Папунин

ORCID: 0000-0003-2282-3529 e-mail: lexa-lenia@rambler.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

А.А. Аникин

ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: anikin.zvm@mail.ru

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

В.Н. Наумов

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, 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

Рассмотрена классификация дискретных снежных препятствий на основании разных отличительных признаков, а именно: наличия целевого фактора, типа источника формирования, структуры и степени постоянства источника формирования, физико-механических свойств, состава и формы дискретного препятствия. Представлена математическая модель, описывающая геометрию снежных наметов. Даны зависимости для расчета сил сопротивления от вертикального смятия снега и силы тяги, а также зависимость для расчета динамического преодоления дискретных снежных препятствий. Приведены результаты расчетов минимальной скорости преодоления снежных наметов без застревания, а также предельного расстояния, которое проедет машина со скоростью 5 м/с. Определена новая структура подвижности по проходимости, наряду с профильной и опорной проходимостью и преодолением водных преград, включающая новое понятие «дискретная проходимость».

Ключевые слова: проходимость, дискретные препятствия, снег.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Папунин, А.В. К вопросу преодоления дискретных снежных препятствий транспортно-технологическими машинами / А.В. Папунин, В.В. Беляков, А.А. Аникин, В.Н. Наумов, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 94-104. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_94

ON THE ISSUE OF OVERCOMING OF DISCRETE SNOW OBSTACLES BY TRANSPORT-AND-TECHNOLOGICAL VEHICLES

A.V. Papunin

ORCID: 0000-0003-2282-3529 e-mail: lexa-lenia@rambler.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

A.A. Anikin

ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: anikin.zvm@mail.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

V.N. Naumov

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, 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

Abstract. Classification of discrete snow obstacles is considered on the basis of various distinctive features, namely: presence of a target factor, the type of formation source, the structure and degree of the formation source constancy, physical and mechanical properties, composition and shape of a discrete obstacle. Mathematical model describing the snowflush geometry, is presented. Dependences are given for calculating of the resistance forces against the vertical crushing of snow, and the traction force, as well as dependence for calculation of the dynamic overcoming of discrete snow obstacles. Results of calculations of the minimum speed of overcoming of snowflush without getting stuck, as well as the maximum distance that a vehicle will travel at a speed of 5 m/s, are presented. A new structure of mobility as per cross-country ability is determined, along with profile and reference cross-country ability and overcoming of water obstacles, including a new concept of «discrete cross-country ability».

Key words: cross-country ability, discrete obstacles, snow.

FOR CITATION: A.V. Papunin, V.V. Belyakov, A.A. Anikin, V.N. Naumov, V.S. Makarov. On the issue of overcoming of discrete snow obstacles by transport-and-technological vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 94-104. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_94

Введение

В классической теории проходимость транспортного средства определяется как способность автомобиля преодолевать различные дорожные препятствия и двигаться по дорогам, не имеющим твердого покрытия, и по бездорожью. Проходимость является составной частью подвижности – интегрального эксплуатационного свойства транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющего способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е. возможность противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2]. Принято различать проходимость профильную и

опорную [3], также в отдельную группу выделяют преодоление водных преград. Проведенные ранее исследования позволяют сделать вывод о целесообразности выделения дискретной проходимости – способности преодолевать препятствия дискретного характера путем маневрирования или с учетом динамики транспортного средства. Например, движение в лесу является по сути маневрированием между деревьями и преодолением их как дискретных препятствий, еще одним их примером являются снежные наносы. Они непродолжительны по длине, но их нельзя преодолеть, если ехать равномерно, поэтому движение автомобиля в данных условиях возможно только при динамическом преодолении или с разгона.

На рис. 1 приведена структура подвижности по проходимости ТТМ.

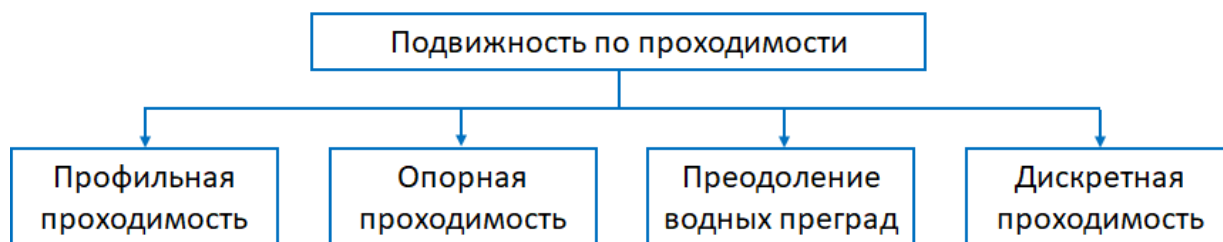


Рис. 1. Структура подвижности по проходимости

Fig. 1. Flotation mobility structure

К вопросу преодоления участков местности с переменной высотой снежного покрова

Рассматривая передвижение по снежному полотну пути, необходимо учитывать множество факторов, характеризующих как само транспортное средство (ТС), так и особенности снежного покрова. В большинстве работ оценку подвижности ТС принято проводить, исходя из решения квазистатических задач. При этом параметры машины и опорного основания считаются постоянными. Также задача может решаться путем перебора исследуемых параметров. Применительно к движению ТС по снегу, в большинстве случаев задаются конкретными массово-габаритными параметрами машин (полная масса, размеры движителя) и физико-механическими и геометрическими параметрами снежного покрова (высота и плотность) [4, 5]. Для определения качественных показателей при сравнении разных образцов техники данный подход уместен и не подлежит сомнению. Примером может служить передвижение по снежной целине, протяженным полям и участкам местности. С позиции обеспечения подвижности по проходимости особый интерес представляют случаи, при которых происходит локальное изменение условий движения как по времени, так и в пространстве, или дискретные препятствия. При этом оценку протяженности необходимо соотносить с траекторией движения и размерами самого ТС. Так, например, фактически канава или балка, засыпанная снегом и имеющая протяженность в продольном направлении несколько сотен метров, а в поперечном будучи соизмеримой с длиной машины, при условии того, что ТС пересекает ее не вдоль, а поперек, также будет являться дискретным препятствием. На долю таких участков приходится небольшой процент пути, но потеря подвижности по проходимости в данном случае составляет подавляющие значения. В данном случае необходимо отметить, что для каждой машины оценивается возможность движения прямолинейно. При этом в зависимости от типа движителя и системы управления курсовым движением сопротивление движения может быть разным. Так, для разных конструкций колесных машин рост сопротивления при повороте может быть от 30 до 80 %. Отметим, что для оценки преодоления дискретных препятствий необходимо проводить расчеты именно для прямолинейного движения. Данное требование обусловлено также практическим опытом движения по заснеженной местности.

Таким образом, если с точки зрения выбора эффективного ТС существуют методики расчета, результатом которого является выбор лучшей машины с позиции движения по снегу

с постоянными или условно постоянными условиями движения, то далее для каждой выбранной машины необходимо оценить возможность преодоления дискретных препятствий в виде снежных заносов, насыпей и пр. Формирование неравномерности в высоте снежного покрова обусловлено механикой движения снежных частиц в метелевом потоке и задержания их у различных преград [6]. Для лучшего понимания представим классификацию дискретных снежных препятствий как полотна пути для транспортно-технологических машин.

Классификация дискретных снежных препятствий

Глобально дискретные снежные препятствия можно разделить на естественные и искусственные. При этом необходимо разъяснить данный параметр разделения, а именно разделение по наличию целевого антропогенного фактора. К естественным можно отнести специфику формирования снежных наносов на объектах естественного природного характера, а также на объектах рельефа полученных в процессе антропогенного воздействия и не ставящих своей целью формирование снежного покрова. К искусственным можно отнести такие объекты, которые формируются при целевом воздействии человека. Здесь можно выделить две разновидности. Первая – это снегозадерживающие устройства, например, служащие для защиты дорог от снега, а также для снегоудержания. Вторая возникает при удалении снега с дорог разного типа и формирует так называемые отвалы и обочины дорог. Как и в первом, так и во втором случаях подход к формированию высоты снежного покрова похожи. Также характер формирования снежных наносов во многом зависит от мест формирования снежных масс. Здесь можно выделить следующий классификационный признак, а именно: по типу деформируемости источника формирования наносов. Первым классификационным признаком будет недеформируемый (например, протяженные объекты макропрофиля: рвы канавы, опушки леса, берега рек, обрывы, склоны, или отдельные объекты типа пней, камней), вторым – деформируемый. Так, хорошо известно, что высота снега на болотах с порослью камыша и тонких веток много больше, чем на открытой воде. При этом сложности для передвижения данные участки не представляют, так как растительность, служащая основанием для формирования снежного покрова, гнется и ломается при движении ТС.

В зависимости от характера участка можно выделить различные структуры снежного покрова: естественную, формируемую снегопадами и оттепелями, а также естественными процессами, происходящими внутри снежного покрова. Фактически данная структура может представлять несколько слоев разной плотности, структуры и текстуры. Следующие типы во многом зависят от специфики расчистки дорог. Для обочин дорог, очищаемых с помощью снегоочистителей и отбрасывающих снег в сторону, формируется слоистая структура из естественно выпавшего снега и после фрезерования. Если очистка дорог производится путем сгребания, формируются спрессованные отвалы вблизи обочин, имеющие большую плотность снега. Еще одним классификационным признаком является состав снежного покрова. Можно выделить естественный, включающий снег и лед, характерные для большинства местностей, снежной целины и очищаемых от снега немагистральных дорог, а также микст, состоящий из льда, снега и других компонентов. Различают миксты с механическими включениями типа песка или мелкой каменной крошки, а также с химико-механическими добавками (противогололедные реагенты). И в том, и в другом случае физико-механические характеристики опорного основания будут разными.

Снег, в зависимости от его состава и структуры, будет различаться по физико-механическим свойствам, а именно с позиции оценки подвижности ТТМ, сдвиговых и деформационных характеристик. В данном случае эти параметры зависят от структуры, текстуры, химико-механического состава. С позиции постоянства источника формирования можно выделить постоянные параметры, которые неизменны в течении снежного периода, например, естественные препятствия и объекты снегозадержания; в данном случае высота снега будет соразмерна осадкам. Непостоянные параметры меняются, например, при очистке дорог ве-

личина отвала меняется по мере выпадения и очистки снега, соответственно, изменяются источники формирования заносов и пр. В данном случае величина снежных наносов не будет превышать допустимых, после которых потребуется расчистка дорог. Для всех вышеописанных случаев должна быть классификация в зависимости от формы опорного основания. Можно выделить формы снежных наносов на образующихся на ровной поверхности, как правило, на некотором удалении от источников формирования и обусловленных спецификой движения воздушных масс, а также на препятствиях сложной формы. При этом целесообразно воспользоваться подходом [7-9], где описаны снежные наносы и их формы, образующиеся в зависимости от ветра и формы подстилающей поверхности.

На рис. 2 представлена классификация дискретных снежных препятствий.

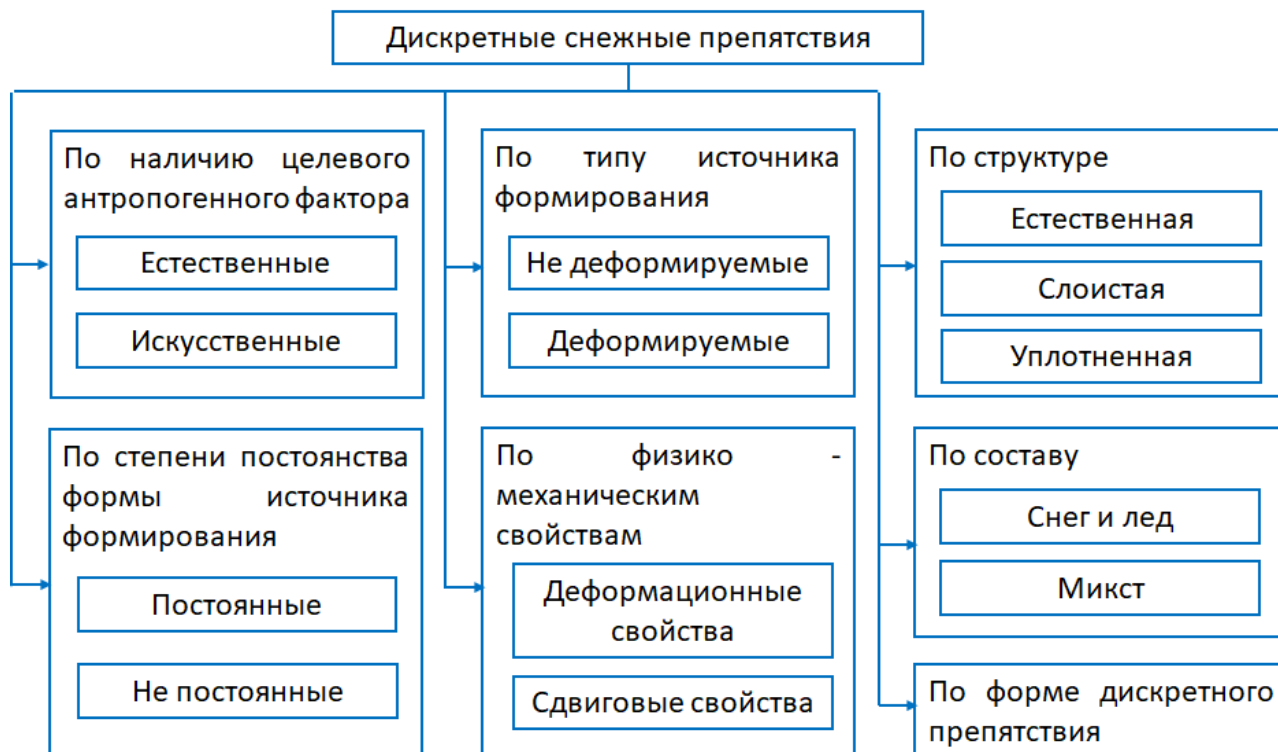


Рис. 2. Классификация дискретных снежных препятствий

Fig. 2. Classification of discrete snow obstacles

Формализованное представление формы снежного дискретного препятствия с точки зрения возможности его преодоления с помощью ТС

Была рассмотрена классификация дискретных снежных препятствий. С позиции геометрии формирования снежных наносов можно выделить несколько условных форм. Они будут отличаться в зависимости от формы опорной поверхности. Также для оценки проходимости при разных формах препятствий необходима адекватная оценка. При этом необходимо задаться условием, что объем снежного наноса на локальном участке одинаков для различных его форм. Это позволит в некоторой степени в равных условиях оценивать подвижность при преодолении дискретных снежных препятствий.

Предлагается форму снежных наносов описывать следующей зависимостью:

$$H(l) = \frac{s}{(B-A)B(\alpha, \beta)} \left(\frac{l-A}{B-A} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{B-l}{B-A} \right)^{\beta-1}, \quad (1)$$

где $H(l)$ – высота снега в зависимости от протяженности, $\alpha, \beta > 0$ – произвольные фиксированные параметры, α определяет форму распределения, β определяет масштаб, $A \leq l \leq B$ –

границы изменения параметра l , S – площадь снежного наноса в продольном сечении, $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 l^{\alpha-1}(1-l)^{\beta-1} dl$ – бета-функция.

В зависимости от параметров, входящих в формулу, будет отличаться характер кривой, описывающей геометрию снежного наноса. Рассмотрим разные случаи. Для наглядности, графики сопоставим с реальными наносами снега.

1. $\alpha < 1, \beta < 1$ – график выпуклый и уходит в «бесконечность» на границах. При $\alpha = \beta = 1$ слой снега будет равномерным.

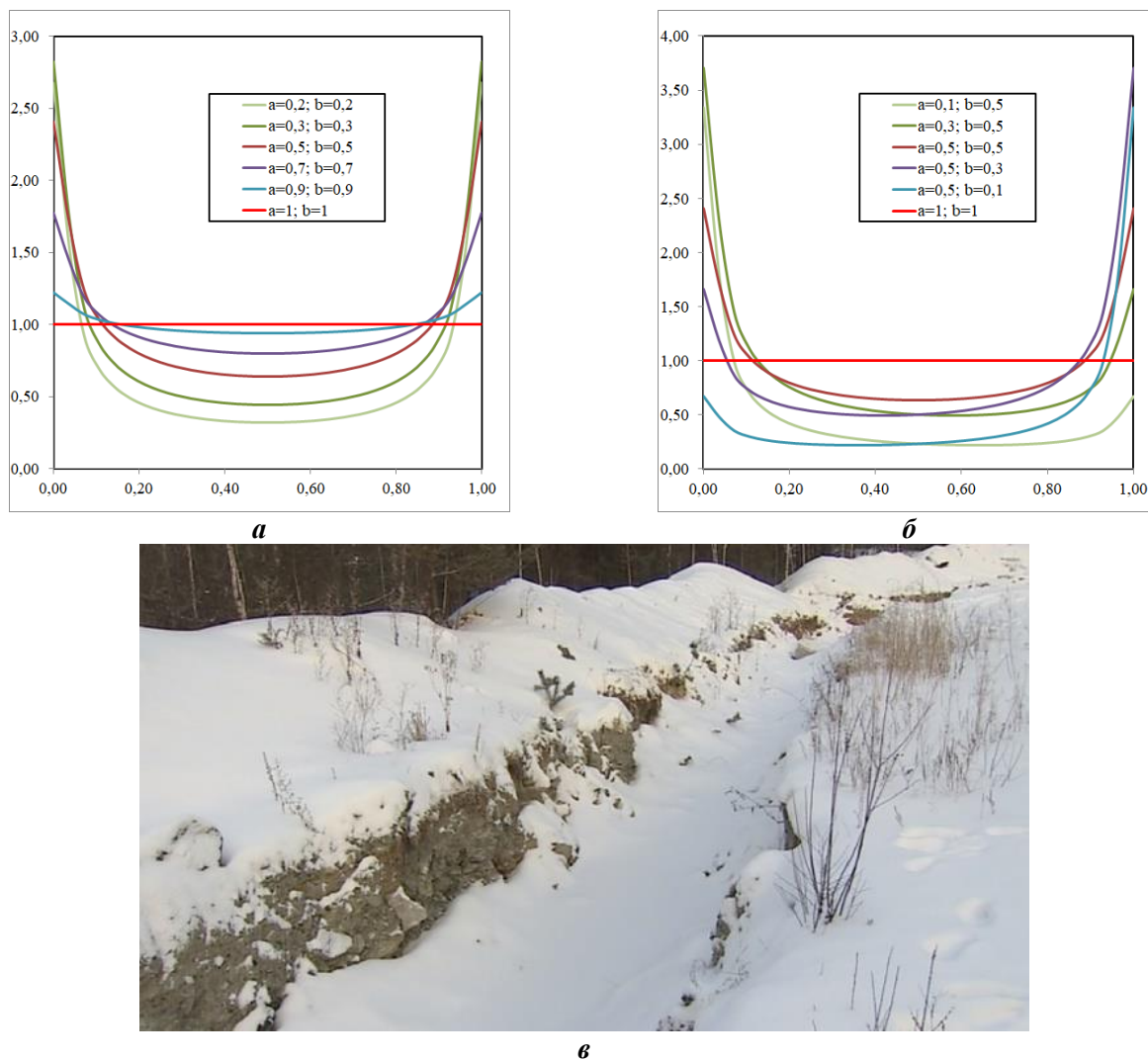


Рис. 3. Пример формирования снега во рве

Fig. 3. Example of snow formation in the moat

2. $\alpha < 1, \beta \geq 1$ – график выпуклый и уходит в «бесконечность» на границе.

