

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

ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 1 (148)

Нижний Новгород 2025

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 1 (148). – 116 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, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, Ю.И. Молев, 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, управление и системный анализ»

М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Ядерная энергетика и атомное машиностроение»

Ю.И. Молев – ответственный секретарь рубрики

«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)

А.В. Крылова (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Сергей Михайлович Дмитриев

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада

Палкович Ласло

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Варлаки Петер

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Виджай Кумар Чакка

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

Ялчинер Ахмет

д., проф., METU, директор OERC, Турция

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603155, 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, 2025

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

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

Published since 2010

№ 1 (148)

Nizhny Novgorod 2025

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.S. Makarov, V.R. Milov, Yu.I. Molev, V.N. Naumov, P.V. Pakshin, N.A. Pribaturin, N.V. Starostin, A.S. Surkova, N.Yu. Zolotikh

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section « Computer science, management and system analysis »

M.A. Legchanov – Executive Secretary of the Section « Nuclear power and atomic power engineering »

Yu.I. Molev – 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)

EDITOR AND PUBLISHER:

federal state budgetary educational institution of higher education
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*The certificate on registration of periodic printed editions:
III № ΦC 77-56417 11.12.2013*

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

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Афраймович Л.Г., Куликов М.С., Кумагина Е.А., Прилуцкий М.Х., Старостин Н.В. Разработка и реализация программных средств регрессионного тестирования алгоритмов при решении задач производственного планирования	7
Ван С., Елисеев В.Л. Динамическая модель и метод обнаружения однофазного провала напряжения на основе автокорреляционной функции и нейросетевого автокодировщика	15
Киященко В.В. Методы морфологического анализа изображений для выявления дефектов на покрытиях	26
Чернышов А.В. Практические аспекты применения метода условного экстремума фазовой скорости в анализе движения транспортного средства в потоке	37
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	50
Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Светоносов А.И., Чинак А.В. Тестирование многопетлевого контура в режиме естественной циркуляции свинцово-висмутowego теплоносителя	50
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	59
Бережнов М.К., Жилейкин М.М. Анализ рисков возникновения потери устойчивости транспортного средства при колебательном процессе воздействия на рулевое управление ...	59
Бузунов Н.В., Муравьев А.С., Пирожков Р.Д. Разработка алгоритмов управления гидростатической трансмиссией с использованием имитационной модели реального времени	66
Климов А.В. Влияние закона управления на колебательные процессы в электромеханическом приводе	79
Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Наумов В.Н. Исследование факторов, определяющих выбор типа и грузоподъемности лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин	87
Мавлонов М.Х., Четвериков М.В. Метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы	104
НАШИ АВТОРЫ	111

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Afraimovich L.G., Kulikov M.S., Kumagina E.A., Prilutskii M.Kh., Starostin N.V. Development and implementation of software tools for regression testing of algorithms in solving production planning problems	7
Wang X., Eliseev V.L. Dynamic model and method of detecting a single-phase voltage dip based on autocorrelation function and neural network autoencoder	15
Kiyashchenko V.V. Image morphological analysis methods for detecting defects in coatings	26
Chernyshov A.V. Practical uses of method of phase velocity conditional extremum in analysis of vehicle movement in traffic flow	37
 NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	 50
Pribaturin N.A., Lobanov P.D., Kurdyumov A.S., Svetonosov A.I., Chinak A.V. Testing of multi-loop circuit in natural circulation mode of lead-bismuth coolant	50
 MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 59
Berezhnov M.K., Zhileykin M.M. Analysis of risks of loss of vehicle stability during oscillatory process of impact on steering control	59
Buzunov N.V., Muravyev A.S., Pirozhkov R.D. Hydrostatic transmission control algorithms development using real-time simulation model	66
Klimov A.V. The influence of control law on oscillatory processes in electromechanical drive	79
Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Naumov V.N. Study of factors determining the choice of type and load capacity of logging loading and transport vehicles	87
Mavlonov M.K., Chetverikov M.V. Method for determining the stiffness of arbitrary-shaped anti-roll bar	104
 AUTHORS	 111

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.02

EDN: XMJEVB

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ РЕГРЕССИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Л.Г. Афраймович

ORCID: 0000-0002-7320-8086 e-mail: lev.afraimovich@itmm.unn.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

М.С. Куликов

ORCID: 0000-0002-4777-771X e-mail: vokil@mail.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

Е.А. Кумагина

ORCID: 0000-0002-5199-8814 e-mail: elena.kumagina@itmm.unn.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

М.Х. Прилуцкий

ORCID: 0000-0002-7694-3916 e-mail: pril@iani.unn.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

Н.В. Старостин

ORCID: 0000-0003-1415-7511 e-mail: nvstar@iani.unn.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

Разработан программный продукт, предназначенный для решения задач распределения производственных ресурсов при автоматизации процесса изготовления высокотехнологичных изделий, типичных для предприятий машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Рассматривается NP-трудная задача производственного планирования, при решении которой используются эвристические процедуры, использующие, в зависимости от специфики задачи, различные сценарии работы. В основе решающих алгоритмов, реализованных в программном продукте *СМАРТ-ресурс*, лежат авторские фронтальные алгоритмы, имеющие возможность за счет информации, получаемой с учетом реализованных обратных связей, использовать для решения задачи различные сценарии. Приведена математическая модель проблемы распределения производственных ресурсов, в рамках которой поставлена задача распределения производственных ресурсов по критерию минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий. Показана ее NP-трудность, приведены алгоритмы ее решения. Разработано и реализовано программное средство, позволяющее регрессионно тестировать и настраивать на целевые задачи внутренние параметры фронтальных алгоритмов с обратной связью при решении NP-трудных задач производственного планирования с использованием системы производственного планирования *СМАРТ-ресурс*.

Ключевые слова: NP-трудная задача, производственное планирование, распределение ресурсов, фронтальный алгоритм, алгоритм с рангами, программное средство, регрессионное тестирование алгоритма.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Афраймович, Л.Г. Разработка и реализация программных средств регрессионного тестирования алгоритмов при решении задач производственного планирования / Л.Г. Афраймович, М.С. Куликов, Е.А. Кумагина, М.Х. Прилутский, Н.В. Старостин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 7-14. EDN: XMJEVB

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF SOFTWARE TOOLS FOR REGRESSION TESTING OF ALGORITHMS IN SOLVING PRODUCTION PLANNING PROBLEMS

L.G. Afraimovich

ORCID: **0000-0002-7320-8086** e-mail: **lev.afraimovich@itmm.unn.ru**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Kulikov

ORCID: **0000-0002-4777-771X** e-mail: **vokil@mail.ru**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

E.A. Kumagina

ORCID: **0000-0002-5199-8814** e-mail: **elena.kumagina@itmm.unn.ru**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

M.Kh. Prilutskii

ORCID: **0000-0002-7694-3916** e-mail: **pril@iani.unn.ru**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

N.V. Starostin

ORCID: **0000-0003-1415-7511** e-mail: **nvstar@iani.unn.ru**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents a developed software for solving the problems of production resources distribution in the automation of the manufacturing high-tech products for enterprises of the mechanical engineering division of the State Corporation Rosatom. An NP-hard production planning problem is considered. Heuristic procedures with different work scenarios depending on the specifics of the problem are used to solve it. The decision algorithms implemented in the SMART-resource software are based on the author's frontal algorithms. It is possible to use various scenarios to solve the problem due to the information obtained taking into account the implemented feedbacks. A mathematical model of the problem of production resources distribution is presented, within the framework of which the task of production resources distribution according to the criterion of minimizing deviations from the specified directive deadlines for the production of planned products is set. Its NP-hardness is shown. Algorithms for its solution are given. A software tool has been developed and implemented that allows regression testing and tuning of internal parameters of frontal algorithms with feedback for target tasks when solving NP-hard production planning problems using the SMART-resource production planning system.

Key words: NP-hard problem, production planning, resource allocation, frontal algorithm, rank-based algorithm, software tool, regression testing of algorithm.

FOR CITATION: L.G. Afraimovich, M.S. Kulikov, E.A. Kumagina, M.Kh. Prilutskii, N.V. Starostin. Development and implementation of software tools for regression testing of algorithms in solving production planning problems. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 7-14. EDN: XMJEVB

Введение

Вопросы решения оптимизационных задач производственного планирования широко обсуждаются в современной научной литературе. Они относятся, как правило, к классу NP-трудных, что обуславливает применение эвристических процедур для их решения. В работах [1-5] обсуждаются вопросы применения гибридных алгоритмов и алгоритмов, основанных на методах машинного обучения. Для задач небольшой размерности предлагаются подходы, основанные на методах целочисленного линейного программирования [6, 7]. Значительный вклад внесли работы Нижегородской школы по вопросам распределения производственных ресурсов для высокотехнологичных предприятий [8-17]. В работах [15, 16] описана разработанная и программно реализованная система производственного планирования *SMART-ресурс*, предназначенная для решения задач распределения производственных ресурсов при автоматизации процесса изготовления высокотехнологичных изделий, свойственных предприятиям машиностроительного дивизиона ГК «Росатом».

В настоящей статье представлено разработанное и программно реализованное программное средство, позволяющее регрессионно тестировать и настраивать на целевые задачи внутренние параметры алгоритмов, реализованных в системе производственного планирования.

Содержательное описание объекта

Заданы множество операций, выполнение которых необходимо спланировать, и множество ресурсов предприятия. На множестве операций задано отношение предшествования (операция не может быть выполнена до тех пор, пока не будут выполнены все предшествующие). Данное отношение предшествования определяет технологический процесс (технологию) заказа. Для каждой из операций задана длительность выполнения и необходимый для выполнения ресурс. Каждая операция выполняется без прерывания. Каждый из ресурсов в каждый из тактов времени может использоваться не более чем одной операцией. Множество операций разбито на заказы, для каждого из которых заданы ранее время начала (время, раньше которого запрещено выполнение операций заказа) и директивный срок (время, к которому необходимо стремиться завершить выполнение операций заказа).

Необходимо составить производственный план (для каждой операции определить время начала выполнения), при котором будет минимизировано суммарное запаздывание заказов относительно их директивных сроков.