Любая снежная поверхность будет формировать сопротивление движению ТС. Как было сказано выше, обычно проходимость ТТМ оценивается при движении по снегу в квазистатической постановке, а именно: рассчитываются сила тяги и сопротивления при равномерном движении. При этом динамика преодоления дискретных (локальных) препятствий за счет сил инерции не рассматривается. Рассмотрим подход, учитывающий динамическое преодоление дискретных снежных препятствий.

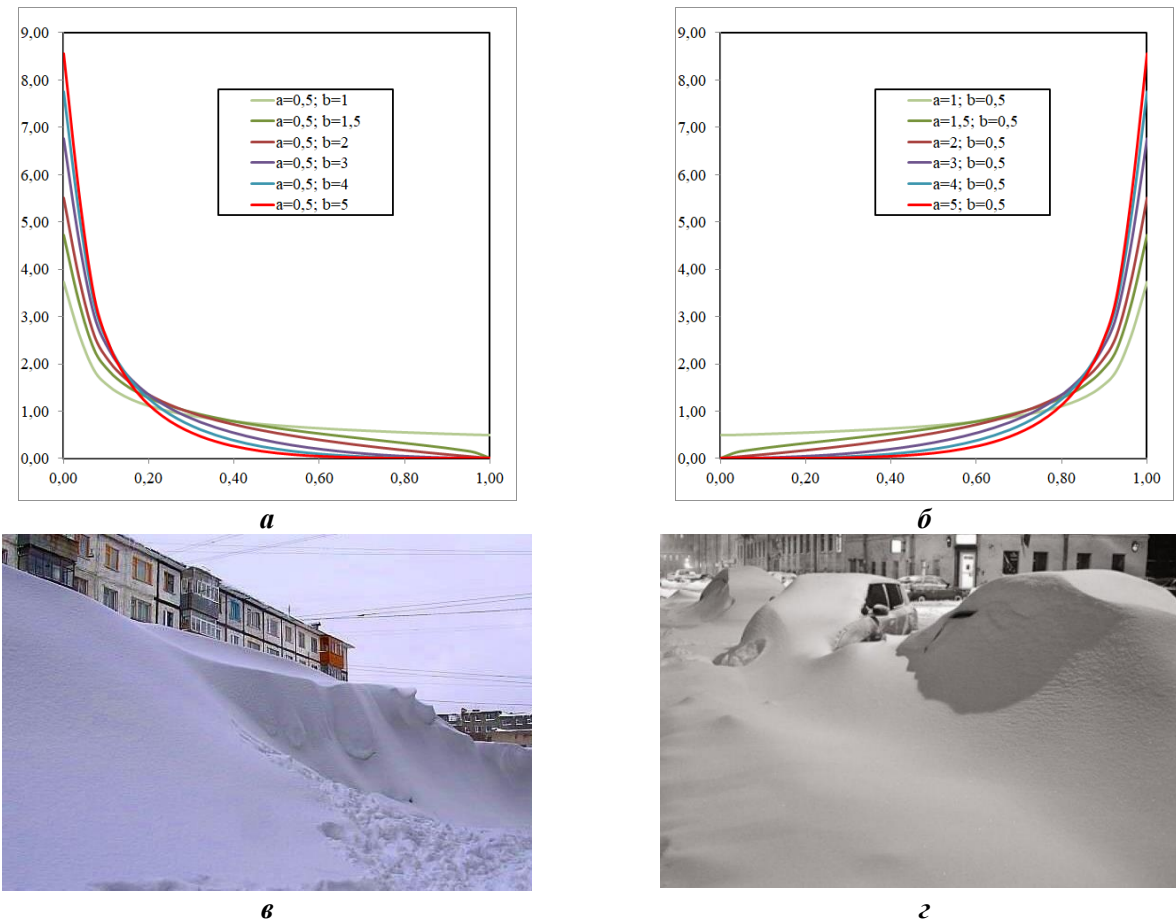


Рис. 4. Пример формирования снега около стенки

Fig. 4. Example of snow formation near the wall

3. $\alpha > 1, \beta > 1$ – график унимодальный. При $\alpha = \beta$ слой снега будет иметь симметричный характер.

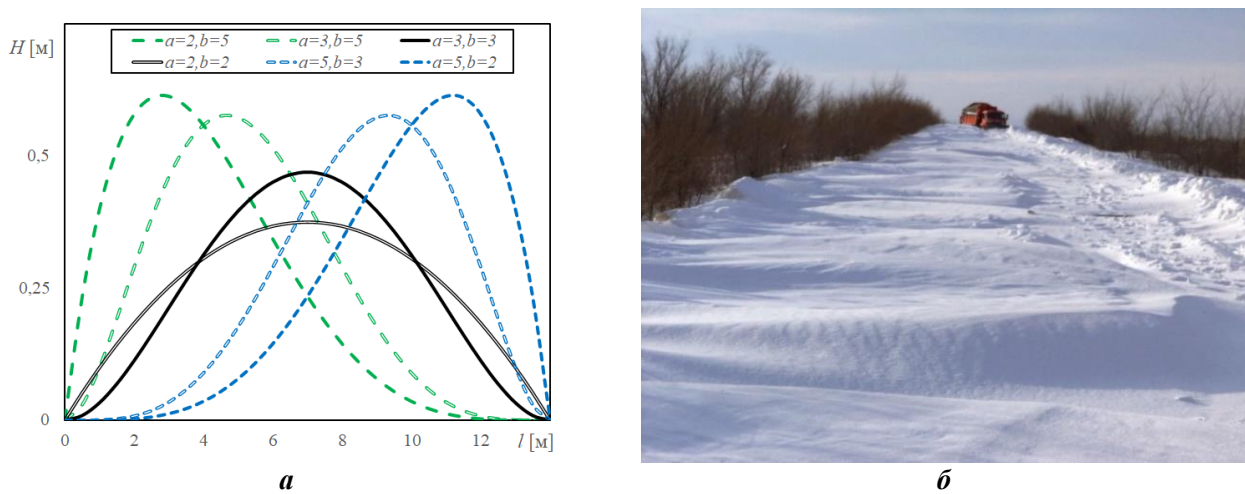


Рис. 5. Пример формирования намета снега

Fig. 5. Example of formation of snow drift

Расчет сил при преодолении дискретных снежных препятствий

В работах [4, 10] приводятся зависимости для расчета сопротивления движению. Сила сопротивления рассчитывается по зависимости:

$$F_f = b \gamma h_{\max}^2 \left[-\ln \left(\frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} - q_{\max}} \right) - \left(\frac{q_{\max}}{\gamma h_{\max} - q_{\max}} \right) \right], \quad (2)$$

где b – ширина движителя, γ – начальная жесткость снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости в начальной стадии деформации, h_{\max} – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению, q_{\max} – максимальное давление под движителем.

Сила тяги по сцеплению движителя со снегом определяется по зависимости:

$$F_\varphi = \int dF_\varphi, \quad dF_\varphi = dF_{\varphi r} + dF_{\varphi c} \quad (3)$$

где $dF_{\varphi r}$ – составляющая от элементарной реакции от трения материала шины об опорную поверхность, $dF_{\varphi c}$ – составляющая элементарной тангенциальной реакции от сопротивления сдвигу. Более подробно параметры, входящие в (2) и (3) рассмотрены в [4, 10, 11]

Условием возможности движения при динамическом преодолении препятствий будет:

$$F_\varphi \geq F_k \geq F_f + m \frac{dv}{dt}, \quad (4)$$

где F_k – сила тяги на движителе, m – масс ТС, $\frac{dv}{dt}$ – ускорение (замедление). При расчетах выбирается меньшее значение из F_φ и F_k .

Определение параметров дискретной проходимости при движении через снежные наносы различной формы

Рассмотрим, как как меняется скорость и ускорение ТС в зависимости от того, как оно проезжает снежные наметы разной формы. Приняты допущения, что снег однороден по высоте и соответствует «снегу-3» [4, 10], нагрузка на колесо 500 кг, ширина 20 см, а также то, что скорость не поднимается выше максимальной заданной. На графиках показаны значения ускорений, которые могут быть по условию реализации максимально возможной силы тяги. По потере проходимости можно судить, когда скорость будет равна нулю. На рис. 6 показаны снежные наметы площадью сечения 5 м², протяженностью 14 м, с физико-механическими характеристиками, соответствующими «снегу-3». Параметры распределения в формуле (3) соответственно равны α и β следующим значениям $\alpha = 5, \beta = 3$ (рис. 6 а), $\alpha = 3, \beta = 5$ (рис. 6 б), $\alpha = 5, \beta = 2$ (рис. 6 в), $\alpha = 2, \beta = 5$ (рис. 6 г), $\alpha = 3, \beta = 3$ (рис. 6 д), $\alpha = 2, \beta = 2$ (рис. 6 е).

Как видно из графиков на рис. 6, форма снежных наметов влияет как на минимальную скорость прохождения дискретных снежных препятствий, так и на расстояние, которое проедет машина с определенной скоростью до момента потери подвижности транспортным средством. Минимальной скоростью прохождения снежных наметов будут: $V_{\min} = 5,7$ м/с (рис. 6 а), $V_{\min} = 5,8$ м/с (рис. 6 б), $V_{\min} = 6$ м/с (рис. 6 в, г), $V_{\min} = 4,9$ м/с (рис. 6 д), $V_{\min} = 5,5$ м/с (рис. 6 е). Предельными расстояниями, которое проедет машина со скоростью $V = 5$ м/с до момента потери подвижности будут значения около $L = 10,6$ м (рис. 6 а), $L = 6,4$ м (рис. 6 б), $L = 12$ м (рис. 6 в), $L = 4,5$ м (рис. 6 г), участки на рис. 6 д, е при скорости 5 м/с преодолевается без потери подвижности.

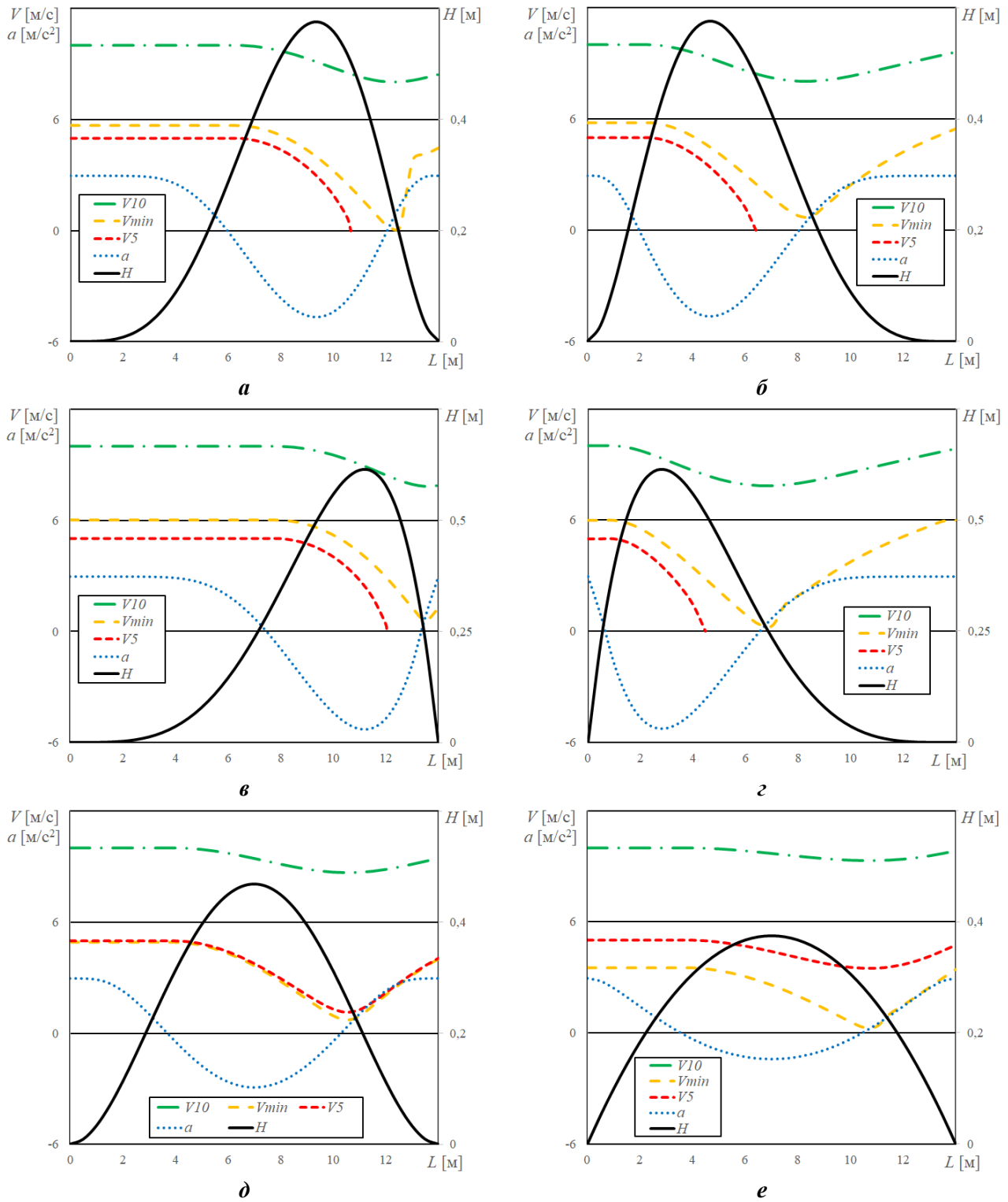


Рис. 6. Характер изменения скоростей движения и ускорений в зависимости от формы снежных наметов

Fig. 6. Patterns of moving speeds and accelerations depending on the shape of snow drifts

Выводы

На основании проведенного исследования определена новая структура подвижности по проходимости, наряду с профильной и опорной проходимостью и преодолением водных преград, включающая новое понятие «дискретная проходимость». Приведена новая классификация дискретных снежных препятствий по ряду отличительных признаков: наличие целевого фактора (естественные и искусственные), наличие источника формирования (недеформируемые и деформируемые), по структуре (естественная, слоистая, уплотненная), по степени постоянства источника формирования (постоянная и непостоянная), по физико-механическим свойствам (сдвиговым и деформационным), по составу (снег и лед, микст) и по форме дискретного препятствия. Предложена математическая зависимость, позволяющая описывать форму снежных наносов в зависимости от формы подстилающей поверхности, а также от параметров, входящих в формулу и определяющих изменение высоты снега в зависимости от протяженности снежного намета и площади поперечного сечения.

Приведены зависимости для расчета сил сопротивления от вертикального смятия снега и силы тяги. Описано условие движение транспортного средства с учетом динамики преодоления дискретных снежных препятствий. Представлены результаты расчетов для «снега-3» и машины с нагрузкой на колесо 500 кг и шириной движителя 20 см. Определены минимальные скорости преодоления снежных наметов без застревания для шести разных форм дискретных препятствий и одинаковой площади сечения. Рассчитаны предельные расстояния, которые проедет машина со скоростью 5 м/с.

В дальнейшем планируется изучение влияния параметров подстилающей поверхности, направления ветра, его скорости, наличия оттепелей и метелей на форму дискретных снежных препятствий. Также будет рассмотрено, как изменяются структура, наличие ледяных корок, плотность, размеры и форма кристаллов снега, зависящие от множества факторов.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в «Нижегородской научно-практической школе транспортного снеговедения» в рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук МК-336.2022.4.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-174.
2. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 72-77.
3. **Папунин, А.В.** Методика расчета, выбора и оценка основных параметров движителя многоосной колесной машины при преодолении разрушаемых препятствий: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород, 2019. – 175 с.
4. **Барахтанов, Л.В.** Снегоходные машины/ Л.В. Барахтанов и др. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
5. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон: диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород: НГТУ, 2017. – 321 с.
6. **Дюнин, А.К.** В царстве снега / А.К. Дюнин. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. – 161 с.
7. **Куляшов, А.П.** Зимнее содержание дорог / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // НГТУ. – изд.2., испр. и доп. – Нижний Новгород. 2012. – 369 с.
8. **Рихтер, Г.Д.** Снежный покров, его формирование и свойства / Г.Д. Рихтер. – Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1945. – 120 с.

9. **Шапкин, В. А.** Основы теории движения машин с роторно-винтовым двигателем по заснеженной местности: диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 2001. – 389 с.
10. **Малыгин, В.А.** Исследование процесса деформации снега под воздействием гусеничного двигателя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных машин: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1971. – 155 с.
11. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород, 2009. – 165 с.

*Дата поступления
в редакцию: 01.04.2022*

УДК 629.331+004.6

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_105

КОНСОЛИДАЦИЯ ДАННЫХ В КОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В.В. Савченко

ORCID: 0000-0002-2645-7645 e-mail: uus@tut.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

*Минск, Республика Беларусь***В.В. Литарович**

ORCID: 0000-0002-1732-0778 e-mail: veronika.litarovich@gmail.com

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Анализируется проблема передачи управления водителю при переходе высокоавтоматизированных транспортных средств к ручному режиму управления, находящаяся сегодня на стадии поисковых исследований. Информационная система C-V2X позволяет ставить и решать задачи по прототипированию и апробации передачи управления водителю на определенном высокоавтоматизированном транспортном средстве с использованием ранее разработанных подходов, концепций и методов. Рассмотрены архитектуры развертывания и общие требования к протоколам обмена информацией C-V2X, позволяющие обосновывать технические требования к коммуникационной платформе в зависимости от ее функционала. C-V2X является основной информационной системой, обеспечивающей передачу разнородных данных как уже консолидированных в бортовых системах высокоавтоматизированных транспортных средств, так и «сырых» данных для их последующей консолидации облачными сервисами, с целью последующей реализации различных функционалов в бортовых системах, например, поддержка движения как в автономном режиме, так и в режиме ручного управления.