Математическая модель и постановка задачи

Исходные параметры математической модели:

$\{1, \dots, n\}$ – множество операций;

$\{1, \dots, m\}$ – множество ресурсов;

$\{1, \dots, k\}$ – множество заказов;

$\{1, \dots, T\}$ – множество тактов планирования;

V_l – множество операций заказа l , $l = \overline{1, k}$;

при этом $\bigcup_{i=1}^k V_i = \{1, \dots, n\}$, $V_{l'} \cap V_{l''} = \emptyset$, $l', l'' \in \{1, \dots, k\}$ и $l' \neq l''$;

$G_l = (V_l, A_l)$, $A_l \subseteq V_l^2$ – граф без петель и контуров, определяющий технологию заказа l , $l = \overline{1, k}$;

$t_i \in \mathbb{N}$ – длительность операции i , $i = \overline{1, n}$;

$r_i \in \{1, \dots, m\}$ – необходимый для выполнения операции i ресурс, $i = \overline{1, n}$;

t_l^p , t_l^d – ранее начало и директивный срок заказа l , $l = \overline{1, k}$.

Варьируемые параметры математической модели:

$x_i \in \{1, \dots, T\}$ – время начала выполнения операции i , $i = \overline{1, n}$.

Ограничения математической модели:

$$x_i \in \{1, \dots, T\}, i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$x_i \geq t_i^D, i \in V_l, l = \overline{1, k}, \quad (2)$$

$$x_{i'} + t_{i'} \leq x_i, i': (i', i) \in A_l, i \in V_l, l = \overline{1, k}, \quad (3)$$

$$|\{i | r_i = j, x_i \leq t \leq x_i + t_i\}| \leq 1, t = \overline{1, T}, j = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Постановка задачи:

$$\sum_{i=1}^k \max(0, \max_{i \in V_l} (x_i + t_i - t_i^A)) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Поставленная задача производственного планирования относится к классу NP-трудных задач, поскольку к ней за полиномиальное время сводится задача о камнях.

Общая структура алгоритма

Для удобства обозначим:

- $l(i)$ – номер заказа, содержащего операцию i , т.е. $l(i) \in \{1, \dots, k\}$, что $i \in V_{l(i)}, i = \overline{1, n}$;
- $p(i)$ – множество операций, непосредственно предшествующих операции i , т.е. $p(i) = \{i' | (i', i) \in A_{l(i)}\}, i = \overline{1, n}$.

Общая структура фронтального алгоритма [8, 9]

Шаг 1. $x_i := 0, i = \overline{1, n}, t := 1. \rightarrow$ Шаг 2.

Шаг 2. $F(t) := \{i |$

$x_i = 0$ и

$t \geq t_{l(i)}^H$ и

$x_{i'} > 0, i' \in p(i)$ и

$|\{i' | i' \in \{1, \dots, n\}, x_{i'} > 0, x_{i'} \leq t \leq x_{i'} + t_{i'}, r_i = r_{i'}\}| = 0\}.$

$\rightarrow$ Шаг 3.

Шаг 3. Для каждой операции $i \in F(t)$ выполнить:

{

Если $|\{i' | i' \in \{1, \dots, n\}, x_{i'} > 0, x_{i'} \leq t \leq x_{i'} + t_{i'}, r_i = r_{i'}\}| = 0,$

то $x_i := t.$

}

$\rightarrow$ Шаг 4.

Шаг 4. $t := t + 1.$

Если $t \leq T$ или $\exists i: x_i = 0$, то $\rightarrow$ Шаг 2, иначе завершить.

Комментарии:

- на шаге 1 происходит инициализация переменных;
- на шаге 2 строится фронт операций $F(t)$, т.е. множество операций, удовлетворяющих условиям:
 - операция в данный момент не запланированы (условие $x_i = 0$),
 - текущий такт времени t больше или равен раннего времени начала заказа операции (условие $t \geq t_{l(i)}^H$),

- все предшествующие операции уже запланированы (условие $x_{i'} > 0, i' \in p(i)$),
- необходимый для операции ресурс в текущий такт времени t свободен (условие $|\{i' | i' \in \{1, \dots, n\}, x_{i'} > 0, x_{i'} \leq t \leq x_{i'} + t_{i'}, r_i = r_{i'}\}| = 0$);

• на шаге 3 по очереди назначаются на выполнение операции, для которых необходимый ресурс свободен на текущем такте времени t (данное условие дублирует условие на шаге 2, так как операции текущего фронта могут занять данный ресурс);

• на шаге 4 происходит переход к следующему такту планирования, и проверяется условие останова.

Предложенный фронтальный алгоритм представляет собой эвристический алгоритм решения задачи планирования.

Стратегии сортировки фронта

С целью повышения качества работы фронтального алгоритма могут быть использованы различные стратегии сортировки. Таким образом, на шаге 2 фронтального алгоритма фронт представляется в виде $F(t) = \{i_1^t, \dots, i_{n_t}^t\}$, и операции фронта выбираются в соответствующем порядке. В качестве стратегии может быть рассмотрена, например, сортировка по директивному сроку соответствующего заказа: $t_{i(i_s)}^A \leq t_{i(i_{s+1})}^A, s = \overline{1, n_t - 1}$. Возможна сортировка по незавершенному объему работ заказа, доле незавершенного объема работ от общего объема работ заказа, оценкам резервов времени и т.д.

Итерационный фронтальный алгоритм

Фронтальный алгоритм может вызываться итерационно, определяя рекорд среди решений итераций фронтального алгоритма. В данном случае стратегия сортировки должна быть вариативной (меняться на различных итерациях запуска фронтального алгоритма). Пример такой вариативной стратегии – рандомистическая сортировка, оценка «важности» заказа с точки зрения его нарушений директивных сроков, которые вычисляются, исходя из решений предыдущих итераций [10].

Оптимизация фронтального алгоритма

Предложенная структура фронтального алгоритма обладает экспоненциальной трудоемкостью, поскольку число вызовов шага 2 составляет $O(T)$. С целью построения полиномиального по сложности алгоритма необходимо на шаге 4 итерировать не каждый такт времени, а только такты, соответствующие событиям, где событиями являются ранние времена начала партий, момента завершения операций (данные события формируются динамически при назначении новых операций). При таком подходе число вызовов шага 2 будет составлять $O(n) + O(k)$.

Регрессионное тестирование алгоритмов решения задач производственного планирования

Разработанная система регрессионного тестирования [17] позволяет запускать фронтальный алгоритм на наборе тестовых задач и оценивать показатели качества работы алгоритмы с точки зрения целевых показателей. Система позволяет решать две основные задачи: отслеживать прогресс при модификациях алгоритма и оптимизировать гиперпараметры алгоритма.

Характеристика разработанного программного обеспечения

Программное обеспечение реализовано на языке *Java* и предназначено для выполнения в операционных системах *Windows* и *Linux* с установленной *Java* машиной *openjdk 12* и

выше. При реализации графического интерфейса пользователя применялся инструментальный *JAVA Swing*.

Вычислительный эксперимент

В данном разделе представлены результаты вычислительного эксперимента по сравнению результатов расчета с использованием различных настроек алгоритма на задаче размерности более 500 тыс. операций, предназначенных для выполнения более 28 тыс. составных частей. В силу размерности ручной анализ результатов расчета при различных настройках для таких задач затруднен, однако анализ может быть оперативно проведен благодаря разработанному ПО.

В табл. 1 представлены характеристики рассматриваемой задачи, в табл. 2 – настройки алгоритмов, применяемых для ее решения, количественные характеристики результатов решения, полученные при помощи разработанного ПО и предназначенные для последующего анализа.

Таблица 1.
Характеристики задачи

Table 1.
Task characteristics

Характеристика	Значение
Начало интервала планирования	01.01.2025
Конец интервала планирования	01.01.2125
Количество заказов	6
Общее количество партий (заказы, изделия, составные части изделий)	28 586
Минимальная трудоемкость партии	9 ч 15 м 0 с
Максимальная трудоемкость партии	5 дней 1 ч 45 м 0 с
Количество партий с директивными сроками	28 586
Количество различных приоритетов партий	2
Средняя глубина вложенности изделий	5
Среднее количество вложенных изделий	6
Количество операций	500 005
Суммарная длительность операций	45568 дней 13 ч 15 м 0 с
Средняя длительность операции	2 ч 11 м 14 с
Медианная длительность операции	1 ч. 30 м 0 с
Число групп взаимозаменяемых ресурсов верхнего уровня	25
Число атомарных ресурсов	221

Данные табл. 2 демонстрируют, как разработанное ПО позволяет при помощи пользовательского интерфейса (или при помощи стандартных средств работы с таблицами из состава офисных пакетов) сравнивать результаты работы алгоритма при разных настройках. В приведенном примере настройки алгоритма оптимизации отличались в части «Количество шагов оптимизации алгоритма» и в части «Критерий оптимизации», что отражено в соответствующих строках таблицы. В результате полученные решения для этих двух групп настроек практически не отличаются в части суммарного объема нарушений, однако значительно отличаются в части объема нарушений операций наиболее приоритетных партий, что соответствует ожидаемому результату в соответствии с выбранным критерием. Различие в данных характеристиках решения приведено в соответствующей строке таблицы.

Таблица 2.
Сравнение результатов решения
при разных настройках разработанного ПО

Table 2.
Comparison of the solution results with different settings
of the developed software

Настройки алгоритма		
Параметр расчета	Набор параметров 1	Набор параметров 2
Количество шагов алгоритма	0	5
Максимальное время работы алгоритма, мин.	10	10
Резервное время, сек.	0	0
Важность равномерности, %	0	0
Допустимость использования альтернативных ресурсов	да	да
Критерий оптимизации	Суммарное нарушение директивных сроков	Лексикографический учет нарушений директивных сроков по приоритетам
Характеристики решения		
Количество партий, нарушивших директивный срок	28 388	28 240
Количество партий, нарушивших директивный срок, %	99	98
Суммарный объем нарушений заказов	27 793	20 391
Суммарный объем нарушений операций	779 317 572	789 131 160
Суммарный объем нарушений самых приоритетных заказов, дни	8 960	1 566
Суммарный объем нарушений операций самых приоритетных	195 083 852	46 487 918
Количество неназначенных операций	0	0
Время завершения последней назначенной операции	2038-09-01T13:00	2038-09-02T12:45
Средняя загрузка единичных ресурсов по месяцам, %	1,666709184	1,666853741
Средняя загрузка максимально загруженного ресурса по месяцам, %	13,57	13,57
Максимальная загрузка единичных ресурсов по месяцам, %	100	100
Средняя загрузка единичных ресурсов по месяцам на эффективном интервале, %	21,3559599	21,35199608
Средняя загрузка максимально загруженного ресурса по месяцам на эффективном интервале, %	99,29268293	99,29268293

Заключение

Разработано и реализовано программное средство [17], позволяющее регрессионно тестировать и настраивать на целевые задачи внутренние параметры алгоритмов при решении NP-трудных задач распределения производственных ресурсов при автоматизации процесса изготовления высокотехнологичных изделий, свойственных предприятиям машиностроительного дивизиона ГК «Росатом».

Библиографический список

1. **Гладков, Л.А.** Гибридная модель решения задач оперативного производственного планирования / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова, С.А. Громов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 4(198). С. 99-110.
2. **Шкурба, В.В.** Календарное планирование. Конструктивная оптимизация. Индустрия праксеотехники // Автоматика и телемеханика. 2010. № 10. С. 122-132.
3. **Гераськин, М.И.** Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям / М.И. Гераськин, В.В. Егорова // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 58. С. 179-211.
4. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилиев, В.Б. Ларюхин [и др.] // Автоматика и телемеханика. 2021. № 11. С. 30-67.
5. **Сотсков, Ю.Н.** Область оптимальности перестановки обслуживания на одном приборе требований с неопределенными длительностями // Автоматика и телемеханика. 2020. № 5. С. 60-90.
6. **Кибзун, А.И.** Модель целочисленного линейного программирования как математическое обеспечение системы оптимального планирования потокового производства на этапе оперативного графирования / А.И. Кибзун, В.А. Рассказова // Автоматика и телемеханика. 2023. № 5. С. 113-132.
7. **Куприянов, Б.В.** Оценка и оптимизация производительности рекурсивного конвейера // Автоматика и телемеханика. 2020. № 5. С. 6-25.
8. **Afraimovich, L., M. Prilutskii, V. Vlasov.** Control Activities Planning Problem. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. Т. 729 LNEE. С. 341-350.
9. **Прилуцкий, М.Х.** Управляемый фронтальный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. № 6. С. 152-155.
10. **Куликов, М.С.** Ранговый итерационный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых системах // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 4. С. 37-43.
11. **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.
12. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 3 (77). С. 46-51.
13. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производств / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 36-43.
14. **Кумагина, Е.А.** Задачи распределения разнородных ресурсов в сетевых канонических структурах / Е.А. Кумагина, М.Х. Прилуцкий // Известия ТРТУ. 2001. № 4(22). С. 194-200.
15. Система производственного планирования *Смарт-ресурс* / Л.Г. Афраймович, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин // VIII Молодежная конференция по управлению проектами: сборник тезисов докладов. Н. Новгород: ООО «Литера», 2023. С. 7.
16. Производственное планирование в условиях неполноты данных / Л.Г. Афраймович, В.Е. Костюков, М.С. Куликов и др. // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1829-1834.
17. **Прилуцкий, М.Х.** Программа для ЭВМ «Разработка программного средства регрессионного тестирования системы производственного планирования» / М.Х. Прилуцкий, Л.Г. Афраймович, Н.В. Старостин и др. // Заявка 2024690711 от 16.12.2024.

**Дата поступления
в редакцию: 23.12.2024**

**Дата принятия
к публикации: 12.02.2025**

УДК 621.317.1, 004.032.26

EDN: XWAMKU

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ И НЕЙРОСЕТЕВОГО АВТОКОДИРОВЩИКА

С. ВанORCID: 0009-0006-1319-6374 e-mail: vansiuech@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.Л. Елисеев**ORCID: 0000-0002-9341-7475 e-mail: vlad-eliseev@mail.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Рассматривается задача обнаружения момента нарушения качества электрической энергии переменного тока. Предлагается новый метод контроля качества ACF-AE, основанный на использовании автокорреляционной функции сигнала напряжения и нейросетевого автокодировщика, распознающего аномалии. Проводится сравнение эффективности различных методов контроля качества с предложенным. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод позволяет более точно обнаружить начальную и конечную точки однофазного провала в сигнале напряжения, содержащего шум и гармоники. По сравнению с традиционным пороговым методом, основанным на среднеквадратичном значении, предложенный метод имеет очевидные преимущества в точности и надежности.

Ключевые слова: нейросетевой автокодировщик, автокорреляционная функция, качество электрической энергии, провал напряжения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ван, С. Динамическая модель и метод обнаружения однофазного провала напряжения на основе автокорреляционной функции и нейросетевого автокодировщика / С. Ван, В.Л. Елисеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 15-25. EDN: XWAMKU

DYNAMIC MODEL AND METHOD OF DETECTING A SINGLE-PHASE VOLTAGE DIP BASED ON AUTOCORRELATION FUNCTION AND NEURAL NETWORK AUTOENCODER

X. WangORCID: 0009-0006-1319-6374 e-mail: vansiuech@mpei.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

*Moscow, Russia***V.L. Eliseev**ORCID: 0000-0002-9341-7475 e-mail: vlad-eliseev@mail.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Moscow, Russia

Abstract. The paper deals with the problem of detecting the moment of power quality violation in the alternating current electric network. A new ACF-AE method of power quality control is proposed. This method uses the autocorrelation function of the voltage signal and a neural network autoencoder that recognizes anomalies. The effectiveness of various power quality control methods is compared with the proposed one. The experimental results show that the proposed method can accurately detect the start and end points of a single-phase dip in the voltage signal containing

noise and harmonics. Compared with the traditional threshold method based on the root mean square value, the proposed method has better accuracy and reliability.

Key words: neural network autoencoder, autocorrelation function, power quality, voltage dip.

FOR CITATION: X. Wang, V.L. Eliseev. Dynamic model and method of detecting a single-phase voltage dip based on autocorrelation function and neural network autoencoder. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 15-25. EDN: XWAMKU

Введение

Качество электроэнергии, являясь ключевым элементом современных энергосистем, имеет решающее значение для стабильной работы промышленного производства, бытового потребления электроэнергии и электронного оборудования. Его важность подчеркивается наличием национальных и международных стандартов. Кроме собственно показателей качества электроэнергии, в стандартах закрепляются методы измерения этих показателей [1, 2]. С ростом спроса и увеличением сложности электрооборудования проблемы с качеством электроэнергии становятся все более заметными. Это не только влияет на эффективность и надежность системы, но также может привести к повреждению оборудования и несчастным случаям.

С одной стороны, электрическая нагрузка развивающихся отраслей продолжает расти. С развитием новых энергетических технологий нового поколения к ним подключается большое количество географически рассредоточенных и слабоконтролируемых распределенных энергетических ресурсов [3] (в том числе, ветроэнергетики [4] и солнечной энергии). Прерывистая выходная мощность источников энергии вызывает увеличение количества гармоник, обратной последовательности и реактивных токов в распределительной сети, инициируя изменения напряжения, тока и частоты в процессе подачи электроэнергии.

С другой стороны, с общим повышением уровня развития промышленности различные современные системы измерения, управления и контроля снизили отказоустойчивость по качеству электроснабжения электросетей. Помехи со стороны сети не только напрямую приводят к нештатной работе энергооборудования и снижению энергоэффективности, но также в серьезных случаях – к повреждению энергетического оборудования, сопровождающегося огромными экономическими потерями [5]. Крайне важно качество электроэнергии. Использование более совершенных технических средств для оперативного контроля его показателей в энергосистеме имеет большое значение для дальнейшего снижения затрат на техническое обслуживание энергосистемы и повышения ее стабильности.

Обнаружение начальной и конечной точек интервала нарушения показателей качества электроэнергии играет ключевую роль в процессе управления качеством. Это связано с тем, что на качество электроэнергии обычно влияет ряд событий: короткие замыкания, операции переключения, удары молнии, отказы оборудования и т.д., что приводит к мгновенным изменениям формы сигналов напряжения и тока. Эти события возмущений не распределены равномерно, но имеют четкие начальные и конечные моменты. Информация о начальной точке очень ценна для последующей сегментации возмущений [6]. В зависимости от начальной точки интервал помех можно разделить, а затем анализировать отдельно характеристики качества электроэнергии в каждом периоде времени. Кроме того, локализация нарушений качества электроэнергии может способствовать разработке стратегии предотвращения сбоев и адаптивного управления. Благодаря частому мониторингу начальных и конечных точек, центр диспетчеризации электроэнергии может прогнозировать возможные проблемы и заранее принимать меры вмешательства, такие как корректировка распределения нагрузки, запуск резервного источника питания или реализация компенсации переходных процессов, чтобы уменьшить последствия ухудшения качества электроэнергии.

Наконец, с точки зрения правового регулирования, регистрация нарушений качества электроэнергии является важным доказательством соответствия нормативным требованиям.

Во многих странах и регионах установлены минимальные пределы показателей качества электроэнергии. Обнаружение и фиксация нарушений на ранних стадиях может выступать юридически обоснованной доказательной базой.