Ключевые слова: безопасность, высокоавтоматизированное транспортное средство, C-V2X, домен штатной эксплуатации, информационные потоки, консолидация данных, переход от автоматизированного режима управления транспортным средством к ручному.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Савченко, В.В. Консолидация данных в коммуникационной платформе для высокоавтоматизированных транспортных средств / В.В. Савченко, В.В. Литарович // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 105-114. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_105

CONSOLIDATION OF DATA IN COMMUNICATION PLATFORM FOR HIGHLY AUTOMATED VEHICLES

V.V. Savchenko

ORCID: 0000-0002-2645-7645 e-mail: uus@tut.by

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus

*Minsk, Republic of Belarus***V.V. Litarovich**

ORCID: 0000-0002-1732-0778 e-mail: veronika.litarovich@gmail.com

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Problem of transferring of control to the driver during transition of highly automated vehicles to manual control mode, which is currently at the stage of exploratory research, is analyzed. S-V2X information system allows to set and solve problems of prototyping and testing of transfer of control to the driver on a certain highly automated vehicle using previously developed approaches, concepts and methods. Architectures of deployment and general requirements for C-V2X information exchange protocols are considered, which allow to justify technical requirements

for a communication platform depending on its functionality. C-V2X is the main information system that provides the transfer of heterogeneous data, both already consolidated in on-board systems of highly automated vehicles, and «raw» data for their subsequent consolidation by cloud services, with the aim of subsequent implementation of various functionals in on-board systems, for example, support for movement both in autonomous mode and in manual control mode.

Key words: safety, highly automated vehicle, C-V2X, domain of regular operation, information flows, data consolidation, transition from automated vehicle control mode to manual.

FOR CITATION: V.V. Savchenko, V.V. Litarovich. Consolidation of data in communication platform for highly automated vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 105-114.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_105

Введение

Реализация междисциплинарной проблемы перехода от автоматизированного режима управления высокоавтоматизированным транспортным средством (ТС) к ручному во время выхода из зоны домена штатной эксплуатации [1-6] предполагает решение ряда взаимосвязанных задач: разработка соответствующих моделей [7], автоматический анализ информационных потоков в интеллектуальных транспортных системах, взаимодействие бортовых информационно-аналитических комплексов с внешними системами [8-10], классификация признаков выполнения водителем алгоритмов деятельности или их фрагментов и классификация релевантной информации для водителей в высокоавтоматизированных транспортных средствах, включая кросс-модальные информационные потоки [11-14], мониторинг профессионально важных качеств и функционального состояния водителей непосредственно во время ручного управления высокоавтоматизированным транспортным средством, выявление их динамики по сравнению с результатами, полученными в лабораторных условиях. Заключительная обработка информации осуществляется облачными сервисами [10, 15].

Коммуникационная платформа *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X) позволяет выполнять интеграцию и консолидацию данных из различных источников для использования различными типами бортовых систем высокоавтоматизированных транспортных средств, включая поддержку автономного вождения в домене штатной эксплуатации, информировать водителя при ручном режиме управления, информировать и актуализировать специализированные базы данных для их анализа, в том числе, в реальном масштабе времени, для определения момента времени перехода высокоавтоматизированных транспортных средств от автоматизированного режима управления к ручному.

Архитектуры развертывания C-V2X

Стандартизацией архитектур развертывания и протоколов обмена информацией C-V2X занимаются консорциум 3GPP (3rd Generation Partnership Project) и ассоциация 5GAA (5G Automotive Association). Выделяются следующие архитектуры развертывания C-V2X.

- Гибридная с применением интерфейса PC5 и LTE-Uu. PC5 – интерфейс, определенный в Release 14 of 3GPP, отвечает за подключение V2V, V2P, V2I для предоставления транспортных услуг с низкой задержкой и высокой надежностью. LTE-Uu – отвечает за подключение конечных пользователей и транспортных средств к базовым станциям мобильной сети, а также за поддержку услуг Интернет и V2N.
- Основанная на мобильной связи пятого поколения 5G, включающая в себя два подвида NSA (Non-Stand Alone) и SA (Stand Alone).

Гибридная архитектура

Иерархическая гибридная сетевая архитектура интеллектуальной транспортной системы (ИТС) основана на концепции распределения сетевых устройств по разным уровням. В

сетевой архитектуре C-V2X используется для связи между общественным транспортом и коммунальными службами, а также для доступа в интернет. Сети на основе DSRC используются для связи между транспортными средствами и между личным и общественным транспортом. Такая сетевая архитектура называется статической: каждому устройству назначен определенный неизменный уровень.

В динамической архитектуре уровни, назначенные устройствам, могут быть изменены в соответствии с динамикой сетевых условий. Устройства назначаются группам в зависимости от их положения на дороге, при этом в каждой группе назначается основное устройство – обычно то, которое имеет высокие сетевые и вычислительные ресурсы, или промежуточный узел [16]. Целью основного устройства является управление соединениями и регулирование сетевой нагрузки. Обычные устройства (не являющиеся основными) могут быть подключены к нескольким основным устройствам, что позволяет повторно передавать данные между соседними группами. C-V2X сеть используется для связи между основным устройством и базовой станцией, связи между основными устройствами, связи между основным устройством и обычными устройствами в его группе. Сеть DSRC используется для соединения между обычными устройствами в одной группе. Основное преимущество этой архитектуры заключается в том, что основное устройство может собирать информацию с обычных устройств и периодически передавать ее на базовую станцию или другое устройство обработки данных, что снижает нагрузку на сеть. Главный недостаток заключается в том, что процесс группирования является длительным, что ограничивает возможности развертывания в густонаселенных районах, таких как центры городов.

Плоская сетевая архитектура ИТС не ограничивает тип соединения для взаимосвязи устройств. Тип соединения между устройствами выбирается в зависимости от загруженности сети, качества и расстояния. Если устройство использует C-V2X по умолчанию, предусматривается возможность переключиться на DSRC при изменении сетевых условий. Параметры DSRC и C-V2X постоянно обновляются, и на основе заранее определенного алгоритма выбирается наилучший из возможных методов подключения. В табл. 1 представлено сравнение архитектур [16].

Таблица 1.

Архитектуры C-V2X

Table 1.

C-V2X architectures

Топология	Местность	Связь	Применение
Иерархическая	Пригород	V2X	Видео сообщения
Иерархическая	Город	V2I	Интернет
Иерархическая	Город	V2X	Сообщения о безопасности
Плоская	Город	V2V	Планирование путешествий
Плоская	Пригород	V2I	Интернет

На рис. 1 представлен стек протоколов гибридной C-V2X; операции V2X выполняются на нескольких несущих. В одном сценарии UE (User Equipment – пользовательское оборудование) может использовать V2X на основе LTE-Uu V2X в одной несущей, в то время как в другой несущей работает на основе PC5. В другом сценарии UE может управлять V2X на основе PC5 одновременно на двух несущих. В табл. 2-3 перечислены комбинации операторов связи V2X, поддерживаемых для V2X услуг.

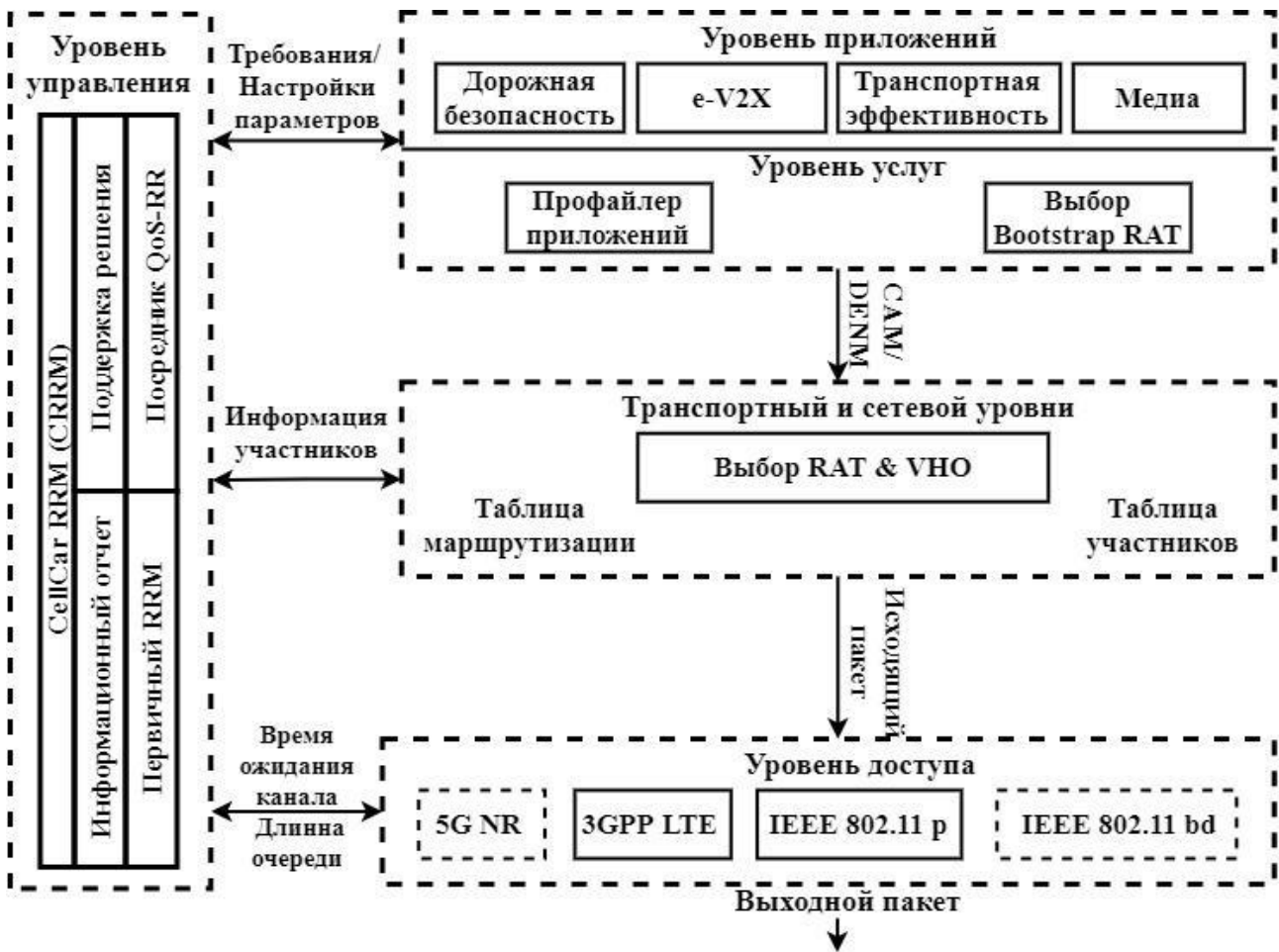


Рис. 1. Стек протоколов гибридной C-V2X [17]

Fig. 1. Hybrid C-V2X protocol stack [17]

Таблица 2.

Межполосные конфигурации V2X [18]

Table 2.

V2X configurations between bands [18]

Конфигурация V2X	Полосы E-UTRA	Интер	1.4	3	5	10	15	20	Мах полоса пропускания МГц
			МГц						
V2X_3A-47A	B3 (1.8 ГГц)	Uu	Да	Да	Да	Да	Да	Да	40
	B47 (5.9 ГГц)	PC5				Да		Да	
V2X_7A-47A	B7 (2.6 ГГц)	Uu			Да	Да	Да	Да	40
	B47 (5.9 ГГц)	PC5				Да		Да	
V2X_8A-47A	B8 (900 МГц)	Uu	Да	Да	Да	Да			30
	B47 (5.9 ГГц)	PC5				Да		Да	
V2X_39A-47A	B39 (1.9 ГГц)	Uu			Да	Да	Да	Да	40
	47 (5.9 ГГц)	PC5				Да		Да	
V2X_41A-47A	B41 (2.5 ГГц)	Uu			Да	Да	Да	Да	40
	47 (5.9 ГГц)	PC5				Да		Да	

Таблица 3.

Межполосные конфигурации V2X [18]

Table 3.

V2X configurations between bands [18]

Конфигурация V2X	Полоса пропускания канала несущей 1	Полоса пропускания канала несущей 1	Макс полоса пропуск МГц
V2X_47A_47A (5.9 ГГц)	10	10	20

Архитектура, основанная на мобильной связи 5G

Полосы частот для C-V2X на основе LTE представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Полосы частот [16]

Table 4.

Bands of frequencies [16]

Рабочий диапазон	Восходящая линия связи МГц	Нисходящая линия связи МГц	Интерфейс	Максимальная полоса пропускания МГц
47	5855-5925		PC5	30 (Использование формата агрегирования несущих 10 + 20 МГц или 10 + 10 + 10 МГц)
3	1710-1785	1805-1880	Uu	20
5	824-849	869-894	Uu	20
7	2500-2570	2620-2690	Uu	20
8	880-915	925-960	Uu	10
20	832-862	791-821	Uu	20
28	703-748	758-803	Uu	20
34	2010-2025		Uu	15
39	1880-1920		Uu	20
41	2496-2690		Uu	20
71	663-689	617-652	Uu	20

На рис. 2 представлен стек протоколов C-V2X.

Физический уровень

C-V2X использует множественный доступ с одной несущей и частотным разделением каналов (SC-FDMA) и поддерживает каналы 10 МГц и 20 МГц с максимальной мощностью передачи и чувствительностью приемника 23 дБм и -90,4 дБм соответственно. Каждый канал делится на подкадры длиной 1 мс, так же, как и время интервала передачи (TTI – Transmission Interval Time). eNodeB выделяет блоки ресурсов (RB – Resource Blocks) пользовательскому оборудованию через каждый TTI = 1 мс. RB является наименьшей единицей частотных ресурсов, которая может быть выделена пользователю. 12 поднесущих по 15 кГц (всего 180 кГц) составляют RB. Группа RB в одном и том же подкадре в 1 мс называется подканалом в C-V2X [19]. Транспортные блоки (TB – Transport Blocks) переносят данные по PSSCH (Physical Sidelink Shared Channels), а по PSCCH (Physical Sidelink Control Channels) передают сообщения с управляющей информацией (SCI – Sidelink Control Information). PSSCH и PSCCH передаются в одном подкадре, но для PSCCH применяется повышение

спектральной плотности мощности до 3 dB. Можно выделить две субканализационные схемы:

- смежные PSCCH + PSSCH: SCI и TB передаются в смежных RB;
- несмежные PSCCH + PSSCH: RB разделены на два пула, где один пул несет только SCI, а второй пул передает только RB (TB используют QPSK или 16QAM схемы модуляции, однако SCI всегда посылаются с использованием QPSK).

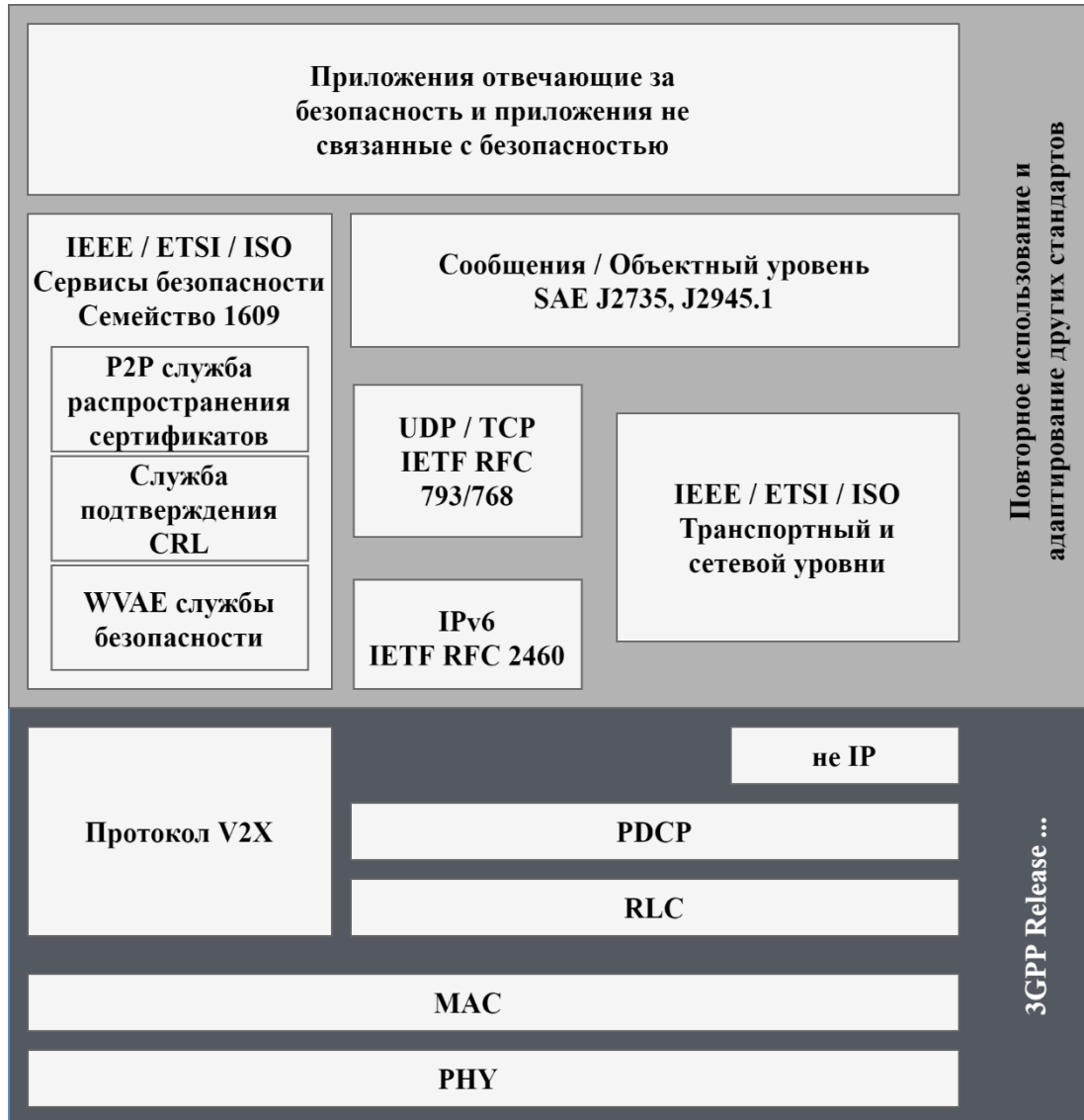


Рис. 2. Стек протоколов C-V2X

Fig. 2. C-V2X protocol stack

MAC уровень

Media Access Control или Medium Access Control (MAC) – управление доступом к среде – отвечает за обеспечение адресации и механизмы управления доступом к каналам. Когда транспортное средство находится в зоне действия сотовой сети, сеть решает, как сконфигурировать V2X канал, и информирует транспортное средство о V2X конфигурируемых параметрах, таких как несущая частота V2X канала, пул ресурсов V2X, ссылки синхронизации, схема подканалов, количество подканалов на подкадр и количество RB на подканал. Транспортные средства, использующие связь в режиме 4, выбирают свои радиоресурсы, используя

зондирование с полупостоянной передачей, что аналогично «прослушиванию в частотной области перед разговором». ТС резервирует подканалы для нескольких последовательных передач на основе схемы SPS. Счетчик пакетов повторного выбора назначается случайным образом от пяти до пятнадцати и уменьшается с каждой передачей. Как только счетчик пакетов повторного выбора достигает нуля, транспортное средство должно запросить дополнительные ресурсы, после чего счетчик повторного выбора назначается случайным образом снова [19].

Пакеты могут передаваться каждые 100 подкадров, т.е. десять пакетов в секунду. Процесс резервирования подканалов может быть разбит на три этапа:

- 1) измерение полученной энергии (RSSI) на ресурсах, удовлетворяющих требованиям к задержке;
- 2) ранжирование ресурсов на основе полученной энергии и составление списка 20 % наименьших относительных энергетических RB;
- 3) выбор одного из самых низких относительных энергетических ресурсов для передачи.

В 3GPP релиз 14 CBR (Channel Busy Rate) и COR (Channel Occupancy Rate) определяются как два важных показателя для уменьшения перегрузки канала и непрерывно вычисляются ТС каждый раз, когда происходит передача или повторная передача пакета. CBR обеспечивает индикацию уровня перегрузки канала и определяется как количество подканалов в предыдущих 100 подкадрах, которые имеют средний RSSI выше предварительно сконфигурированного порога. COR количественно определяет занятость канала, генерируемого передающим транспортным средством, и определяется как количество подканалов, которыми пользуется передающее транспортное средство в течение периода в 1 000 подкадров.

Информационные потоки, циркулирующие в коммуникационной платформе C-V2X

В состав коммуникационной платформы C-V2X входят следующие узконаправленные связи: V2V, V2I, V2N (Vehicle-to-Network), V2P (Vehicle-to-Pedestrian).

V2V связь используется для коммуникации между транспортными средствами. Варианты использования, показывающие основные информационные потоки, передающиеся через V2V, следующие [20].

1. *FCW (Forward Collision Warning)* – предупреждение о прямом столкновении. Уровень услуг V2V транспортного средства периодически передает сообщение с указанием текущего местоположения, скорости, ускорения и предполагаемой траектории движения. ТС определяет полосу движения и время до столкновения и передает это в широковещательном сообщении. Сеть LTE осуществляет трансляцию сообщения по запросу прикладного уровня, после чего ТС получает сообщение и определяет необходимость принятия какого-либо действия.

2. *CLW (Control Loss Warning)* – предупреждение о потере контроля. ТС периодически передает сообщение с указанием текущего местоположения, скорости, ускорения и предполагаемой траектории движения. Когда ТС идентифицирует потерю управления, осуществляется передача информации через широковещательную рассылку с использованием службы V2V. ТС, находящееся в зоне действия рассылки, получает сообщение и определяет необходимость принятия какого-либо действия.

3. *EVW (Emergency Vehicle Warning)* – предупреждение о ТС экстренного назначения. Позволяет каждому транспортному средству получать информацию о местоположении, скорости и направлении движения транспортного средства экстренного назначения (например, машины скорой помощи) для обеспечения безопасности движения. Передающее ТС проверяет информацию, поступающую от впереди идущих ТС, которая включает в себя местоположение, скорость и направление движения, если какой-либо из параметров удовлетворяет критериям проверки начинается передача сообщения CAM. CAM содержит основную информацию о транспортном средстве, включая информацию о динамическом состоянии

транспортного средства (направление и скорость), статические данные транспортного средства (размеры, состояние внешних огней, историю пути). Размер сообщения CAM составляет от 50 до 300 байт. CAM сообщение передаётся с частотой 10 сообщений в секунду в широкополосном режиме, с задержкой менее 100 мс.

4. *Emergency Stop* – аварийная остановка. Сервис безопасности машины получает информацию об аварийной остановке и генерирует DENM сообщение «Предупреждение о стационарном (неподвижном) автомобиле». Размер DENM сообщения не превышает 3000 байт и доступно всем ТС находящимся в диапазоне передачи.

5. *Cooperative Adaptive Cruise Control* – кооперативный круиз контроль. ТС находящиеся в группе периодически передают сообщения, в которых содержится информация о размере группы, скорости, расстоянии разрыва, позиции в группе и т.д. ТС, которое желает присоединиться к группе получает данное сообщение и проводит его анализ на удовлетворение критериям. Если критерии соответствуют, ТС посылает запрос на присоединение к группе и получает разрешение (запрет). После присоединения нового ТС происходит обновление информации о группе, хранящейся локально. Аналогичным образом осуществляется отсоединение транспортного средства от группы.

6. *Передача под управлением MNO (Mobile Network Operator)*. ТС находится в зоне действия E-UTRAN, где UE инициирует широкополосную передачу сообщений. UE запрашивает ресурсы в eNB и получает выделенный ресурс для передачи широкополосных сообщений. Когда другое ТС находится в зоне действия передающего ТС, оно получает сообщение.

V2I связь используется для коммуникации между ТС и инфраструктурой. Варианты использования, показывающие основные информационные потоки, передающиеся через V2I, следующие [20].

1. *Emergency Stop* – аварийная остановка. Сервис безопасности машины получает информацию об аварийной остановке и генерирует DENM сообщение «Предупреждение о стационарном (неподвижном) автомобиле». Служебный RSU (Roadside Unit – придорожный блок), находящийся поблизости, принимает данное сообщение и передает его всем ТС, находящимся в диапазоне передачи RSU.

2. *Queue Warning* – предупреждение о заторе. Данное сообщение относится как к V2V, так и к V2I. ТС периодически передает сообщение, в котором содержится информация о местоположении, размере транспортного средства, направлении и скорости движения, состоянии тормозов, номере передачи и информации об окружающей среде (использование V2V). ТС, которое находится в конце затора, получает широкополосные сообщения, по ним определяет, что оно является замыкающим, и периодически отправляет сообщения в RSU, в которых содержится информация о размере, состоянии затора, положении в заторе и расположение затора по полосам. RSU передает полученные данные всем ТС, находящимся в зоне действия (использование V2I).

3. *Сервисы дорожной безопасности*. UE. ТС определяет eNB и инициирует передачу сообщения периодически или на основе какого-либо события. eNB получает сообщение и начинает его передачу ТС, находящимся в зоне действия.

4. *Система автоматической парковки*. ТС посылает запрос на резервирование парковки серверу, указывая предполагаемое место назначения и получает ответ о резервировании. После этого происходит приближение к месту резервирования и соединение с RSU, осуществляется взаимная аутентификация идентификационных данных, в которой проверяется правильность выбранного RSU и ссылка бронирования.

V2N связь используется для коммуникации между транспортным средством и сетью. Варианты использования, показывающие основные информационные потоки, передающиеся через V2N [20], следующие.

1. *Оптимизация потока трафика при приближении к светофору*. ТС передают информацию о местоположении, скорости и направлении движения по сети определенному серверу.

ру, который отвечает за управление светофорами. В ответ на получение данных отправляется сообщение, в котором содержится информация о рекомендуемой скорости движения.

2. *Служба безопасности дорожного движения.* UE транспортного средства осуществляет регистрацию в MNO для получения доступа к услугам навигации и получения информации о безопасности дорожного движения. Передача сообщений между UE и сервером безопасности осуществляется по запросу прикладного уровня. RSU, которое обнаружило аварию, отправляет сообщение на сервер, в котором содержатся данные о местоположении аварии. После этого сервер безопасности дорожного движения отправляет полученную информацию на близлежащие RSU и в ТС с альтернативным маршрутом следования.

V2P связь используется для коммуникации между транспортным средством и пешеходом. Смартфон пешехода периодически осуществляет мониторинг поступающих V2P сообщений. ТС с определенной периодичностью и задержкой отправляет сообщение, в котором содержится информация о приближении ТС, его скорости и траектории движения [20]. После получения смартфоном сообщения от приближающегося ТС осуществляется отправка ответного сообщения о наличии неподалеку пешехода и выдача предупреждения на смартфоне и ТС.

Заключение

Коммуникационная платформа C-V2X является основной информационной системой, обеспечивающей передачу разнородных данных, как уже консолидированных в бортовых системах высокоавтоматизированных транспортных средств, так и «сырых», для их последующей консолидации облачными сервисами с целью последующей обработки и анализа для реализации различных функционалов. Появляется возможность использовать сложные сценарии в бортовых комплексах высокоавтоматизированных транспортных средств, например, поддержку движения как в автономном режиме в домене штатной эксплуатации, так и в режиме ручного управления. C-V2X позволяет ставить и решать задачи по прототипированию и апробации системы передачи управления водителю на определенном высокоавтоматизированном транспортном средстве с использованием ранее разработанных подходов, концепции, моделей, методов и способов. Рассмотренные архитектуры развертывания C-V2X позволяют обосновывать технические требования к коммуникационной платформе в зависимости от ее функционала для реализации современных автомобильных коммуникационных технологий.

Библиографический список

1. **Savchenko V.V., Poddubko S.N.** Development approach to a method for monitoring of driver's ability of resumption of control over the vehicle by on-board systems in automatic mode // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 386 (2018). 012007. Pp. 1-7.
2. **Савченко, В.В.** Проблема передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах: метод мониторинга восприятия семантически бинарной релевантной информации водителем // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. №2(47). С. 14-19.
3. **Савченко, В.В.** Концепция передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах / В.В. Савченко, С.Н. Поддубко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т.64, №5. С. 624-631.
4. Евразийский патент № 037164, МПК G05D 1/00 (2006.01), B60W 50/08 (2006.01), B60W 30/00 (2006.01). Способ управления транспортным средством и система для его осуществления: № 201900100 : заявл. 2019.02.04 : опубл. 2021.02.12 / В.А. Дубовский, В.В. Савченко. – 6 с.
5. **Дубовский, В.А.** Метод передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку / В.А. Дубовский, В.В. Савченко // Доклады БГУИР. 2020. № 18(7). С. 40-46.
6. **Dubovsky V.A., Savchenko V.V.** A general approach to describing the driver-vehicle interaction // «BIG DATE and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», материалы 7-ой Международной научно-практической конференции 19-20 мая 2021 г. – Минск, 2021. С. 67-73.

7. **Дубовский, В.А.** Концептуальная модель системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» / В.А. Дубовский, В.В. Савченко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2019. Том 63, №1. С. 112-120.
8. **Савченко, В.В.** Информационные потоки в ИТС: определение динамических характеристик системы «человек-машина» для автоматического расчета тяжести последствий ДТП для водителя // Перспективы развития транспортного комплекса, материалы Международной научно-технической конференции 04-06 октября 2016 г. (БелНИИТ «Транстехника»). – Минск, 2016. С. 272–279.
9. **Холод, Е.А.** Взаимодействие бортовых информационно-аналитических комплексов с внешними системами / Е.А. Холод, В.В. Савченко. // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2017. Вып. 6. С. 169-172.
10. **Савченко, В.В.** Информационные потоки в высокоавтоматизированных транспортных средствах // «BIG DATE and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», материалы 6-ой Международной научно-практической конференции 20–21 мая 2020 г., Часть 2 // г. Минск, Республика Беларусь. – С. 122–128.
11. **Литарович, В.В.** Анализ информационных потоков в коммуникационной платформе C-V2X / В.В. Литарович, Е.В. Мыльников, В.В. Савченко, М.А. Чернин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2019. Вып. 8. С. 145-147.
12. **Холод, Е.А.** Классификация признаков выполнения водителем транспортного средства алгоритмов деятельности или их фрагментов / Е.А. Холод, В.В. Савченко, В.А. Дубовский, М.А. Чернин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2020. Вып. 9. С. 136-140.
13. **Savchenko V.V., Poddubko S.N.** Cross-modal information flows in highly automated vehicles // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 534 (2019). – 012003.
14. **Savchenko V.V., Litarovich V.V.** Classification of semantically binary relevant information for drivers in highly automated vehicles // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 819 (2020). – 012042.
15. **Дубовский, В.А.** Метод контроля профессионально важных качеств водителей транспортных средств / В.А. Дубовский, В.В. Савченко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2019. Вып. 8. С. 159-161.
16. **Karolis Kiela.** Review of V2X–IoT Standards and Frameworks for ITS Applications // Karolis Kiela 1, Vaidotas Barzdenas, Marijan Jurgo and etc. // MDPI / Switzerland. – 2020. – 23 p.
17. **Zeeshan Hameed Mir, Jamal Toutouh, Fethi Filali, Young-Bae Ko.** Enabling DSRC and C-V2X Integrated Hybrid Vehicular Networks: Architecture and Protocol // IEEE Access. 2020.
18. 3GPP TR 21.914 version 14.0.0 Release 14 [Electronic resource]. – Mode of access: // https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121914/14.00.00_60/tr_121914v140000p.pdf (Date of accesses: .15.10.2021).
19. **Aman Kumar Gulia.** A Simulation Study on the Performance Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X // KTH royal institute of technology school of electrical engineering and computer science // Sweden – 2020. – 69 С.
20. 3GPP TR 22.885 V1.0.0 (2015-09) [Electronic resource]. – Mode of access: // <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2898> (date of access: 25.10.2021).

*Дата поступления
в редакцию: 22.02.2022*

УДК 629.3

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

А.А. Стадухин

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***В.Б. Холоденко**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: kholodenko@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Н.А. Мокрецов**

ORCID: 0000-0002-7050-1914 e-mail: mokretsovna@student.bmstu.ru

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

Рассматривается обеспечение управляемого движения гусеничной машины путем прогнозирования возникновения заноса и его предотвращения. Предлагается система помощи водителю в повороте, основанная на анализе критерия управляемого движения и способная воздействовать на органы управления трансмиссией гусеничной машины. В качестве возможных критериев управляемого движения были рассмотрены отношение теоретической и фактической скоростей поворота корпуса, а также угол увода машины. Проведен вычислительный эксперимент по оценке управляемости гусеничной машины при повороте в различных дорожных условиях. Представлены результаты моделирования движения гусеничной машины, оснащенной системой помощи водителю в повороте, а также выводы о возможности создания действующей системы помощи водителю на практике.

Ключевые слова: гусеничная машина, поворот, занос, система помощи водителю.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стадухин, А.А. Метод определения границ управляемого движения гусеничной машины / А.А. Стадухин, В.Б. Холоденко, Н.А. Мокрецов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 115-126. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

METHOD FOR DETERMINING THE BOUNDARIES OF CONTROLLED MOVEMENT OF A TRACKED VEHICLE

A.A. Stadukhin

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***V.B. Kholodenko**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: kholodenko@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***N.A. Mokretsov**

ORCID: 0000-0002-7050-1914 e-mail: mokretsovna@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Provision of controlled movement of a tracked vehicle by predicting the occurrence of skidding and its prevention, is considered. System of assistance to a driver in turning is proposed, based on the analysis of the criterion of controlled movement and capable of influencing the transmission controls of a tracked vehicle. Ratio of theoretical and actual hull turning rates, as well as drift angle of the machine, were considered as possible criteria for controlled movement. Computational experiment was carried out to assess the controllability of a tracked vehicle when turning in various road conditions. Results of modeling of movement of a tracked vehicle equipped with a system of assistance to driver in turning are presented, as well as conclusions about the possibility of creation of effective driver assistance system in practice.

Key words: tracked vehicle, turn, skidding, driver assistance system.

FOR CITATION: A.A. Stadukhin, V.B. Kholodenko, N.A. Mokretsov. Method for determining the boundaries of controlled movement of a tracked vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 115-126. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_115

Введение

Высокие требования к подвижности современных гусеничных машин (ГМ) делают необходимым движение в режимах, близких к предельным по управляемости. Для безопасного и сравнительно комфортного движения в данных условиях необходимы системы помощи водителю. Они давно применяются на серийных колесных машинах, однако продолжают совершенствоваться и изучаться [1, 2]. Следование пилотируемых машин по заданному маршруту обеспечивается водителем, который имеет достаточную информацию об условиях движения и способен воздействовать на органы управления тягой, торможением и кривизной траектории ГМ. В случае дефицита информации об условиях движения (например, скользком участке дороги), невнимательности или низкой квалификации водителя, ГМ может сойти с желаемой траектории, возможно, с тяжелыми последствиями.

В настоящей работе предлагается подход к созданию системы помощи водителю в повороте, которая способна:

- определять граничные условия управляемого движения ГМ (при этом следует считать характеристики опорной поверхности неизвестными и по возможности обходиться без сложной измерительной аппаратуры на машине);
- изменять сигналы органов управления таким образом, чтобы не допустить неуправляемого движения ГМ (при этом не следует значительно менять тягу или скорость машины в повороте, так как это может усугубить развитие заноса) [3].

Очевидно, что эффективность данной системы в большой степени определяется надежностью и точностью определения граничных условий управляемого движения ГМ.

Граничные условия управляемого движения гусеничной машины

В классической теории движения ГМ существует определение критической по заносу скорости, которая вычисляется [4, 5]:

$$V_{кр1} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R_f},$$

где R_f – фактический радиус поворота, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ – коэффициент сцепления траков с грунтом; определяется по формуле Никитина:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{0,925 + 0,15 \frac{R_t}{B}}$$

где μ_{max} – максимальный коэффициент сцепления траков гусениц с грунтом; R_t – теоретический радиус поворота, м; B – колея машины, м.