Ранние исследования в основном были сосредоточены на традиционных методах обработки сигналов. Например, в стандартах [1] и [2] рекомендуется использовать среднеквадратический метод (RMS) для измерения амплитуды и длительности, но определение среднеквадратического значения задает, что измерение основано на серии выборок непрерывное среднее значение сигнала. В статье [7] для обнаружения используется метод RMS, а интервал обнаружения различных типов аномалий напряжения составляет от 10 мс до 10 мин. Частота выборки определяет временное разрешение расчета среднеквадратического значения. Если частота выборки недостаточно высока, быстрые изменения провала напряжения могут быть не зафиксированы вовремя. Вейвлет-преобразование широко используется при анализе провалов напряжения [8]. Однако в практических приложениях выбор оптимальной базисной вейвлет-функции затруднен и напрямую повлияет на результаты обработки сигнала вейвлет-преобразованием. S-преобразование является расширением вейвлет-преобразования [9], но оно требует длительных математических вычислений даже для коротких последовательностей данных и обычно не подходит для приложений реального времени. В статье [10] предлагается метод, основанный на независимом анализе компонентов (ICA), позволяющий точно оценить время начала и окончания перебоев в подаче электроэнергии, но ICA предполагает, что анализируемый сигнал образуется статистически независимыми и некоррелированным компонентами, что может быть неверно в реальной энергосистеме.

Резюмируя, следует отметить, что существующие методы обнаружения сбоев качества электроэнергии обладают определенными недостатками, особенно в части быстрого выявления сбоя и помехоустойчивостью, что делает актуальной задачу разработки новых, более совершенных методов.

Метод исследования

В работе [11] авторами был предложен метод обнаружения разладки модели динамического объекта с помощью взаимно-корреляционной функции (ВКФ) и нейросетевого автокодировщика. Предлагается применить аналогичный подход для обнаружения сбоев качества электричества. В задаче с моделью динамического объекта использовались сигналы входа и выхода модели, однако в случае с выявлением сбоев электрического питания есть только один анализируемый сигнал, поэтому целесообразно использовать автокорреляционную функцию.

Как известно, автокорреляционная функция (АКФ, ACF, auto-correlation function) является одной из важнейших характеристик как стохастических, так и детерминированных сигналов в непрерывном и дискретном времени. АКФ по существу описывает силу связи между сигналом и его задержанной копией. В случае изменения амплитуды периодического сигнала, например, колебаний напряжения в сети переменного тока, эта функция может претерпевать изменения в положении пика, амплитуде и форме функции. Поскольку АКФ описывает корреляцию самого сигнала, она тесно связана со временем сигнала. Результаты АКФ часто могут напрямую соответствовать реальным условиям эксплуатации электросети.

АКФ сигнала $u(t)$ определяется интегралом:

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t - \tau) dt \quad (1)$$

По аналогии с формулой (1) АКФ дискретного сигнала $u(n)$ и его задержанной копии на время τ в окне шириной d отсчетов начиная с отсчета временного ряда k может быть представлена в виде:

$$\Psi(\tau, k) = \frac{1}{d} \sum_{n=k}^{k+d-1} u(n) u(n-\tau) \quad (2)$$

Индекс k указывает на место во временном ряде, в котором рассчитана данная АКФ, а аргумент τ является смещением одного ряда относительно другого, для которого рассчитывается одно значение дискретной АКФ. Таким образом, АКФ в позиции k можно рассматривать как вектор $R^k = (\Psi(-d+1, k), \dots, \Psi(0, k), \Psi(1, k), \dots, \Psi(d-1, k))^T$. Такой вектор является точкой в пространстве размерности $2d-1$.

Локализация нарушений качества электроэнергии с помощью АКФ – это метод, который использует характеристики временного ряда напряжений, измеренный в энергосистеме. При возникновении переходных явлений (гармоники, колебания напряжения) формируются специфические автокорреляционные характеристики, существенно отличающиеся от автокорреляционных функций в нормальных условиях эксплуатации. Сигнал напряжения формирует облако точек, расположенное в определенной области $2d-1$ -мерного пространства в разное время. Пример такой области для пространства размерности $d=3$ приведен на рис. 1, где указана область R^N , когда возмущения напряжения не происходит.

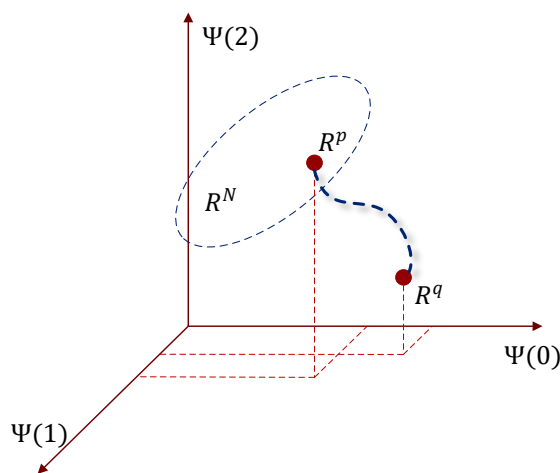


Рис. 1. Векторное пространство АКФ

Fig. 1. Vector space of ACF

При изменении сигнала напряжения относительно нормальных, заданных в области R^N , АКФ также будет меняться. Предположим что сигнал напряжения в момент времени p представлен точкой R^p в области нормальных вариантов АКФ R^N . Тогда при изменении сигнала напряжения АКФ в другой момент времени $q > p$ будет представлена точкой R^q на рис. 1. Другими словами, изменения вектора автокорреляционной функции напряжения отражают пространственно-временную эволюцию динамических характеристик напряжения, что имеет большое значение для понимания и прогнозирования нарушений напряжения. Выявленный в векторном пространстве АКФ дрейф $R^p \rightarrow R^q$ за пределы области R^N нормального динамического поведения системы означает, что в момент времени q обнаружено нарушение напряжения.

Для обнаружения нарушений напряжения нужен способ запомнить множество точек АКФ при нормальных сигналах напряжения, а также способ обнаружить отличие АКФ от нормы. Для этого воспользуемся нейросетевым автокодировщиком (АЕ, autoencoder), который может запоминать и потом воспроизводить векторы обучающего множества. В качестве вектора, подаваемого на вход автокодировщика, возьмем рассчитанную АКФ R^k . Обучение автокодировщика будем производить на АКФ наблюдаемого процесса в нормальных условиях.

Функционально нейросетевой автокодировщик копирует входные данные на выход. По архитектуре он похож на многослойный персептрон. Однако особенностью обученного автокодировщика является то, что он копирует только знакомые данные, которые были представлены в обучающей выборке. Автокодировщик сжимает входные данные для представления их в скрытом пространстве меньшей размерности, а затем восстанавливает из этого представления выходные данные. Ошибка восстановления входного вектора на выходе зависит от того, похож ли входной вектор на те, которые были в обучающих данных.

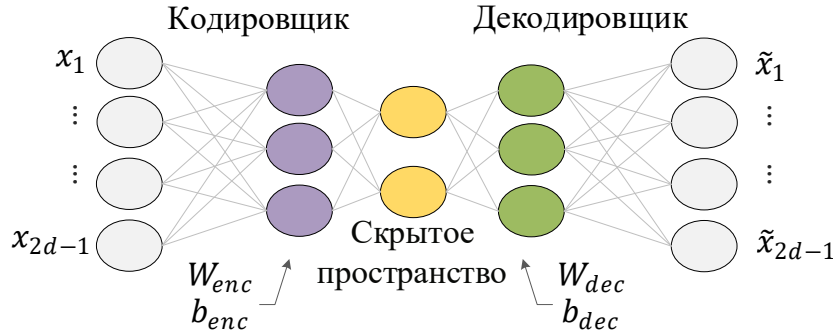


Рис. 2. Архитектура нейросетевого автокодировщика

Fig. 2. Architecture of a neural network autoencoder

Автокодировщик состоит из двух частей (рис. 2): кодировщика и декодировщика. Кодировщик отвечает за сжатие входа в скрытое пространство и представлен функцией кодирования $z = f(W_{enc}x + b_{enc})$. Декодировщик предназначен для восстановления входа из скрытого пространства и представлен функцией декодирования $\tilde{x} = f(W_{dec}z + b_{dec})$. Размерности векторов x и $\tilde{x}$ совпадают, размерность вектора z меньше размерности x . Таким образом,

$$\tilde{x} = f(W_{dec} f(W_{enc}x + b_{enc}) + b_{dec}) \quad (3)$$

Обозначим функцию, выполняемую автокодировщиком, как $\tilde{x} = AE(x)$.

Алгоритм синтеза детектора нарушений напряжения

Синтез детектора обычно включает следующие шаги:

Шаг 1. Получение исходного сигнала напряжения. Это будут временные ряды $u(n)$, где $1 \leq n \leq L$ – индекс отчета времени, а L – длина времени наблюдения.

Шаг 2. Расчет АКФ. Рассчитаем АКФ по временным рядам $u(n)$ с шагом d отсчетов и получим набор векторов АКФ R^k , описывающий нормальное напряжение. Далее для обозначения номера окна, в котором рассчитывалась АКФ, будем использовать индекс k , значения которого находятся в интервале: $1 \leq k \leq \frac{L}{d}$.

Шаг 3. Обучение автокодировщика. Векторы АКФ, представленные нормальный сигнал напряжения, используются в качестве набора обучающих данных $x(k) = R^k$ автокодировщика. Обучение осуществляется для минимизации ошибки реконструкции $r(k) = \|\tilde{x}(k) - x(k)\|$, где $\tilde{x}(k) = AE(x(k))$ и $\|z\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{2d-1} z_i^2}$ – евклидова длина вектора.

Шаг 4. Вычисление порога. Максимальная ошибка реконструкции $r_{th} = \max_k r(k)$, полученная при обучении, является порогом срабатывания для обнаружения АКФ, непохожих на нормальные.

После получения детектора его можно использовать для обнаружения напряжения. Ниже приведены общие шаги по использованию детектора.

Шаг 1. Собрать сигнал напряжения $u(n)$ за период времени L .

Шаг 2. Рассчитать АКФ по временным рядам $u(n)$ с шагом d отсчетов и получить набор векторов АКФ $x(k) = R^k$.

Шаг 3. Рассчитать реконструированное значение АКФ с помощью автокодировщика $\tilde{x} = AE(x)$ и получить ошибку реконструкции $r(k) = \|\tilde{x}(k) - x(k)\|$.

Шаг 4. Сравнить $r(k)$ с пороговым значением r_{th} : если $r(k) \leq r_{th}$, то провала напряжения нет, иначе на интервале последних d отсчетов времени есть провал напряжения.

Будем далее обозначать предложенный метод синтеза и обнаружения сбоев по характерным структурным элементам: ACF-AE.