В работе [6] также приводится формула определения критической скорости:

$$V_{кр} = \sqrt{\mu_{max} \cdot g \cdot R_f}.$$

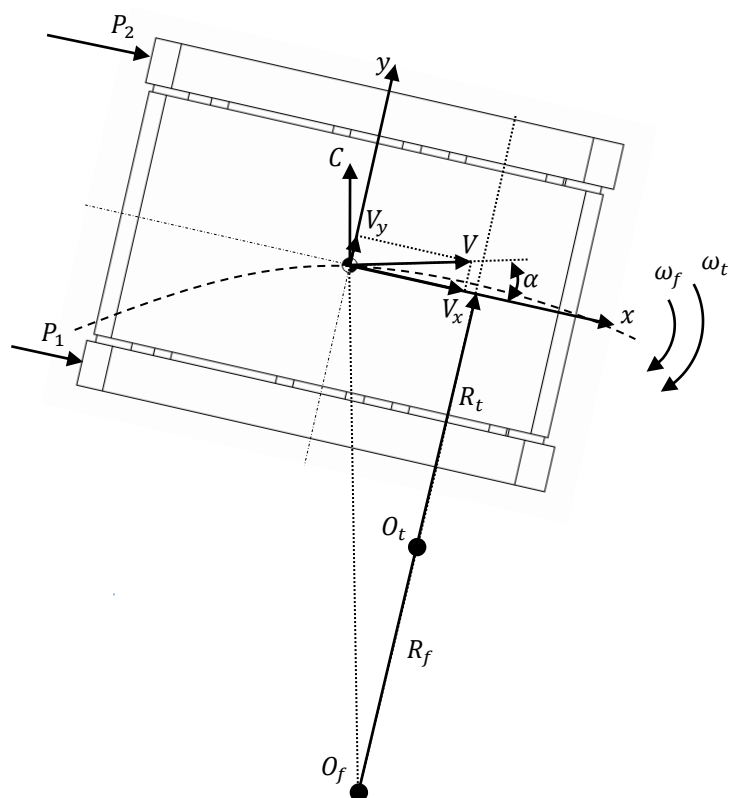


Рис. 1. Схема управляемого заноса гусеничной машины

Fig. 1. Scheme of controlled skidding of a tracked vehicle

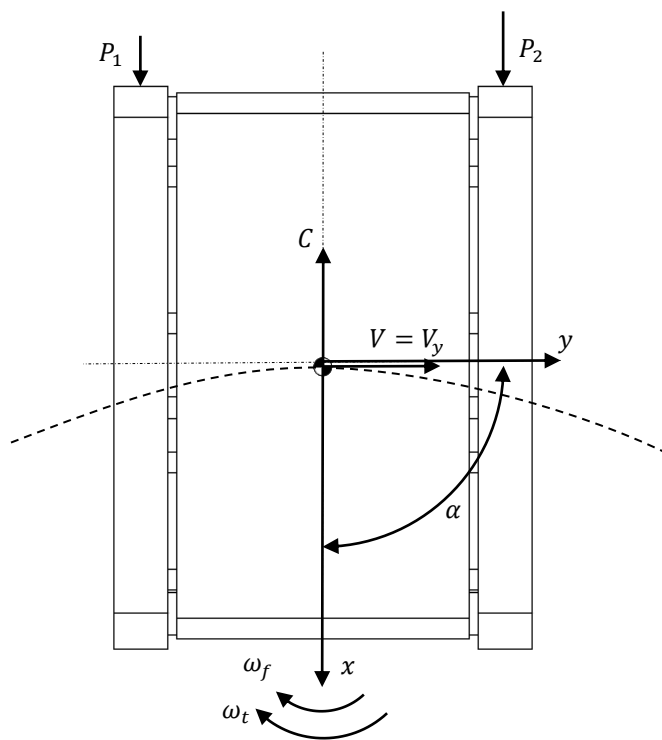


Рис. 2. Схема неуправляемого заноса гусеничной машины

Fig. 2. Scheme of uncontrolled skidding of a tracked vehicle

Физически величина $V_{кр1}$ соответствует скорости начала заноса машины, однако управляемое движение машины все еще возможно (управляемый занос, рис. 1). Величина $V_{кр}$ соответствует полному заносу машины, когда продольная ось перпендикулярна траектории (рис. 2). Очевидно, что управляемое (и вообще сколько-нибудь продолжительное) движение в таких условиях невозможно.

Величины $V_{кр1}$ и $V_{кр}$ удобно использовать для теоретических исследований, однако они не подходят для создания системы управления поворотом ГМ из-за необходимости знать свойства опорного основания перед машиной, т.е. коэффициенты сцепления с грунтом μ и μ_{max} . По этой причине интерес исследователей привлекает возможность определения наступления заноса по параметрам, которые сравнительно просто измерить в процессе движения ГМ. Наиболее удобными величинами здесь являются фактическая и теоретическая скорость поворота корпуса ГМ вокруг вертикальной оси. Фактическая угловая скорость корпуса ω_f может быть определена напрямую с помощью достаточно простого датчика угловых скоростей, а теоретическая угловая скорость вычисляется из скоростей вращения ведущих колес ГМ по формуле [5]:

$$\omega_t = \frac{\omega_2 - \omega_1}{B},$$

где ω_2 и ω_1 – скорости вращения ведущих колес забегающего и отстающего бортов соответственно, 1/с.

Известно, что по мере приближения скорости движения ГМ к критической по заносу, фактическая угловая скорость стремится к теоретической. В работах [6, 7] предлагается оценивать наступление заноса с помощью критерия как K_1 – отношения теоретической и фактической скорости поворота:

$$K_1 = \frac{\omega_t}{\omega_f}.$$

В реальных условиях ГМ совершает разгоны, торможения, неустановившиеся повороты, проявляя себя как сложная нелинейная механическая система. Поэтому для разработки алгоритмов системы помощи водителю наиболее эффективно использовать имитационное компьютерное моделирование.

Модель неустановившегося поворота гусеничной машины

В работе используется имитационная компьютерная модель, где движение ГМ представляется в виде плоского движения твердого тела в горизонтальной плоскости [8]. Взаимодействие движителя с опорным основанием вычисляется индивидуально для каждого опорного катка (а точнее, активного участка гусеницы под ним). Перераспределение нормальных нагрузок между опорными катками в результате действия внешних сил учитывается исходя из совместности деформации подвесок [9]. В [10] предложена структура системы управления, позволяющая осуществлять управление моментом на ведущих колесах, обеспечивая поддержание заданного фактического радиуса поворота и скорости движения. Данная система управления используется для имитации управляющих воздействий водителя при маневрировании ГМ.

Имитационное моделирование неустановившегося поворота гусеничной машины

Очевидно, не каждый занос приводит к потере управляемости ГМ. Так, в [6] приводится определение, согласно которому управляемым криволинейным движением ГМ следует считать возможность управляемого перехода из одного режима с установившимся движением в другой. Там же сказано, что движение ГМ является неуправляемым, если оно осуществляется независимо от управляющих воздействий, либо реакция машины на управляющее воздействие неопределенная.

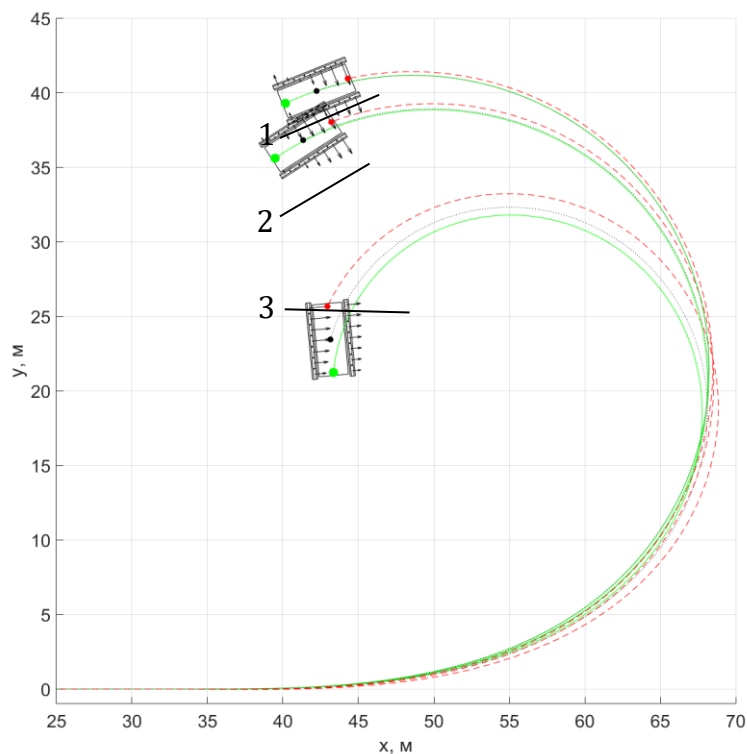


Рис. 3. Траектории корпуса гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения: 1 – $\mu_{max} = 0,6$; 2 – $\mu_{max} = 0,4$; 3 – $\mu_{max} = 0,25$; стрелками отмечены поперечные реакции грунта под опорными катками

Fig. 3. Trajectories of a tracked vehicle hull when passing a turn in various driving modes: 1 – $\mu_{max} = 0.6$; 2 – $\mu_{max} = 0.4$; 3 – $\mu_{max} = 0.25$; arrows indicate the transverse reactions of soil under support rollers

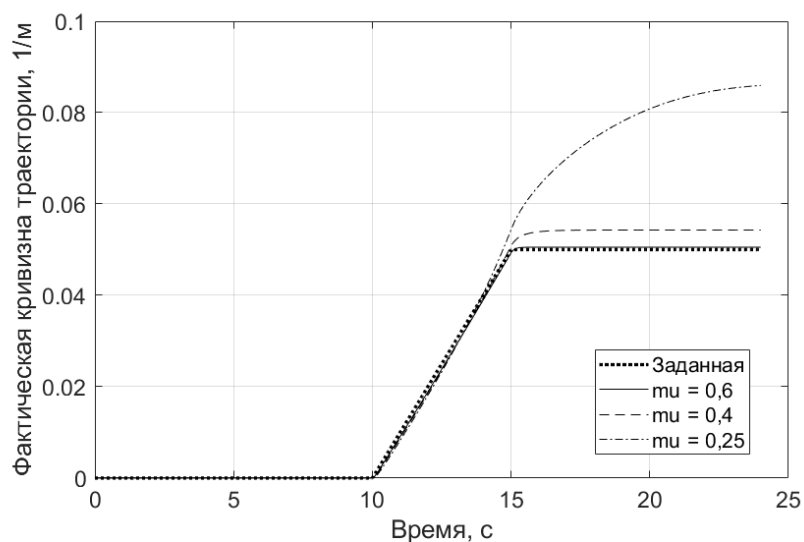


Рис. 4. Графики фактической кривизны траектории гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения

Fig. 4. Graphs of actual curvature of the tracked vehicle trajectory when passing a turn in different driving modes

Исходя из представленных соображений, для оценки управляемости ГМ предлагается использовать вычислительный эксперимент, состоящий из следующих этапов:

- ГМ разгоняется с места и начинает совершать установившееся прямолинейное движение;
- ГМ совершает неустановившийся поворот с возрастающей кривизной;
- ГМ совершает установившийся поворот.

Для дальнейших исследований было выбрано три режима движения: штатный поворот, где управляемое движение заведомо возможно, поворот с частичным заносом и поворот с полным заносом (табл. 1). Во всех случаях поддерживалась скорость $V_{пр} = 5,56$ м/с (20 км/ч) и фактический радиус $R_f = 20$ м (соответствует кривизне $k_f = 0,05$ 1/м).

Таблица 1.

Исходные данные для вычислительных экспериментов

Table 1.

Source data for computational experiments

Описание характера движения	μ_{max}	$V_{кр1}$	$V_{кр}$	$V_{пр}/V_{кр}$
Штатный поворот	0,6	9,027	10,848	0,52
Частичный занос	0,4	7,371	8,857	0,64
Полный занос	0,25	5,827	7,002	0,81

На рис. 3 показаны результаты проведенных вычислительных экспериментов в виде траекторий характерных точек корпуса ГМ (центр масс, нос и корма ГМ), по которым можно судить о развитии заноса в повороте.

На рис. 4 показано сравнение фактической кривизны в каждом вычислительном эксперименте с задаваемой кривизной. Очевидно, поведение ГМ при $\mu_{max} = 0,25$ можно охарактеризовать как потерю управляемости. Для указанных выше заездов было определено значение критерия управляемого движения K_1 (рис. 5). Значение критерия K_1 имеет склонность к осцилляции при прямолинейном движении ГМ, что затрудняет построение системы помощи водителю. Кроме того, наблюдается недостаточная чувствительность критерия K_1 при неустановившемся движении в повороте (10-15-я секунды моделирования на рис. 5). Поэтому использование критерия управляемого движения K_1 для определения и предотвращения заноса на практике затруднительно. В качестве критерия управляемого движения предлагается использовать угол увода α ГМ:

$$K_2 = \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}.$$

где V_x – продольная составляющая фактической скорости ГМ;

V_y – поперечная составляющая фактической скорости ГМ.

Графики значения угла увода α ГМ, полученные в ходе описанных ранее вычислительных экспериментов, представлены на рис. 6. Угол увода плавно и предсказуемо изменяется при развитии заноса, что делает эту величину пригодной для использования в качестве критерия управляемого движения ГМ. К сожалению, получение фактического угла увода с приемлемой точностью затруднительно, так как требует определения продольной и поперечной составляющей фактической скорости ГМ. Однако существует возможность косвенным образом вычислять угол увода с использованием нейронной сети, на вход которой будут подаваться параметры, которые в реальных условиях сравнительно просто определить с высокой точностью (например, величины скоростей поворота корпуса ω_t и ω_f).

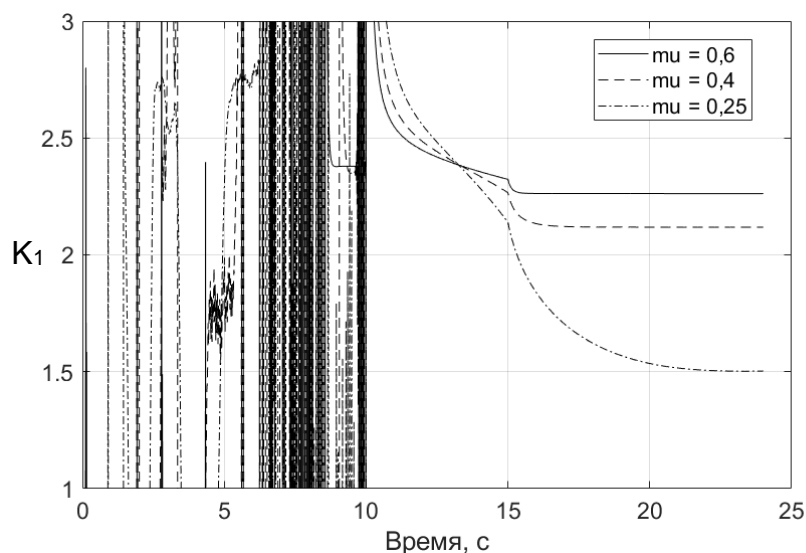


Рис. 5. Графики значения критерия управляемого движения K_1 гусеничной машины при прохождении поворота

Fig. 5. Graphs of the controlled movement criterion value K_1 of tracked vehicle when passing a turn

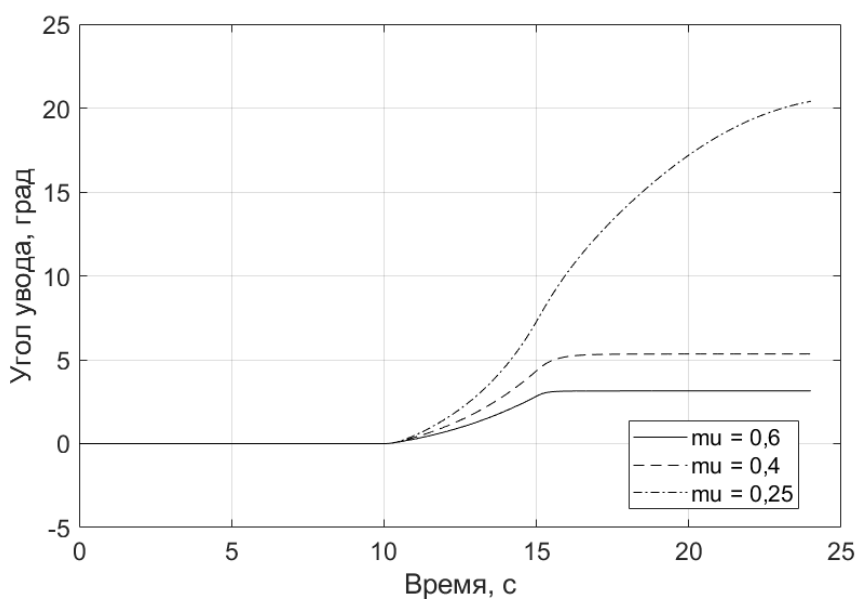


Рис. 6. Графики значения угла увода α гусеничной машины при прохождении поворота при разных режимах движения

Fig. 6. Graphs of the drift angle value α of tracked vehicle when passing a turn in different driving modes

Для формирования обучающего массива нейронной сети с использованием математической модели криволинейного движения ГМ было проведено большое количество вычислительных экспериментов (300 000) с варьированием условий движения (его диапазоны представлены в табл. 2). Эксперименты включали вход ГМ в поворот с последующим выходом из поворота на скорости, не приводящей к полному заносу (не более $0,7V_{кр}$).

Таблица 2.

Пределы варьирования параметров имитационного моделирования

Table 2.

Limits of variation of simulation parameters

Параметр	Пределы варьирования
Кривизна поворота ГМ k_f , 1/м	1/300...1/9
Коэффициент сцепления с грунтом μ	0,25...0,8
Скорость прямолинейного движения $V_{пр}$, м/с	1...(0,7 $V_{кр}$)

Проверка способности нейронной сети вида $\alpha = f(\omega_t, \omega_f)$ вычислять фактический угол увода выявила ее недостаточную точность (рис. 7). Исходя из предположения, что это вызвано дефицитом данных о силовых параметрах движения машины, предложено дополнить входной вектор значений нейронной сети такой величиной, как удельная разница значений сил тяги на бортах ГМ ΔF_T , которая вычисляется по формуле:

$$\Delta F_T = \frac{P_2 - P_1}{m \cdot g},$$

где P_2 и P_1 – силы тяги на ведущих колесах забегающего и отстающего бортов соответственно, Н; m – масса ГМ, кг.

На рис. 7 представлен вычислительный эксперимент при $\mu_{max} = 0,25$, где сравниваются результаты вычисления угла увода нейронными сетями $f(\omega_t, \omega_f)$ и $f(\omega_t, \omega_f, \Delta F_T)$ с истинным значением.

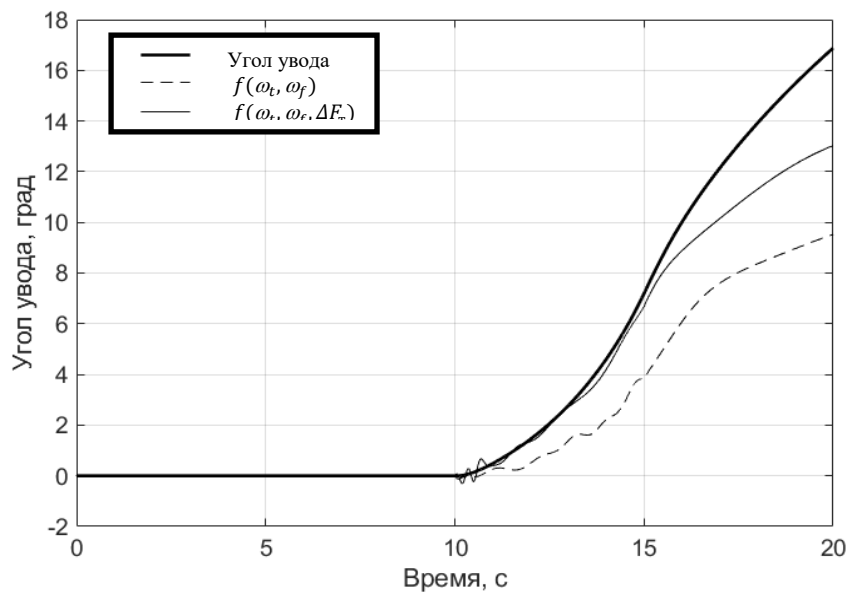


Рис. 7. Сравнение угла увода, вычисленного с помощью нейронных сетей, с истинным значением

Fig. 7. Comparison of the drift angle calculated using neural networks, with the true value

Данные результаты позволяют утверждать, что нейронная сеть вида $f(\omega_t, \omega_f, \Delta F_T)$ пригодна для практического определения угла увода по известным кинематическим и силовым факторам поворота ГМ. Зная действительный угол увода с приемлемой точностью, возможно создать систему помощи водителю, способную поддерживать скорость движения ГМ такой, чтобы угол увода находился в заданных пределах. Система, с одной стороны, не должна позволять машине достигать критической скорости движения, с другой стороны, не должна влиять на управление водителем кривизной траектории и приводить к резкому торможению. Ограничение

скорости движения машины предлагается осуществлять путем уменьшения управляющего воздействия, отвечающего за поступательное движение машины (т.е. сигнала управления тягой). Принципиальное устройство системы помощи водителю показано на схеме (рис. 8).

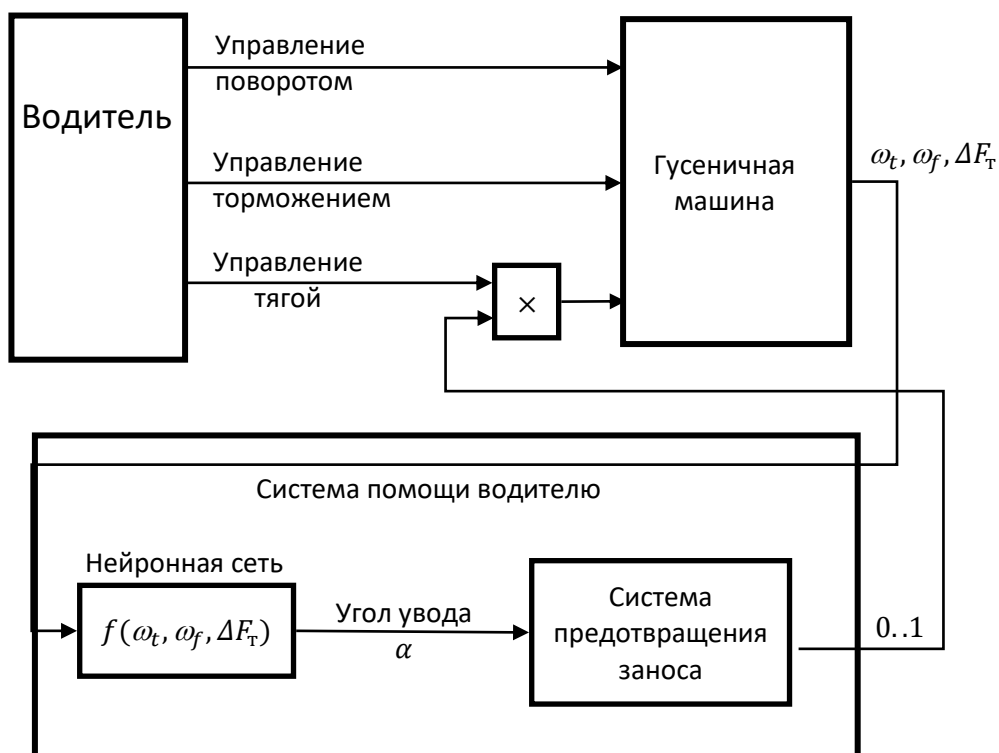


Рис. 8. Схема системы управления движением ГМ и системы помощи водителю ГМ в повороте

Fig. 8. Scheme of the TV movement control system and the system of assistance to a TV driver in turning

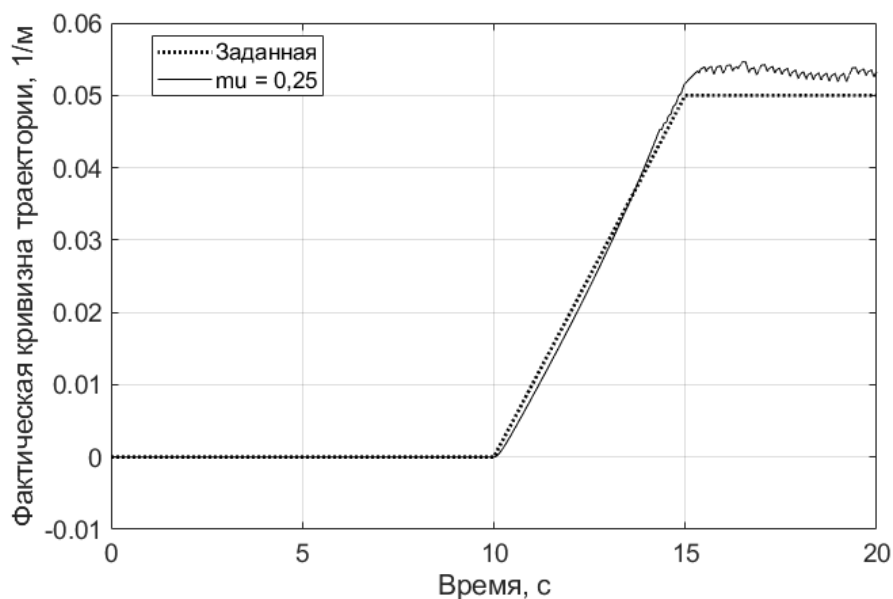


Рис. 9. Графики фактической кривизны траектории гусеничной машины при прохождении поворота в различных режимах движения

Fig. 9. Graphs of actual curvature of a tracked vehicle trajectory when passing a turn in various driving modes

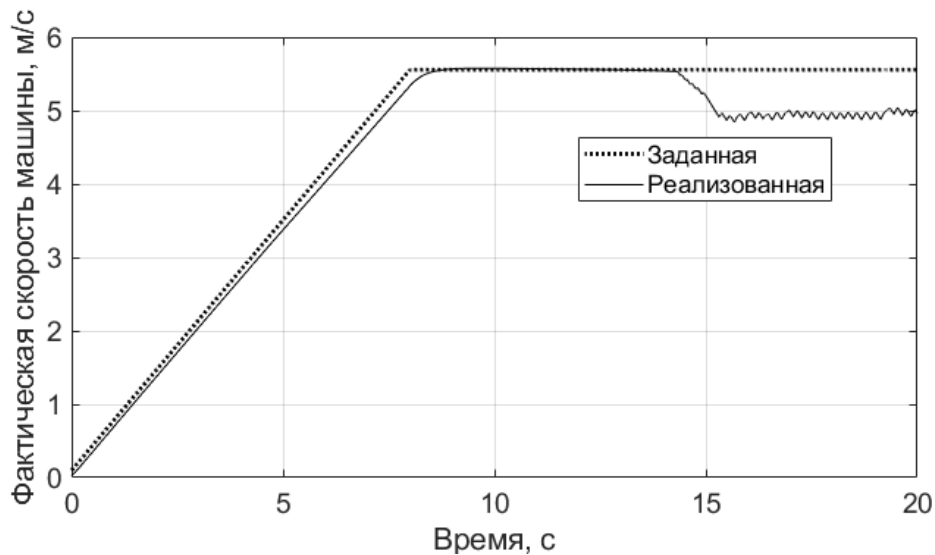


Рис. 10. Зависимость скорости гусеничной машины от времени при работе системы помощи водителю

Fig. 10. Dependence of the tracked vehicle speed on time during operation of the driver assistance system

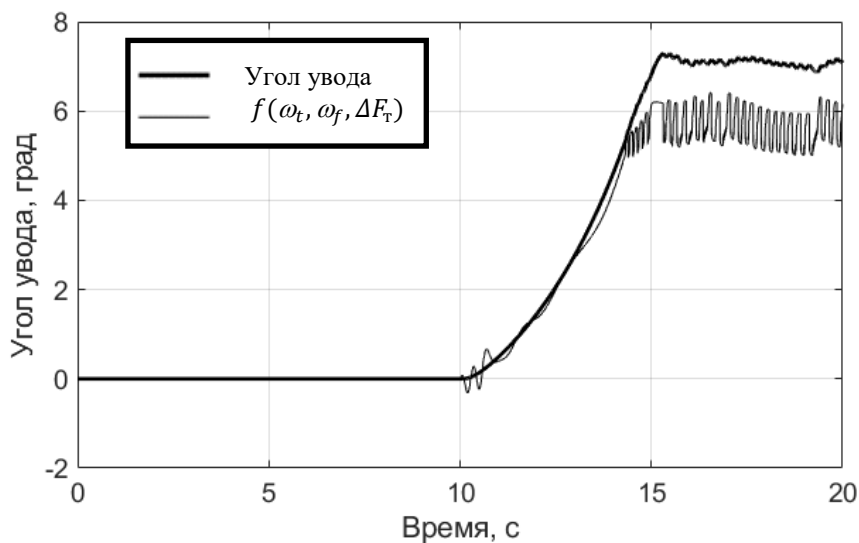


Рис. 11. Сравнение угла увода, вычисленного с помощью нейронной сети, с истинным значением при работе системы помощи водителю

Fig. 11. Comparison of the drift angle calculated using a neural network, with the true value during operation of the driver assistance system

На рис. 9-11 представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке управляемости ГМ, оснащенной системой помощи водителю. Условия моделирования идентичны эксперименту «полный занос» (табл. 1). Система предотвращения заноса была настроена таким образом, чтобы уменьшать сигнал управления тягой ГМ, когда угол увода превышает 5° .

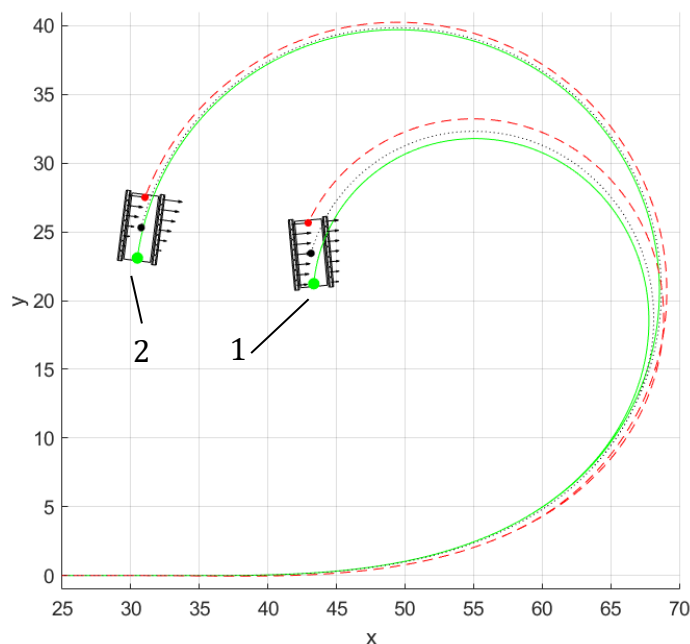


Рис. 12. Траектории корпуса гусеничной машины при прохождении поворота ($\mu_{max}=0,25$)

*1 – траектория при отсутствии системы помощи водителю;
2 – траектория при наличии системы помощи водителю;
стрелками отмечены поперечные реакции грунта под опорными катками*

Fig. 12. Trajectories of the tracked vehicle hull when passing a turn ($\mu_{max}=0.25$)

*1 – trajectory with the driver assistance system unavailable;
2 – trajectory with the driver assistance system available;
arrows indicate the transverse reactions of soil under support rollers*

Анализ результатов моделирования позволяет судить о том, что реализованная кривизна траектории в целом соответствует заданной, и машина сохранила управляемость (рис. 12). Это произошло благодаря тому, что система помощи водителю оказалась способна вычислить угол увода с достаточной точностью и уменьшить тягу ГМ, несмотря на ошибочное управляющее воздействие водителя (рис. 10).

Заключение

Общепринятый подход к определению границ управляемого движения через отношение величин теоретической и фактической угловой скорости корпуса ГМ не вполне соответствует практическому созданию системы помощи водителю в повороте.

Предложено создать систему помощи на основе ограничения действующего угла увода, который, в свою очередь, необходимо вычислять с помощью нейронной сети по теоретической и фактической угловой скорости корпуса ГМ и относительной разнице сил тяги на бортах. Показана работоспособность предложенной системы помощи водителю в условиях вычислительного эксперимента.

Библиографический список

1. **Talvala K.L.** Gerdes JC. Lanekeeping at the limits of handling: Stability via Lyapunov functions and a comparison with stability control. Dynamic Systems and Control Conference. Ann Arbor. 2008. p. 361-368.
2. **Nitin R. Kapania.** J. Christian Gerdes. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling. Vehicle System Dynamics. 2015. p.1687-1704. DOI: 10.1080/00423114.2015.1055279
3. **Девятковский, Ф.А.** Оценка влияния скорости на криволинейное движение и разработка требований к механизмам поворота танка. дисс. ... канд. техн. наук / Ф.А. Девятковский. – М.: ВА БТВ. 1978. – 131 с.
4. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение. 1967. – 356 с.
5. **Чобиток, В.А.** Теория движения танков и БМП / В.А. Чобиток. – М.: Воениздат, 1984. – 264 с.
6. **Бекетов С.А.** Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. – 125 с.
7. **Наумов, В.Н.** Алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, А.А. Пехтерев, В.И. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1(186). С. 29-42.
8. **Котиев, Г.О.** Разработка высокоподвижных бронированных колесных и гусеничных машин нового поколения / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3(15). С. 30.
9. **Котиев, Г.О.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // В кн.: Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники. 2016. С. 76-86.
10. **Горелов, В.А.** Регулятор системы управления поворотом быстроходной гусеничной машины с индивидуальным приводом ведущих колес / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадучин // Известия МГТУ «МАМИ». 2019. Вып. №4 (42). С. 21-28.

*Дата поступления
в редакцию: 11.03.2022*

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_127

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАМУ В ЗАДАННЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И.В. ЧичекинORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: chichekin_iv@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**Я.Ю. Левенков**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**Г.А. Арутюнян**ORCID: 0000-0001-5068-8550 e-mail: georgy.arut@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**Ф.А. Нырков**ORCID: 0000-0003-3431-8116 e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**О.И. Чудаков**ORCID: 0000-0001-8788-7123 e-mail: chudakov@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала для получения нагрузок, действующих на раму, подвеску и другие элементы колесной машины. Приведен список типовых нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок и моделирования основных эксплуатационных режимов движения. Разработка математической модели карьерного самосвала для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, связанных с рамой для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности, актуальна на ранних стадиях проектирования. Показаны примеры расчетов, даны рекомендации и примеры использования математической модели, разработанной в системе расчета динамики связанных тел (*Multi Body Dynamics – MBD*).

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, динамика твердых тел, виртуальный прототип, долговечность, прочностной расчет, метод конечных элементов, нагрузки, подвеска, нагрузочные режимы, режимы эксплуатации.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чичекин, И.В. Разработка математической динамической модели карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на раму в заданных режимах эксплуатации / И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, Г.А. Арутюнян, Ф.А. Нырков, О.И. Чудаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 127-137. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_127

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL DYNAMIC MODEL OF AN OPEN-PIT DUMP TRUCK FOR DETERMINATION OF LOADS ACTING ON FRAME IN SPECIFIED OPERATING MODES

I.V. Chichekin

ORCID: **0000-0001-7632-7657** e-mail: **chichekin_iv@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Y.Y. Levenkov

ORCID: **0000-0001-6556-3232** e-mail: **levenkov_yy@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

G.A. Arutunyan

ORCID: **0000-0001-5068-8550** e-mail: **georgy.arut@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

F.A. Nyrkov

ORCID: **0000-0003-3431-8116** e-mail: **nfa18m127@student.bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

O.I. Chudakov

ORCID: **0000-0001-8788-7123** e-mail: **chudakov@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. Mathematical model of dynamics of an open-pit dump truck for obtaining of loads acting on frame, suspension elements and other elements of a wheeled vehicle, is presented. List of typical load modes for determination of maximum loads and modeling of the main operational driving modes, is given. Examples of calculations performed are shown, and recommendations and examples of use of the developed mathematical model are given. Development of mathematical model of an open-pit dump truck for determination of loads in articulation joints and power connections associated with the frame for subsequent strength calculations and durability analysis is an urgent task at the early stages of design. Mathematical model is developed in the connected bodies dynamics calculation system (*Multi Body Dynamics – MBD*).