Эксперименты

Результаты данной работы получены на основе сигналов, синтезированных по модели качества электроэнергии [12]. Частота дискретизации сигнала сетевого напряжения установлена на уровне 4000 Гц, что соответствует 0,25 мс, а общее время выборки составляет 0,5 сек. Частота питающего напряжения равна 50 Гц. Общее количество точек выборки – 2000.

Сигнал напряжения $u(n)$ с провалом 15 % показан на рис. 3. Падение напряжения происходит с момента 0,12525 сек до 0,32500 сек. Амплитуда показана в относительных единицах к номинальному уровню напряжения и обозначена по международным правилам как «р.у.» (per unit).

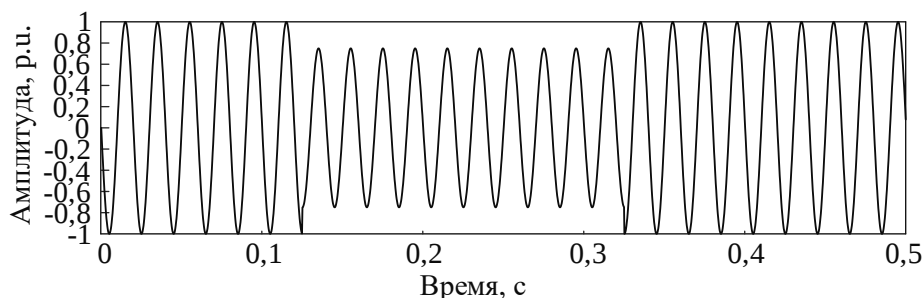


Рис. 3. Сигнал напряжения с падением 15 %

Fig. 3. Voltage signal with 15 % reduction

Для обнаружения провалов напряжения используются два метода: предложенный и традиционный среднеквадратический (RMS).

Краткосрочное среднеквадратическое значение u_{RMS} рассчитывается по формуле:

$$u_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{n=1}^d u(n)^2} \quad (4)$$

В формуле (4) $u(n)$ – n -я точка выборки сигнала напряжения, а d – длина временного интервала расчета, который обычно является целым числом, кратным полупериодной частоте выборки энергосистемы. В стандарте IEEE1564-2014 [2] рекомендуется вычислять RMS напряжения в пределах окна, длина которого составляет один период номинальной частоты энергосистемы.

Результат обнаружения сигнала напряжения с провалом 15 % методом RMS с окном в 1 период и шагом перемещения 1 показан на рис. 4. RMS нормального напряжения составляет 0,7071. Когда RMS ниже порогового значения $r_{th} = 0,6364$, считается, что обнаружен провал напряжения 15 %.

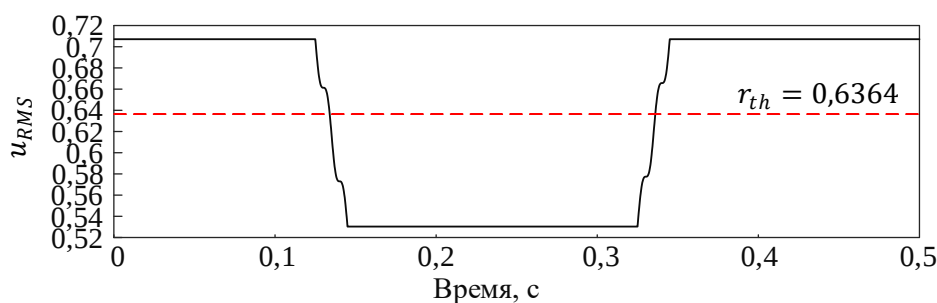


Рис. 4. Результат обнаружения провала напряжения методом RMS

Fig. 4. Result of voltage dip detection by RMS method

Время начала и окончания провала напряжения, обнаруженного методом RMS, составляет 0,13400 и 0,33630 сек. Ошибки определения начальной и конечной точек составляют 8,75 мс и 11,30 мс соответственно.

Далее предлагаемый метод используется для обнаружения аномалий в сигнале напряжения. АКФ рассчитывается при длине окна $d = 3$. АКФ нормального напряжения и напряжения при падении показана на рис. 5 в трехмерном пространстве.

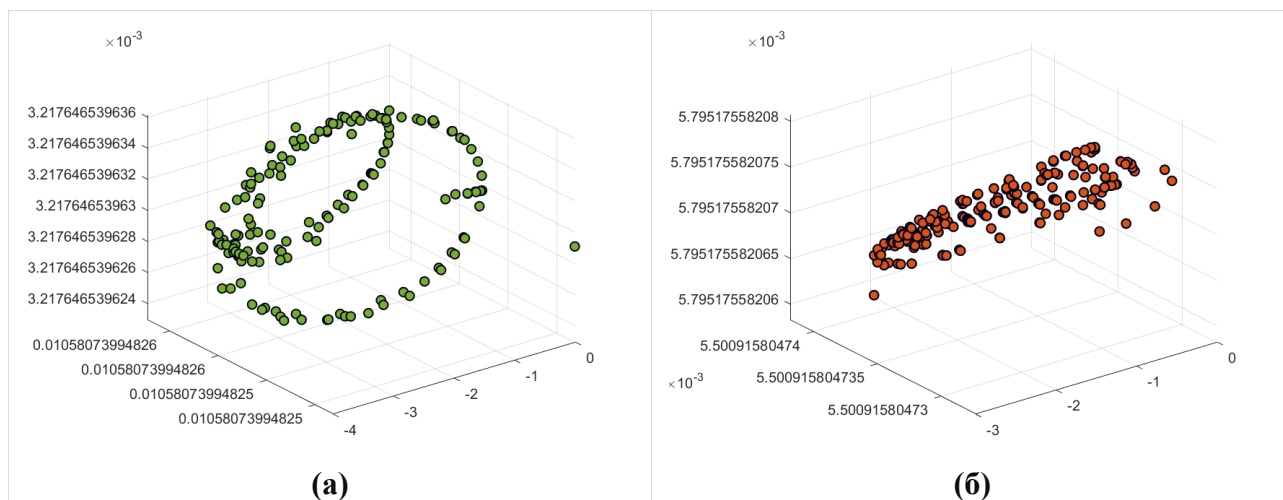


Рис. 5. АКФ нормального напряжения (а) и АКФ при падении напряжения (б) в трехмерном пространстве

Fig. 5. ACF of normal voltage (a) and ACF for voltage dip (b) in three-dimensional space

Видно, что вектор АКФ меняется в трехмерном пространстве до и после изменения сигнала напряжения. Таким образом, провал напряжения можно обнаружить с помощью АКФ. Для обнаружения точек переходных процессов напряжения применим автокодировщик. Для этого проведем нормировку АКФ для нормального напряжения, относительно которого мы ходим определять начальную и конечную точки провала напряжения. Эти значения АКФ будут использоваться для обучения автокодировщика. Используется нейросеть типа «многослойный перцептрон» (MLP) с двумя слоями и архитектурой $MLP(2d - 1, 50, 2d - 1)$, т.е. на входе вектор АКФ размерности $2d - 1$, поступающий на скрытый слой 25 нейронов, далее выходной слой из $2d - 1$ нейронов. Количество эпох обучения – 300.

Результат обнаружения сбоя автокодировщиком показан на рис. 6. Временами начала и окончания обнаруженного провала напряжения являются 167-е и 434-е окна, т.е. 0,12530-я сек и 0,32550-я сек (501-я и 1302-я точки выборки).

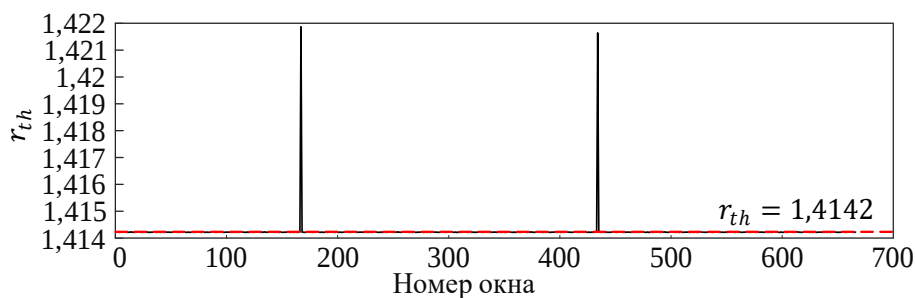


Рис. 6. Результат обнаружения провала напряжения предложенным методом

Fig. 6. Result of voltage dip detection by the proposed method

В табл. 1 приведены результаты сравнения двух методов.

Таблица 1.

Сравнение результатов обнаружения провала в сигнале напряжения по предложенному способу и методу RMS

Table 1.

Comparison of the voltage dip detecting results by the proposed method and the RMS method

Тип сбоя	Время начала сбоя, с			Время окончания сбоя, с		
	Факт	Обнаружение методом RMS	Обнаружение методом ACF-AE	Факт	Обнаружение методом RMS	Обнаружение методом ACF-AE
Провал напряжения	0,12525	0,13400	0,12530	0,32500	0,33630	0,32550

В табл. 2 приведены задержки детектирования двух методов. Метод ACF-AE позволяет определить время начала и окончания провала напряжения эффективнее, чем метод RMS.

Таблица 2.

Задержка обнаружения провала в сигнале напряжения по предложенному способу и методу RMS

Table 2.

Delay in voltage dip detecting by the proposed method and the RMS method

Тип сбоя	Задержка обнаружения начала сбоя, мс		Задержка обнаружения окончания сбоя, мс	
	Методом RMS	Методом ACF-AE	Методом RMS	Методом ACF-AE
Провал напряжения	8,75	0,05	11,30	0,50

Рассмотрим эксперименты по обнаружению провала напряжения на сигнале $u(n)$ с наложенным белым шумом с отношением сигнал/шум 60 и сигнале $u(n)$, содержащем 3-ю и 5-ю гармоники. Результаты обнаружения аномалии в сигнале напряжения методом RMS показаны рис. 8. Время начала и окончания сигнала напряжения с шумом и провалами, обнаруженными методом RMS, составляют 0,13700 и 0,33330 сек. Ошибки определения начальной и конечной точек составляют 11,75 мс и 8,30 мс соответственно. Время начала и окончания сигнала напряжения с гармониками и провалами, обнаруженными методом RMS, составляют 0,14150 и 0,33330 сек. Ошибки определения начальной и конечной точек составляют 16,25 мс и 8,30 мс соответственно. Аналогично АКФ рассчитывается при длине окна $d = 3$. Формы вектора АКФ в трехмерном пространстве, когда провалы напряжения сопровождаются шумами и гармониками, показаны на рис. 9.