Key words: open-pit dump truck, dynamics of solids, virtual prototype, durability, strength calculation, finite element method, loads, suspension, load modes, operating modes.

FOR CITATION: Chichekin I.V., Levenkov Y.Y., Arutunyan G.A., Nyrkov F.A., Chudakov O.I. Development of mathematical dynamic model of an open-pit dump truck for determination of loads acting on frame in specified operating modes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 127-137. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_127

Введение

Транспортировка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах как в нашей стране, так и за рубежом производится, в основном, автомобильным транспортом. Повышения эффективности его использования можно достичь за счет повышения грузоподъемности, снижения снаряженной массы и увеличения долговечности основных элементов карьерного самосвала [1-3]. Для карьерных автосамосвалов важно минимизировать массу рамы при заданном уровне жесткости и прочности, поскольку это влияет на массу перевозимого груза, себестоимость перевозок и прибыль. Готовых методов расчета, учитывающих все многообразие

нагрузочных режимов, в которых эксплуатируются карьерные самосвалы, в настоящее время не существует. Их разработка возможна с использованием компьютерного моделирования. Для проектирования рамы, получения нагрузок в шарнирах и силовых связях, соединяющих раму с другими элементами на ранней стадии проектирования, сейчас используются математические модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики связанных тел (MBD) [4-7]. Используемый подход позволяет автоматизированно получить нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования. Они могут быть легко импортированы в приложения по проведению прочностных расчетов методом конечных элементов.

Целью работы является математическая модель карьерного самосвала для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, связанных с рамой для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности.

Для достижения цели разработана и представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала, выбраны типовые нагрузочные режимы движения. Проведены расчеты в среде моделирования динамики связанных тел в выбранных нагрузочных режимах. Представлены примеры результатов расчета.

Описание динамической модели карьерного автосамосвала

Общий вид динамической модели карьерного автосамосвала, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1. Математическая модель автосамосвала (рис. 2) включает в себя батареи, груз, грузовую платформу (грузонесущую емкость), задний мост с подвеской, кабину, колеса, раму (раму), опорную поверхность (дорогу), передний мост с подвеской и рулевым управлением, ТЭД привода ведущих колес.

Допущения при построении модели:

- все звенья динамической системы абсолютно жесткие;
- трение в шарнирах отсутствует;
- груз смоделирован абсолютно жестким единым телом, жестко связанным с грузонесущей емкостью;
- деформация колес учтена в модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, силы на колесо приложены в центре.

Математические модели, созданные в приложениях по расчету динамики твердых тел, позволяют определять нагрузки в шарнирах для последующих прочностных расчетов [7, 8] и для расчета долговечности деталей [9, 10], подбирать компоненты колесной машины. В настоящей работе рассматривается определение только максимальных нагрузок.

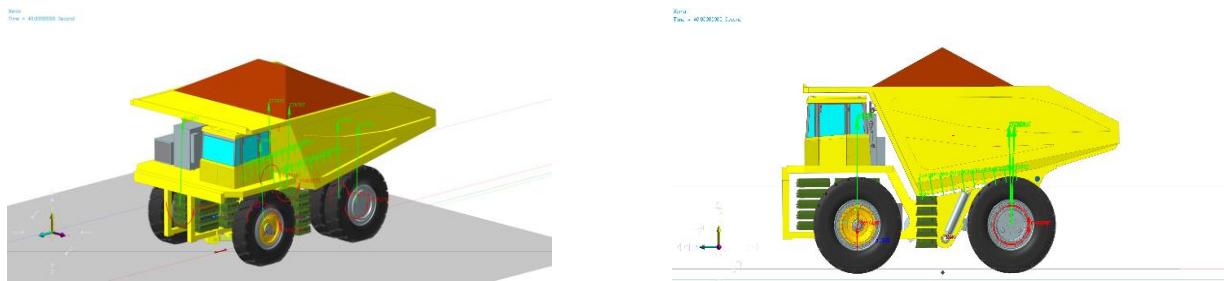


Рис. 1. Общий вид модели карьерного автосамосвала в статическом положении при полной массе на горизонтальной опорной поверхности

Fig. 1. General view of the model of a mining dump truck in a static position with a full weight on a horizontal surface

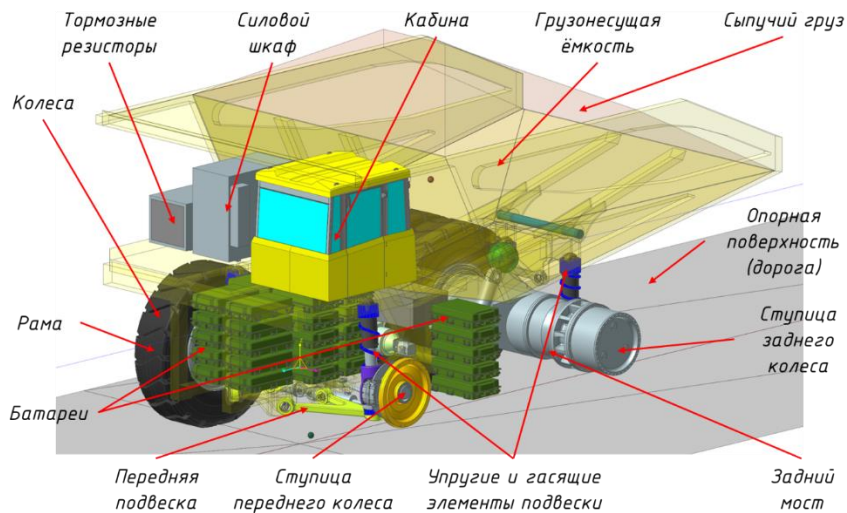


Рис. 2. Компоненты математической модели карьерного автосамосвала

Fig. 2. Components of the mathematical model of a mining dump truck

Геометрия передней подвески и рулевого управления импортирована из CAD геометрии переднего моста. Общий вид модели переднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала показан на рис. 3. Звенья подвески связаны между собой жесткими шаровыми шарнирами (Spherical), ступичные подшипники и подшипник поворота тележки смоделированы шарнирами вращения (Revolute).

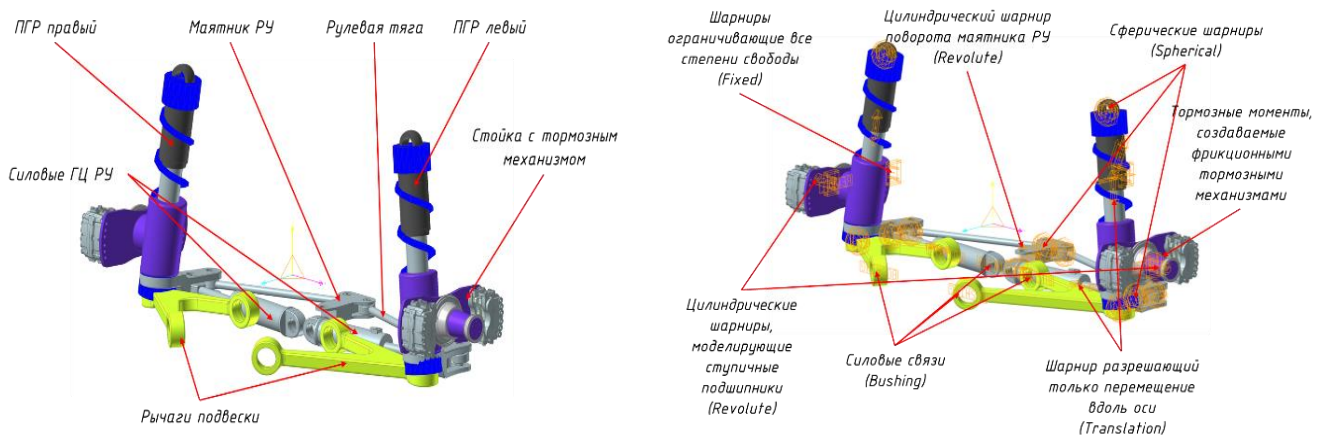


Рис. 3. Общий вид модели переднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала

Fig. 3. General view of the front axle model with the layout of hinges and power connections in the mining dump truck model

Модель рулевого управления включает маятник рулевого управления соединенных шарниров Revolute с рамой, двух рулевых тяг и силовых гидроцилиндров (рис. 3). Угол поворота маятника ограничивается так, чтобы углы поворота управляемых колес не превышали 29° и 41° для наружного и внутреннего управляемых колес соответственно.

Упругий и гасящий элементы передней и задней подвесок заданы силовым соединением типа «Пружина» в программном комплексе по расчету динамики твердых тел (рис. 4). Усилие, развиваемое силовым соединением типа «Пружина» – упругий элемент с демпфером в зависимости от ее деформации и скорости сжатия, вычисляется по формуле:

$$F_s = -K \cdot (l - l_f)^m - C \cdot \dot{l}^n + F$$

Stiffness Coefficient	<i>K</i>	Коэффициент жесткости пружины
Damping Coefficient	<i>C</i>	Коэффициент демпфирования
Stiffness Exponent	<i>m</i>	Показатель степени, изменения деформации пружины
Damping Exponent	<i>n</i>	Показатель степени, изменения скорости деформации пружины
Free Length	<i>l_f</i>	Свободна длина пружины
Current Length	<i>l</i>	Текущая длина пружины. Определяется как расстояние между двумя маркерами определяющих положение пружины
Pre Load	<i>F</i>	Предварительная сила, развиваемая пружиной в начальный момент времени моделирования

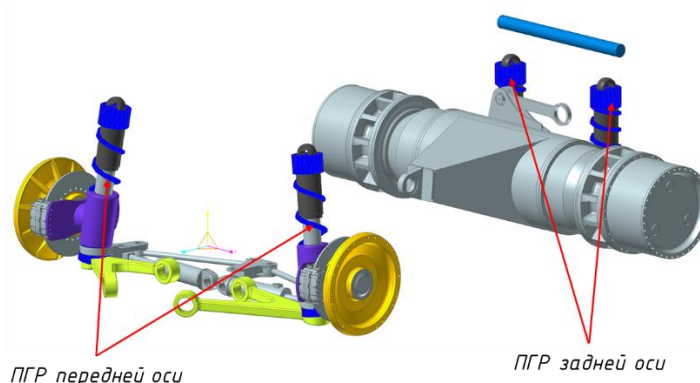


Рис. 4. Размещение упругих элементов подвески

Fig. 4. Placement of elastic suspension elements

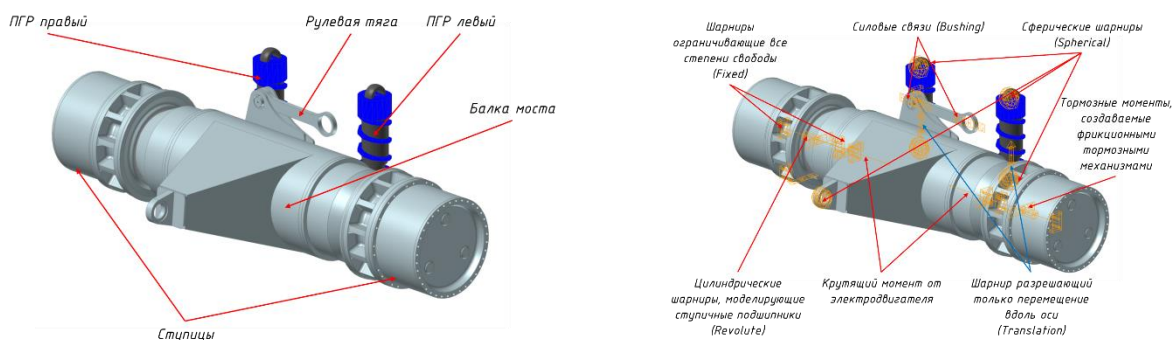


Рис. 5. Общий вид модели заднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала

Fig. 5. General view of the rear axle model with the layout of hinges and force connections in the model of a mining truck

Геометрия задней подвески импортирована из CAD геометрии заднего моста самосвала. Общий вид модели заднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала показан на рис. 5. Звенья подвески связаны между собой жесткими шаровыми шарнирами (Spherical), ступичные подшипники и подшипник поворота тележки смоделированы шарнирами вращения (Revolute) (рис. 5). При моделировании используется стандартная модель взаимодействия шины с опорной поверхностью из библиотеки приложения по расчету динамики твердых тел [11-13]. Общий вид модели колесного движителя представлен на рис. 6. Принята следующая нумерация звеньев, шарниров и силовых соединений: элементы, относящиеся к левому переднему движителю, имеют индекс «11», элементы, относящиеся к правому

переднему движителю, имеют индекс «12», элементы, относящиеся к левому заднему движителю, имеют индекс «21», элементы, относящиеся к правому заднему движителю, имеют индекс «22». Колеса задней оси двухскатные. Наружные колеса имеют приставку «*out*», внутренние – «*in*». Шины размерностью 27.00R49, номинальной грузоподъемностью 534462 Н при давлении воздуха в шине 7 атм. Масса одного колеса в сборе составляет 2 000 кг.

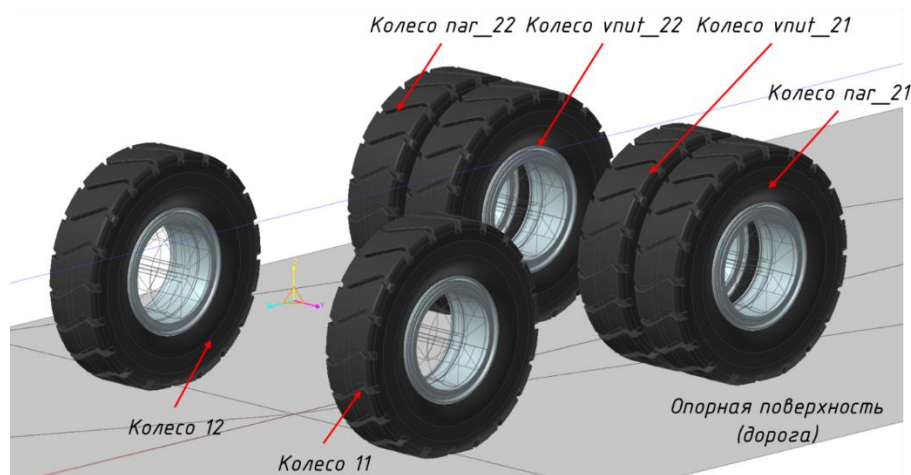


Рис. 6. Модели колесного движителя

Fig. 6. Wheel mover models

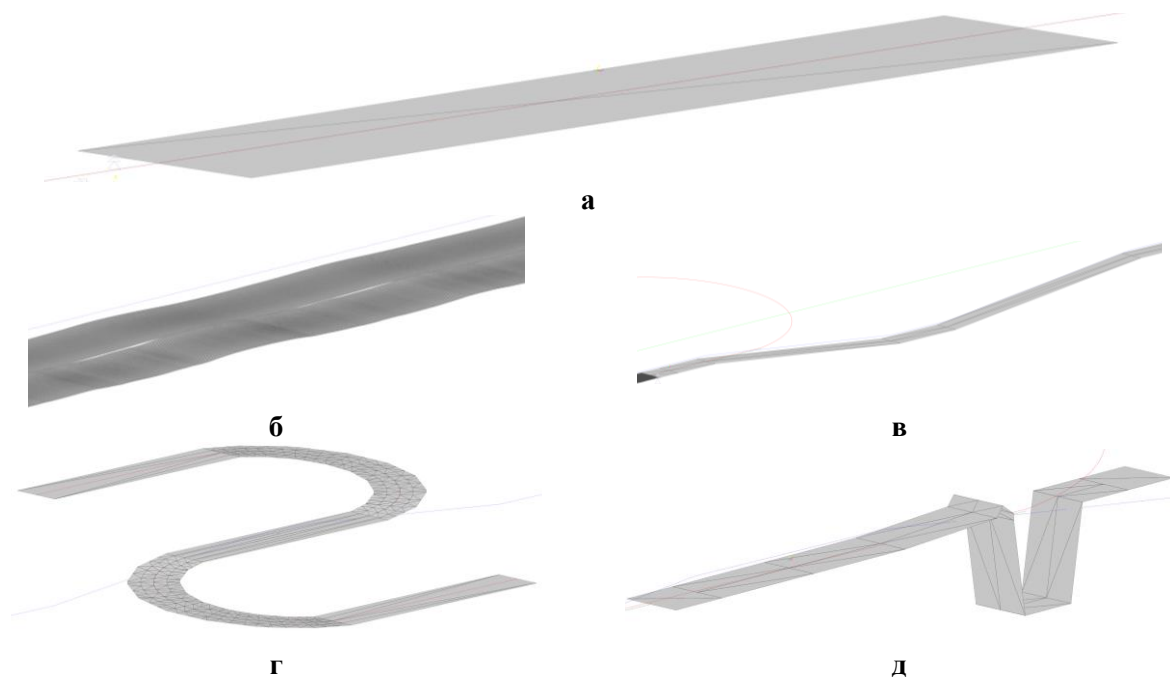


Рис. 7. Общий вид моделей опорных поверхностей:

а – ровная горизонтальная; *б* – неровная; *в* – трасса для моделирования спусков и подъемов;
г – трасса для моделирования спусков и подъемов при повороте;
д – для моделирования упора колес при разгрузке

Fig. 7. General view of models of supporting surfaces:

a – smooth horizontal; *b* – not even; *c* – track for modeling descents and ascents;
d – track for modeling descents and ascents when turning;
e – to simulate the stop of the wheels during unloading



Рис. 8. Иллюстрации примеров моделирования нагрузочных режимов:

a – статика без груза; б – статика с грузом; в – переезд ramпы 10 % с грузом – движение на спуске; г – переезд ramпы 10 % с грузом – движение на подъеме; д – косогор 5 %; е – криволинейное движение; ж – разгон; з – торможение; и – торможение на спуске; к – буксировка вперед без груза на подъеме; л – спуск с поворотом вперед; м – движение по неровной опорной поверхности

Fig. 8. Illustrations of examples of simulation of load modes:

a – static without load; b – static with a load; c – ramp crossing 10 % with a load – movement on the descent; d – ramp crossing 10 % with a load-movement on the rise; e – slope 5 %; e - curvilinear movement; g – acceleration; h – braking; and – braking on the descent; k – towing forward without load on the rise; l – descent with a turn forward; m – movement on an uneven supporting surface

В конструкцию колес переднего моста добавлены вставки. Они смоделированы отдельными телами, жестко связанными с передними колесами шарнирами Fixed. Такое решение поз-

волило использовать одну математическую модель колеса с одинаковыми колесами для передней и задней осей. Моделирование нагрузочных режимов карьерного самосвала производилось на различных ОП. Модель ОП описывалась в подключаемых файлах, коэффициент сцепления задавался равным 0.5. Общий вид основных моделей ОП, использованных при моделировании, представлен на рис. 7.