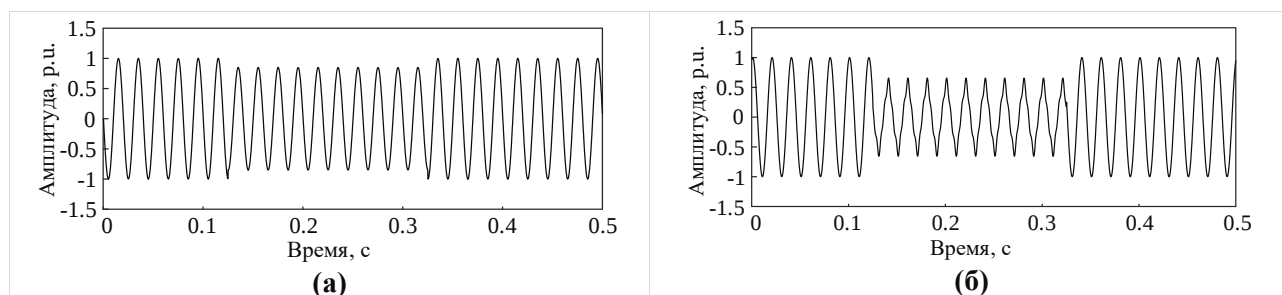


Рис. 7. Сигнал с наложенным белым шумом с отношением сигнал/шум 60 (а) и сигнал, содержащий 3-ю и 5-ю гармоники (б)

Fig. 7. A signal with superimposed white noise with a signal-to-noise ratio of 60 (a) and a signal containing the 3rd and 5th harmonics (b)

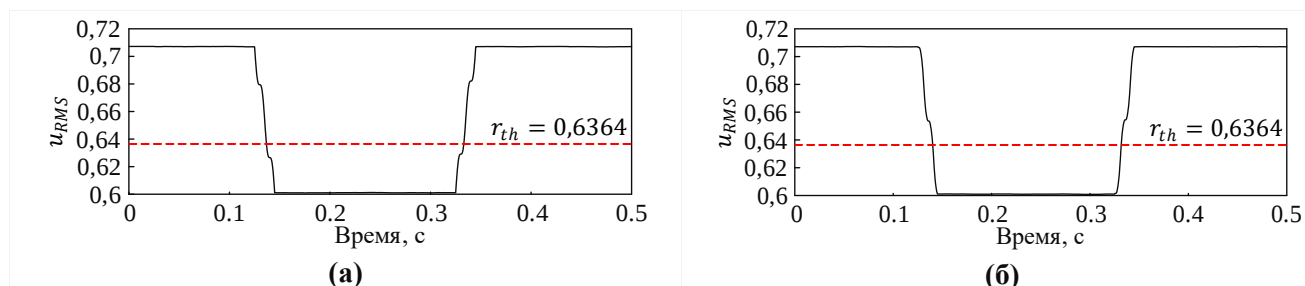


Рис. 8. Результаты обнаружения провала напряжения при наличии шума (а) и гармоник (б) методом RMS

Fig. 8. Results of voltage dip detection in the presence of noise (a) and harmonics (b) by the RMS method

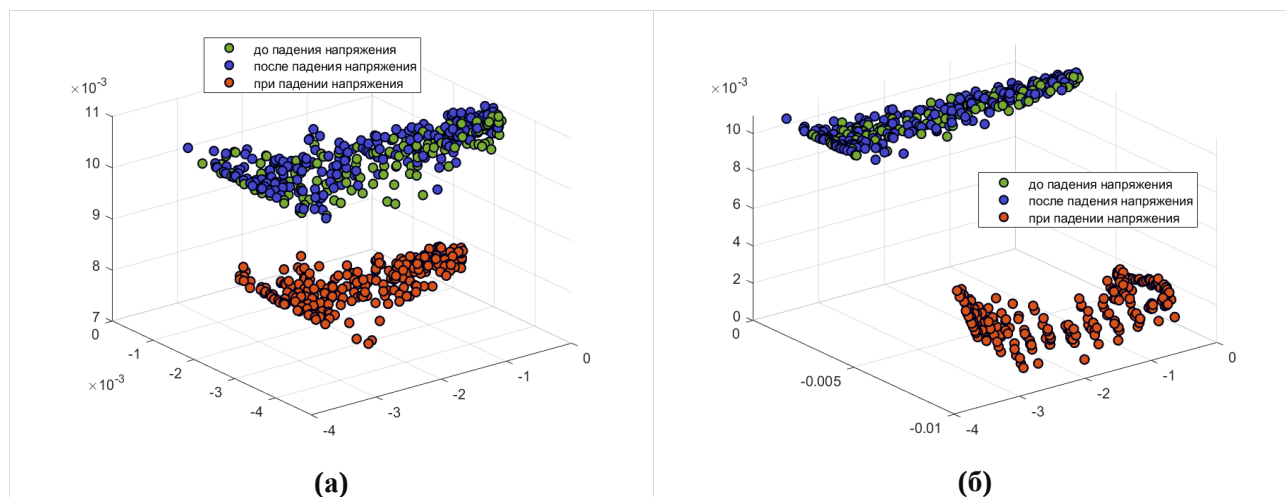


Рис. 9. Векторы АКФ сигнала напряжения с падением напряжения 15 % при наличии шума (а) и гармоник (б)

Fig. 9. ACF vectors of a voltage signal with 15% reduction in the presence of noise (a) and harmonics (b)

Как видим, в трехмерном пространстве существует четкое разделение между АКФ, когда провал напряжения сопровождается шумом и гармониками, и АКФ нормального сигнала напряжения. Результаты обнаружения автокодировщика показаны на рис. 10. Временами начала и окончания обнаруженного провала напряжения являются 167-е и 434-е окна, т.е. 501-я и 1302-я точки выборки.

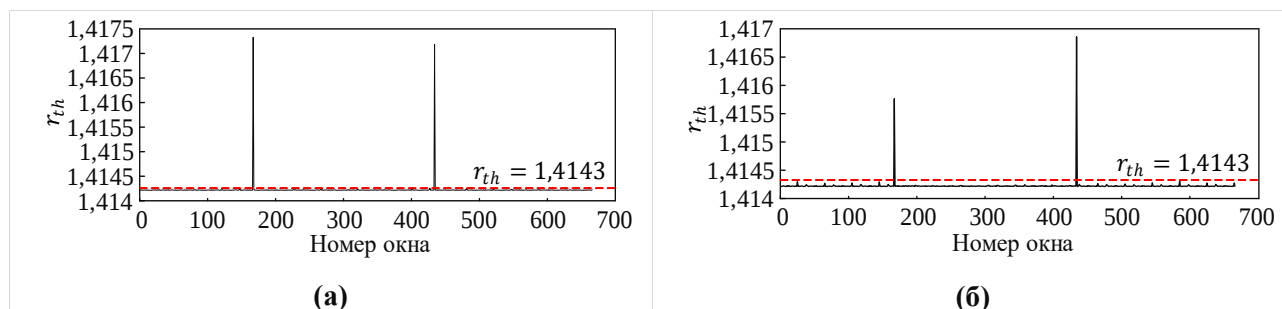


Рис. 10. Результаты обнаружения провала напряжения при наличии шума (а) и гармоник (б) предложенным методом

Fig. 10. Results of voltage failure detection in the presence of noise (a) and harmonics (b) by the proposed method

В табл. 3 показаны результаты обнаружения двумя методами сигналов напряжения с гармониками и провалами и сигналов напряжения с шумом и провалами соответственно.

Таблица 3.

Сравнение результатов обнаружения аномалий напряжения двумя методами

Table 3.

Comparison of voltage anomaly detection results by two methods

Тип сбоя	Время начала сбоя, с			Время окончания сбоя, с		
	Факт	Обнаружение методом RMS	Обнаружение методом ACF-AE	Факт	Обнаружение методом RMS	Обнаружение методом ACF-AE
Провал напряжения с шумом	0,12525	0,13700	0,12530	0,32500	0,33330	0,32550
Провал напряжения с гармониками	0,12525	0,14150	0,12530	0,32500	0,33330	0,32550

В табл. 4 приведены задержки детектирования двух методов. Метод ACF-AE также подходит для сигналов напряжения, содержащих гармоники, и обладает определенными противошумовыми возможностями.

Таблица 4.

Задержка обнаружения провала в сигнале напряжения по предложенному способу и методу RMS

Table 4.

Delay in voltage dip detecting by the proposed method and the RMS method

Тип сбоя	Задержка обнаружения начала сбоя, мс		Задержка обнаружения окончания сбоя, мс	
	методом RMS	методом ACF-AE	методом RMS	методом ACF-AE
Провал напряжения с шумом	11,75	0,05	8,30	0,50
Провал напряжения с гармониками	16,25	0,05	8,30	0,50

Эксперименты показывают, что предложенный метод обнаруживает провалы напряжения эффективнее традиционного метода RMS. В силу своего определения длина расчетного окна метода RMS составляет один период сигнала напряжения, что приводит к естественным дефектам по сравнению с предложенным методом и большей восприимчивости к шуму и гармоникам.

Заключение

Предлагается новый метод обнаружения напряжения АСF-АЕ, который использует АКФ и автокодировщик для определения времени начала и окончания провала напряжения. Результаты исследования показывают, что предложенный метод позволяет с достаточной точностью определить начальную и конечную точки провала, когда измеренное напряжение имеет шум или гармоники. Предложенный метод эффективнее, чем традиционный метод RMS.

В данной работе не исследованы сигналы напряжения при разных частотах дискретизации, а увеличение частоты дискретизации может улучшить точность обнаружения. Также рекомендуется продолжить исследования, распространив постановку задачи на сигналы реального напряжения, содержащие нарушения качества электроэнергии.

Библиографический список

1. **ГОСТ 30804.4.30-2017** (IEC 61000-4-30:2015) Электромагнитная совместимость(ЭМС) Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 51 с.
2. **IEEE Guide for Voltage Sag Indices**, in IEEE Std 1564-2014, vol., no., pp.1-59, 20 June 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6842577.
3. **Chen, S.** Evaluation of Power Quality and Reliability of Distributed Generation in Smart Grid / S. Chen, J. Zhang, L.Wang et al. // Earth and Environmental Science, 2021, 632(4): pp. 1-6.
4. **Ruksana, S. K.** Recent Challenges for Power Quality Impacts on Grid Integrated Wind Energy System / S. K, Ruksana, S.K. Singh, A.K. Goswami et al. // A Review. 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, 2018.
5. **Khetarpal, P.** A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification / P. Khetarpal, M.M. Tripathi // Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020, 28: 100417.
6. **Bollen, M.H.J.** Signal processing of power quality disturbances / M.H.J. Bollen, Gu I.Y.H. // John Wiley & Sons, 2006.
7. **Семёнов, А.С.** Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжения / А.С. Семёнов, В.А. Бондарев, С.А. Заголило // Фундаментальные исследования. 2017. № 9(1). С.86-92.
8. **Latran, M.B.** A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm / M.B, Latran, A. Teke // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 71: pp. 131-139.
9. **Mishra, S.** Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network / S. Mishra, C.N. Bhende, B.K. Panigrahi // IEEE Transactions on power delivery, 2007, 23(1): pp. 280-287.
10. **Nagata, E.A.** Voltage sag and swell detection and segmentation based on Independent Component Analysis / E.A. Nagata, D.D. Duque C.A. Ferreira et al. // Electric Power Systems Research, 2018, 155: pp. 274-280.
11. **Ван, С.** Обнаружение разладки модели динамического объекта с помощью функции корреляции / Ван Сюэчунь, В.Л. Елисеев // XXX международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика». Тезисы докладов – М: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2024. С. 301.
12. **Igual, R.** Integral mathematical model of power quality disturbances / R. Igual, C. Medrano, F.J. Arcega et al. // 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2018: pp.1-6.

*Дата поступления
в редакцию: 25.11.2024*

*Дата принятия
к публикации: 12.02.2025*

УДК 658.562

EDN: HMPBDM

МЕТОДЫ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПОКРЫТИЯХ

В.В. Киященко

ORCID: 0000-0001-9710-2860 e-mail: vv.kiyashchenko@gmail.com

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

Рассматриваются методы морфологического анализа изображений для выявления дефектов на покрытиях. Применение морфологических операций, таких как эрозия, дилатация, замыкание и градиент, позволяет эффективно выделять границы объектов на изображениях. В ходе исследования предложен подход к автоматизированному анализу изображений покрытий, позволяющий определять координаты, площадь, периметр и эксцентриситет дефектов. Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность методов морфологической обработки в улучшении точности и полноты анализа структуры поверхности. Для документирования характеристик дефектов сформирована таблица, которая может быть использована в качестве основы для дальнейшей классификации и оценки качества покрытий. Применение предложенных методов позволяет повысить точность дефектоскопии и может найти применение в промышленности и научных исследованиях.

Ключевые слова: морфологический анализ, дефекты покрытий, эрозия, дилатация, градиент, обработка изображений, анализ структуры поверхности, дефектоскопия, автоматизация анализа, качество покрытий.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Киященко, В.В. Методы морфологического анализа изображений для выявления дефектов на покрытиях // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 26-36. EDN: HMPBDM

IMAGE MORPHOLOGICAL ANALYSIS METHODS FOR DETECTING DEFECTS IN COATINGS

V.V. Kiyashchenko

ORCID: 0000-0001-9710-2860 e-mail: vv.kiyashchenko@gmail.com

Samara State Technical University

Samara, Russia

Abstract. The article discusses image morphological analysis methods for detecting defects in coatings. The application of morphological operations such as erosion, dilation, closing and gradient effectively highlights object boundaries in images. An approach to automated coating image analysis is proposed. This approach allows determining the defect coordinates, area, perimeter, and eccentricity. The results demonstrate the high efficiency of morphological processing methods in enhancing the accuracy and completeness of surface structure analysis. A table documenting defect characteristics has been developed, serving as a foundation for further classification and quality assessment of coatings. The proposed methods improve defect detection accuracy and have potential applications in industrial and scientific research.

Key words: morphological analysis, coating defects, erosion, dilation, gradient, image processing, surface structure analysis, defect detection, analysis automation, coating quality.

FOR CITATION: Kiyashchenko V.V. Image morphological analysis methods for detecting defects in coatings. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 26-36. EDN: HMPBDM

Введение

Двухкомпонентные покрытия играют важную роль в защите материалов от внешних воздействий, таких как коррозия, абразивный износ и другие механические или химические повреждения [1]. Эти покрытия представляют собой композиции из двух различных компо-

нентов, которые в процессе нанесения образуют прочную защитную пленку, обладающую высокими эксплуатационными характеристиками. Наиболее распространенными материалами для двухкомпонентных покрытий являются никель и алюминий [2-3]. Никель известен своей высокой устойчивостью к коррозии, особенно в агрессивных средах, в то время как алюминий отличается отличной износостойкостью и легкостью. Однако, несмотря на значительные преимущества этих материалов, процесс нанесения двухкомпонентных покрытий не застрахован от возникновения дефектов, которые могут негативно повлиять на их качество и функциональные свойства. Наиболее распространенными дефектами, возникающими в таких покрытиях, являются нерасплавленные частицы, трещины, контаминация и неоднородности структуры покрытия (рис. 1) [4-5]. Эти дефекты могут появляться по разным причинам: неправильная подготовка поверхности, нарушение температуры или скорости нанесения покрытия, а также особенности химических процессов, происходящих в процессе нанесения покрытия. Например, нерасплавленные частицы могут возникать, когда температура нанесения покрытия слишком низка, а пузырьки воздуха образуются в результате недостаточного времени для отверждения покрытия [6].

Каждый из этих дефектов имеет свои особенности, которые могут существенно повлиять на прочностные, коррозионные и другие эксплуатационные свойства покрытия. Например, трещины могут служить входными воротами для агрессивных химических веществ, ускоряя процесс коррозии, а пузырьки воздуха создают микропоры, снижающие механическую прочность покрытия. Понимание природы дефектов и их влияние на качество покрытия является важной составляющей разработки эффективных методов контроля и оптимизации процесса нанесения двухкомпонентных покрытий.

Для решения этих проблем требуется внедрение высокотехнологичных методов контроля качества, таких как компьютерное зрение и машинное обучение, а также применение численных методов моделирования, которые позволяют заранее предсказать и минимизировать возникновение дефектов на стадии разработки и производства покрытия. Таким образом, в данной статье рассматриваются ключевые проблемы, связанные с дефектами двухкомпонентных покрытий, а также методы их предотвращения и обнаружения с использованием современных технологий.

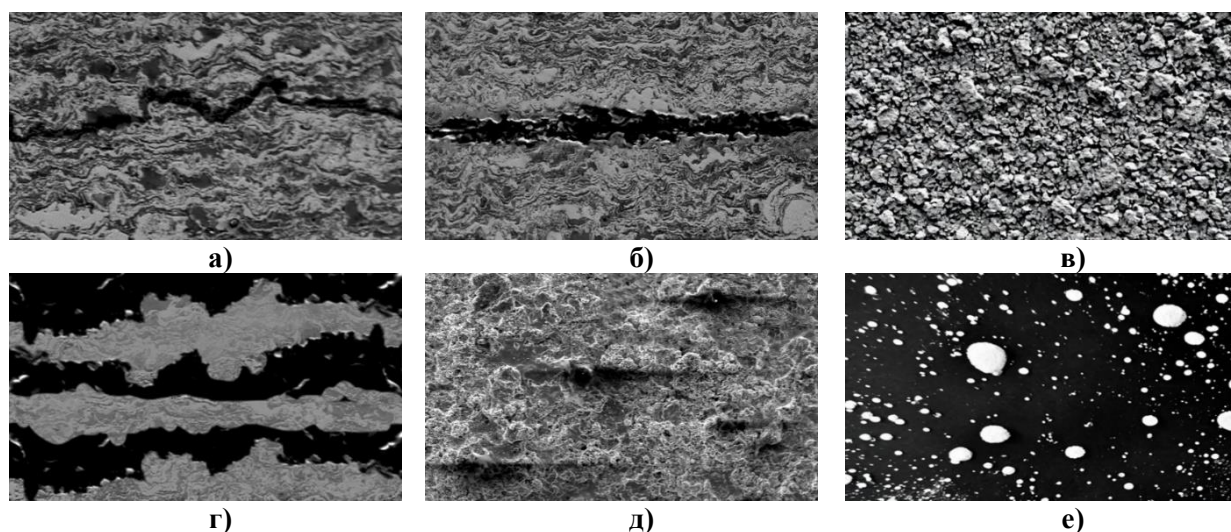


Рис. 1. Примеры распространенных дефектов композиционных покрытий:

**а) трещины; б) отслоение; в) пористость; г) неравномерность толщины;
д) образование геля; е) контаминация**

Fig. 1. Examples of common composite coating defects:

a) cracks; b) delamination; c) porosity; d) thickness unevenness; d) gel formation; e) contamination

Материалы и методы

Задача обнаружения дефектов в двухкомпонентных покрытиях. Обнаружение дефектов в двухкомпонентных покрытиях является неотъемлемой частью контроля качества и обеспечивает надежность покрытия в процессе эксплуатации. Важно отметить, что дефекты, такие как трещины, пузырьки воздуха, нерасплавленные частицы и неоднородности, могут значительно снижать эксплуатационные характеристики покрытия, включая его коррозионную стойкость, износостойкость и механическую прочность. Поэтому для своевременного выявления дефектов и предотвращения их воздействия на качество покрытия применяются различные методы диагностики. В настоящее время широко используются как традиционные, так и современные методы (компьютерное зрение и машинное обучение).