Описание расчетных случаев

Проведен анализ условий эксплуатации карьерных автосамосвалов при добыче полезных ископаемых и перевозки горной породы; список расчетных случаев представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Список расчетных режимов для определения нагрузок в шарнирах рамы карьерного автосамосвала

Table 1.

List of design modes for determining loads in the frame hinges of a mining dump truck

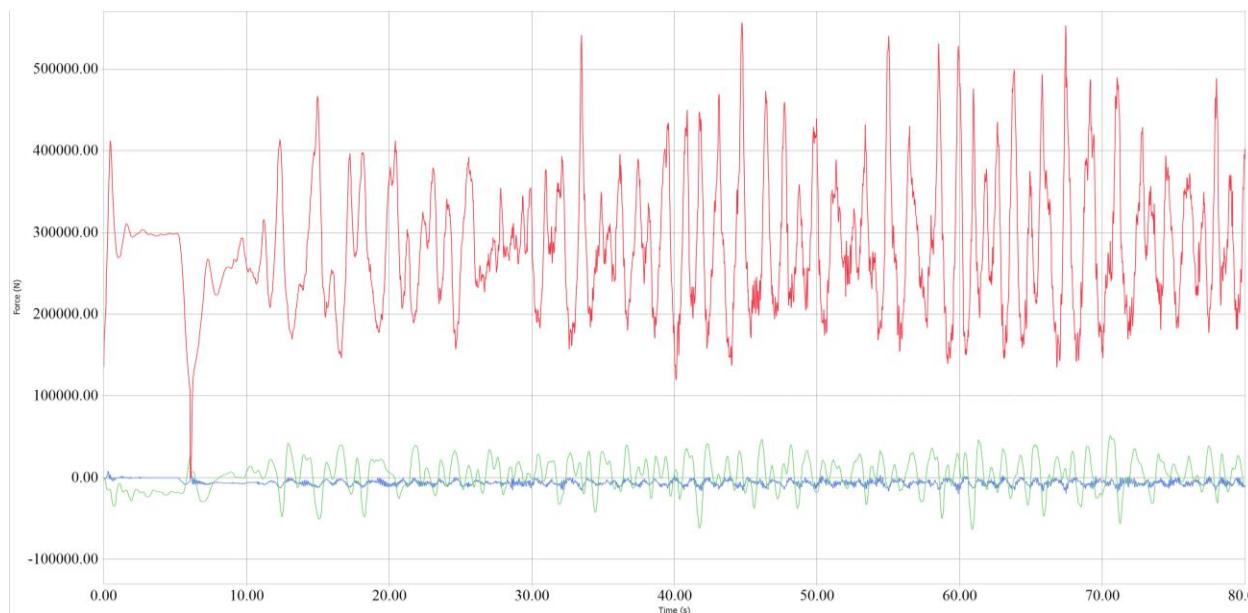
№	Название
01	Статика без груза
02	Статика с грузом
03	Переезд рампы 10 % с грузом
04	Переезд рампы 10 % без груза
05	Косогор 5 %
06	Разгон – торможение с грузом вперед
07	Разгон – торможение с грузом назад
08	Разгон – торможение без груза вперед
09	Разгон – торможение без груза назад
10	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота с грузом вперед
11	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота без груза вперед
12	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота с грузом назад
13	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота без груза назад
14	Поворот на месте управляемых колес
15	Проезд заданного коридора
16	Торможение на спуске с грузом
17	Торможение на спуске без груза
18	Упор колес при разгрузке
19	Буксировка вперед без груза
20	Буксировка назад без груза
21	Подъем с поворотом вперед
22	Спуск с поворотом вперед
23	Движение по неровному ОП

Описание результатов моделирования

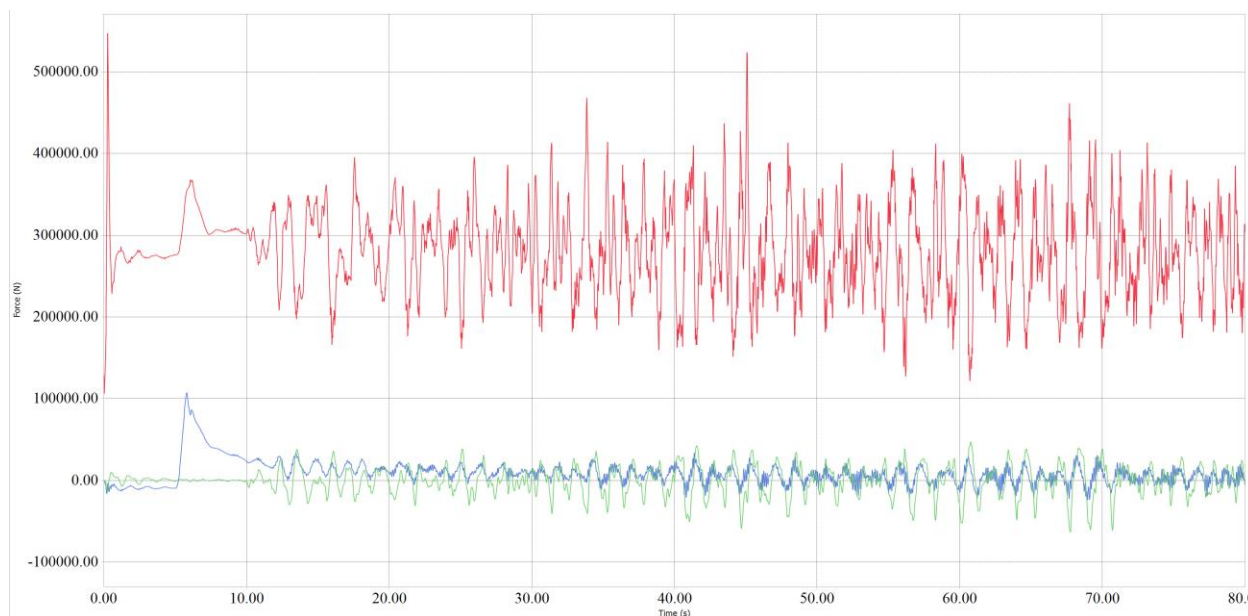
В результате проведенного моделирования получены усилия во всех нагрузочных режимах в шарнирах и силовых связях карьерного автосамосвала. Примеры иллюстраций по некоторым нагрузочным режимам представлены на рис. 8. Получены реакции в пятне контакта в любой момент времени для каждого нагрузочного режима. Например, для нагрузочного режима движение по неровной ОП (рис. 8, м) представлено изменение реакций во время моделирования для переднего левого и заднего левого наружного колеса (рис. 9). Также в процессе моделирования в шарнирах и силовых связях динамической модели карьерного автосамосвала получены силы и моменты. Полученные значения были экспортированы и использовались для последующих прочностных расчетов МКЭ. Нагрузки выписывались относительно маркера центра масс

(CM Marker, рис. 10). Направления систем координат в точках приложения нагрузок показаны на рис. 10. Для рассматриваемой работы нагрузки получены в 55 точках.

Также с помощью разработанной динамической модели производилась оценка работоспособности рулевого управления. Для этого был задан коридор [14] и опорная траектория, вдоль которой должен был двигаться исследуемый карьерный автосамосвал.



a



б

Рис. 9. Изменение реакций в пятне контакта колес карьерного автосамосвала при движении по неровной опорной поверхности:
a – переднее левое колесо; б – заднее левое наружное колесо

Fig. 9. Change in reactions in the contact patch of the wheels of a mining dump truck when driving on an uneven supporting surface:
a – front left wheel; b – rear left outer wheel

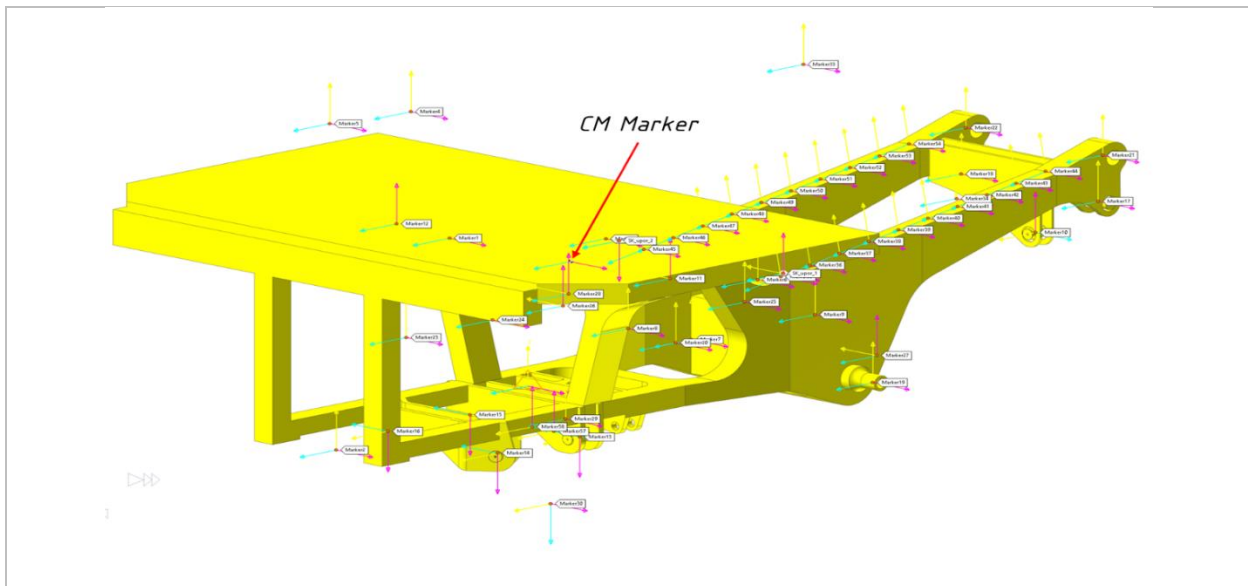


Рис. 10. Схема размещения и название маркеров систем координат шарниров соединения рамы карьерного самосвала

Fig. 10. Layout scheme and the name of the markers of the coordinate systems of the hinges of the mining dump truck frame connection

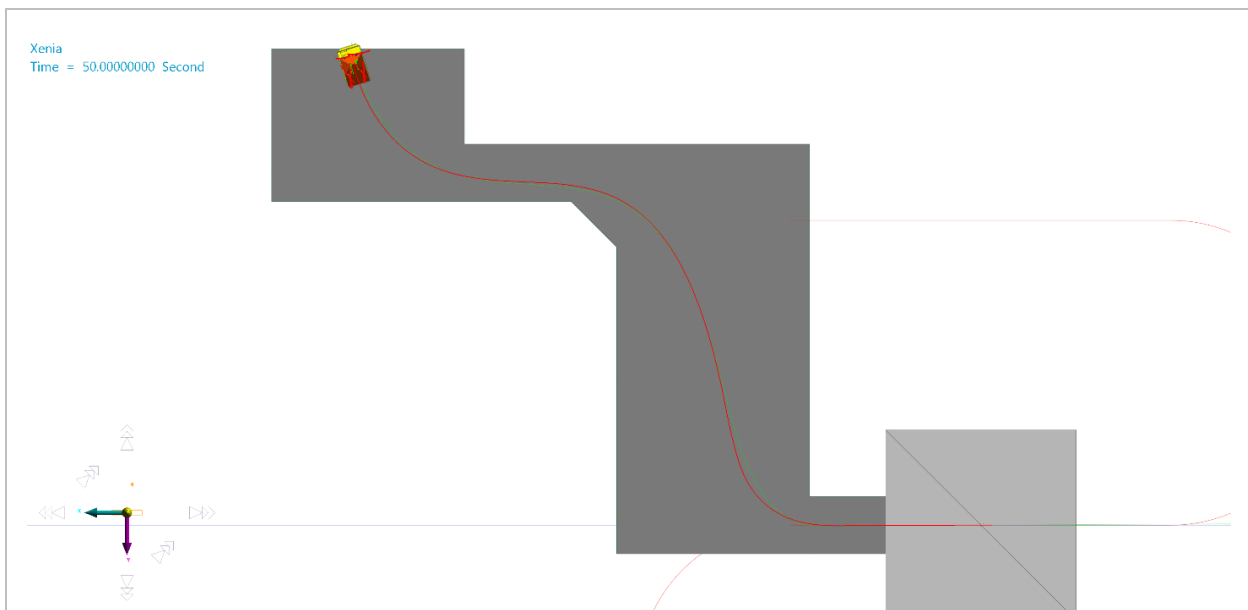


Рис. 11. Общий вид модели коридора

Fig. 11. General view of the corridor model

Выводы

Представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала для получения нагрузок, действующих на раму, элементы подвески и другие элементы колесной машины. Анализ условий эксплуатации автосамосвалов позволил сформировать список нагрузочных режимов, в которых не только определяются максимальные нагрузки, но и анализируются эксплуатационные свойства, проводится анализ работы систем подрессоривания и рулевого управления.

Разработанная модель динамики автосамосвала универсальна, она позволяет не только определять нагрузки в шарнирах и силовых связях, но и исследовать кинематику подвески и механизма поворота, работу гидроцилиндров механизма опрокидывания грузонесущей емкости, проводить анализ эксплуатационных свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2020-031 от 14.12.2020 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства семейства роботизированных карьерных самосвалов грузоподъемностью до 90 т с электромеханической трансмиссией на основе цифровых технологий», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Библиографический список

1. **Боровков, Ю.А.** Основы горного дела: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.А. Боровков, В.П. Дробаденко, Д.Н. Ребриков. – М.: Издательский центр «Академия»; «Академия-Медиа», 2012. – 432 с.
2. **Кольга, А.Д.** Повышение эффективности и расширение области применения автомобильного транспорта на карьерах / А.Д. Кольга, С.Е. Гавришев // Добыча, обработка и применение природного камня: Сб. науч. тр. Вып. 3. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 179-191.
3. **Андреев, Л.И.** Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / Л.И. Андреев, Ю.Ю. Ушаков // Известия УГГУ. 2016. № 3(43). С. 74-77.
4. **Vdovin D.S.** Quad bike frame dynamic load evaluation using full vehicle simulation model. Vdovin D., Chichekin I., Ryakhovsky O. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012025.
5. **Vdovin D.S., Chichekin I.V., Levenkov Y.Y., Shabolin M.L.** Automation of wheeled vehicles load bearing frames finite-element models loading procedure by using inertia relief method and vehicle multi-body dynamics model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 534. № 1. С. 012024.
6. **Gorelov V.A., Komissarov A.I.** Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction. Procedia Engineering. – 2016. Vol. 150. Pp. 1322-1328.
7. **Вдовин, Д.С.** Виртуальный стенд для определения нагрузок на рулевое управление автомобиля / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Т.Д. Поздняков // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68). С. 3.
8. **Vdovin D., Chichekin I.** Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process. Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 1276-1279.
9. **Вдовин, Д.С.** Нагружение конечно-элементных моделей рамколесных машин с применением метода inertia relief и твердотельной динамической модели автомобиля / Д.С. Вдовин, Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин // В сб.: Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем. 2018. С. 620-640.
10. **Вдовин, Д.С.** Прогнозирование усталостной долговечности элементов подвески полуприцепа на ранних стадиях проектирования / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков // Труды НАМИ. 2019. № 2 (277). С. 14-23.
11. **Рачејка Н.В.** Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford, Butterworth Heinemann, 2006. 672 p.
12. **Рачејка Н.В., Besselink I.Y.** Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. Supplement to Vehicle System Dynamics, 1997, vol. 27, pp. 234-249.
13. **TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual.** – Netherlands, 2008.
14. **ГОСТ ISO 5010:2011 Машины землеройные.** Системы рулевого управления колесных машин.

*Дата поступления
в редакцию: 28.12.2021*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Жевнерчук Дмитрий Валерьевич – заведующий кафедрой «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, доцент

Захаров Александр Сергеевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Кривошеев Олег Викторович – заместитель директора Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» по технологиям полного жизненного цикла, директор института цифровых технологий – главный конструктор систем полного жизненного цикла

Мухин Алексей Валерьевич – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Никулин Евгений Александрович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Прилуцкий Михаил Хаимович – главный научный сотрудник Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» по технологиям полного жизненного цикла, д-р техн. наук, профессор

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Головко Владислав Федорович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Дмитриева Ирина Васильевна – ведущий инженер подразделения 77 бюро теплогидравлических расчетов ОКБМ им. И.И. Африкантова

Козловский Михаил Николаевич – инженер-физик отдела разработки математического обеспечения ООО «Инновационная фирма СНИИП АТОМ»

Поваров Владимир Петрович – заместитель Генерального директора – директор филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», д-р техн. наук

Поваров Петр Владимирович – начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

Рязанов Антон Владимирович – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Тихонов Александр Игоревич – начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

Тучков Максим Юрьевич – старший начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Аникин Алексей Александрович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Арутюнян Георгий Артурович – старший преподаватель Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Беляков Владимир Викторович – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

Горожанкин Сергей Андреевич – профессор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, д-р техн. наук, профессор

Кравец Владислав Николаевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Кулепов Виктор Федорович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Левенков Ярослав Юрьевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Литарович Вероника Витальевна – младший научный сотрудник ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», канд. техн. наук, доцент

Макаров Владимир Сергеевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Мокрецов Николай Александрович – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;

Мусарский Роман Абрамович – главный научный сотрудник НИЛ ТИС НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Наумов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Нырков Филипп Алексеевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Орлов Лев Николаевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Папунин Алексей Валерьевич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Савенков Никита Владимирович – доцент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, канд. техн. наук

Савченко Владимир Владимирович – начальник НИЦ «Бортовые системы управления мобильных машин» ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», канд. техн. наук, доцент

Стадухин Антон Алексеевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;

Тумасов Антон Владимирович – директор Института транспортных систем НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

Холоденко Вячеслав Борисович – ассистент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;

Чичекин Илья Викторович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Чудаков Олег Игоревич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

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:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Владимир Сергеевич Макаров: **vladimir.makarov@nntu.ru**

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 2 (137)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 14.06.2022. Дата выхода в свет 27.06.2022. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 7,50. 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