Традиционные методы обнаружения дефектов (визуальная инспекция, ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская и инфракрасная съемка) находят широкое применение в промышленности [7-9]. Они позволяют выявить дефекты, которые могут быть невидимы при обычном осмотре, а также дают информацию о глубине и характеристиках дефекта. Несмотря на свою эффективность, традиционные методы имеют ограничения (высокая стоимость, сложность в эксплуатации, необходимость профессионального оборудования), что делает их менее гибкими для массового контроля качества.

В последние годы всё большее внимание уделяется методам обработки изображений, которые позволяют быстро и эффективно анализировать большие объемы данных, получаемых с помощью камер и других сенсоров [10]. Методы обработки изображений с использованием компьютерного зрения позволяют автоматизировать процесс обнаружения дефектов, улучшить точность и уменьшить вероятность человеческой ошибки [11-12].

Корреляционный анализ используется для сравнения различных изображений покрытия и выявления изменений или дефектов. Этот метод эффективен при обнаружении отклонений от нормального состояния, таких как трещины или дефекты покрытия [13].

Коэффициент корреляции представляет собой одну из ключевых статистических мер, используемых для оценки схожести между двумя изображениями. В контексте анализа дефектов в двухкомпонентных покрытиях корреляционный анализ применяется для сравнения исходного эталонного изображения с образцом, что позволяет выявлять отклонения, указывающие на наличие дефектов. Значения коэффициента корреляции находятся в диапазоне от -1 до 1: значение, близкое к 1, указывает на сильное положительное сходство между областями изображения, тогда как значение, близкое к -1, говорит о сильной отрицательной корреляции. Значение, близкое к 0, отражает отсутствие связи между сравниваемыми участками.

Этапы применения корреляционного анализа

1. Для упрощения анализа изображение сначала переводится в градации серого. Это позволяет свести анализ к одному каналу данных, уменьшая вычислительную нагрузку и устраняя влияние цвета, который не всегда связан с дефектами покрытия.

2. После преобразования в серое изображение проходит этап нормализации, на котором выравнивается его гистограмма. Этот шаг выполняется с целью улучшения контрастности, что позволяет более точно выявлять различия между текстурой дефектных и не дефектных областей. Выравнивание гистограммы часто производится на основе нормализации яркости пикселей по следующей формуле:

$$P_n = \frac{N_n}{N_g}, \quad (1)$$

где P_n – нормализованная интенсивность пикселя;

N_n – количество пикселей с интенсивностью n ;

N_g – общее количество пикселей.

3. Важным шагом является выбор эталонной области изображения, с которой будет проводиться сравнение. Эталонная область должна быть характерной для нормального состояния покрытия, т.е. лишенной дефектов и отражающей стандартные текстурные и гео-

метрические характеристики материала. Обычно она выбирается в виде фрагмента на участке покрытия, не имеющем видимых дефектов.

4. Основой корреляционного анализа является вычисление коэффициента корреляции между эталонной и исследуемой областями изображения. Этот коэффициент позволяет измерить степень структурного сходства и обнаружить даже небольшие отклонения в текстуре. Расчет проводится по формуле:

$$r = \frac{\sum(A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum(A_i - \bar{A})^2 \cdot \sum(B_i - \bar{B})^2}}, \quad (2)$$

где A_i и B_i – значения интенсивности пикселей в эталонной и исследуемой областях соответственно;

$\bar{A}$ и $\bar{B}$ – их средние значения.

Положительное значение r , близкое к 1, свидетельствует о высоком сходстве участков, т.е. об отсутствии дефектов. На рис. 2. представлен график коэффициентов корреляции при сравнении двух изображений покрытий.

5. После вычисления коэффициента корреляции проводится анализ его значений на различных участках покрытия. Наличие низких значений коэффициента (например, ниже заданного порогового значения) указывает на области с аномалиями, которые могут являться потенциальными дефектами. Пороговое значение корреляции определяется на основе опытных данных и позволяет различать нормальные отклонения от тех, которые действительно указывают на дефекты.

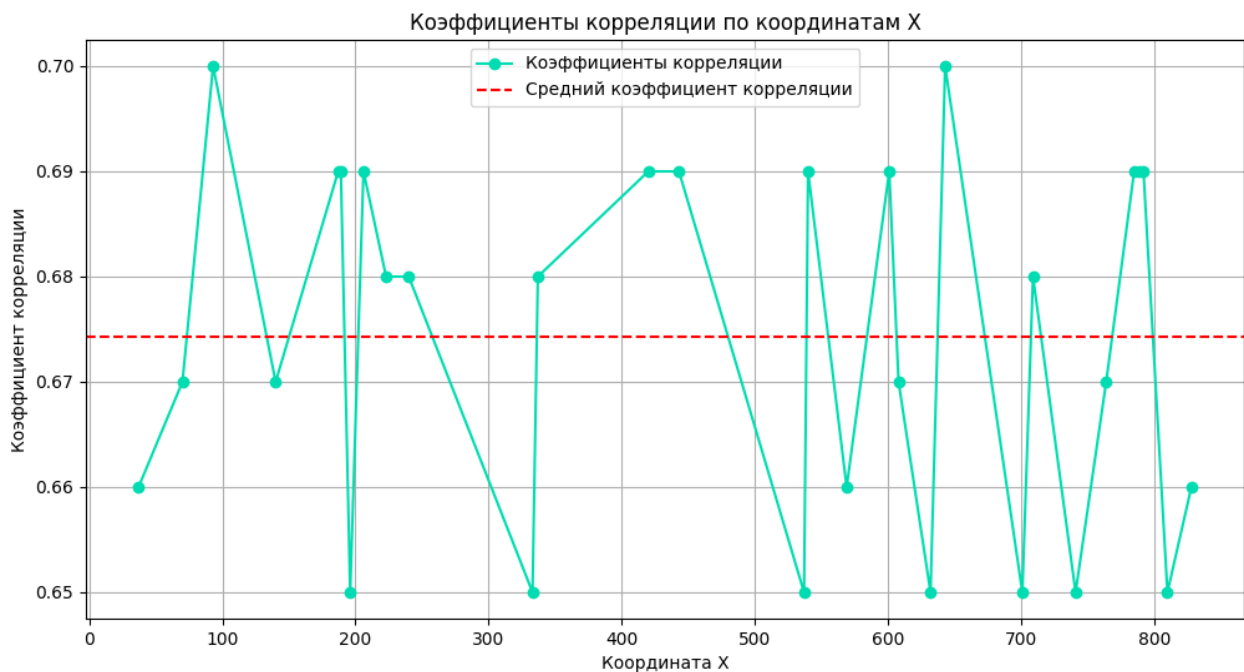


Рис. 2. Вычисленные коэффициенты корреляции блоков изображений

Fig. 2. Calculated correlation coefficients of image blocks

В автоматизированных системах контроля корреляционный анализ часто используется в реальном времени для непрерывного мониторинга качества покрытия. Например, отклонение коэффициента корреляции ниже установленного уровня может служить сигналом для остановки или замедления технологического процесса с целью устранения дефектов. Повышение же коэффициента выше нормы может свидетельствовать о чрезмерной плотности слоя, что также требует коррекции.

Пороговая сегментация – один из основных методов обработки изображений, который используется для выделения объектов или дефектов на изображении. Сегментация позволяет определить контуры дефектов и провести их анализ в зависимости от различных параметров: размера, формы и расположения.

Этапы применения пороговой сегментации

1. На этапе предобработки оригинального изображения (рис. 3, А) необходимо снизить шум, который может мешать корректному определению границ дефектов. Для этого можно использовать:

- медианную фильтрацию (рис. 3, Б), которая заменяет каждый пиксель медианой интенсивности пикселей в его окрестности. Медианная фильтрация эффективно устраняет мелкие шумы, сохраняя при этом контуры объектов;

Формула медианной фильтрации для пикселя $I_{(i,j)}$:

$$I_{(i,j)} = \{\text{median}(I_{(i+k,j+l)}) \mid (k,l) \in \mathcal{N}(i,j)\}, \quad (3)$$

где $\mathcal{N}(i,j)$ – окрестность пикселя (i,j) .

- размытие по Гауссу (рис. 3, В) также позволяет убрать шумы, но при этом контуры могут стать менее четкими, что нужно учитывать при выборе метода.

2. Определение оптимального порогового значения – ключевой этап сегментации. Возможные подходы включают:

- фиксированный порог – значение, заданное эмпирически или на основе предыдущих наблюдений (этот вариант подходит для однородных изображений, где интенсивность дефектов и фона стабильна (рис. 3, Г));
- метод Оцу, автоматический алгоритм выбора порога, минимизирующий внутриклассовую дисперсию и максимизирующий различие между областями интереса и фоном (рис. 3, Д):

$$t = \underset{t}{\operatorname{argmin}}(\sigma_b^2(t)), \quad (4)$$

где σ_b^2 – межклассовая дисперсия для порога t ;

- адаптивная пороговая сегментация (рис. 3, Е), где порог устанавливается для каждой части изображения, что особенно полезно при анализе изображений с неоднородным освещением или переменной текстурой.

3. После выбора порога производится бинаризация изображения:

$$D_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{(i,j)} \geq t; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где $I_{(i,j)}$ – интенсивность пикселя на позиции (i,j) ;

t – пороговое значение;

$D_{(i,j)}$ – результат бинаризации.

На выходе получается изображение, где области, соответствующие дефектам, выделяются как группы «активных» пикселей (белые области на черном фоне).

4. После пороговой сегментации на изображении выделяются контуры дефектов с помощью операторов Собеля, Кэнни и т.д. (рис. 4, А). Эти контуры позволяют получить границы и характеристики дефектных областей, такие как площадь, периметр и форма, которые можно использовать для дальнейшего анализа.

5. После сегментации и выделения контуров полученные данные можно обрабатывать для классификации дефектов по таким параметрам, как форма, размер, структура. Изображение после обнаружения контура показано на рис. 4, Б.

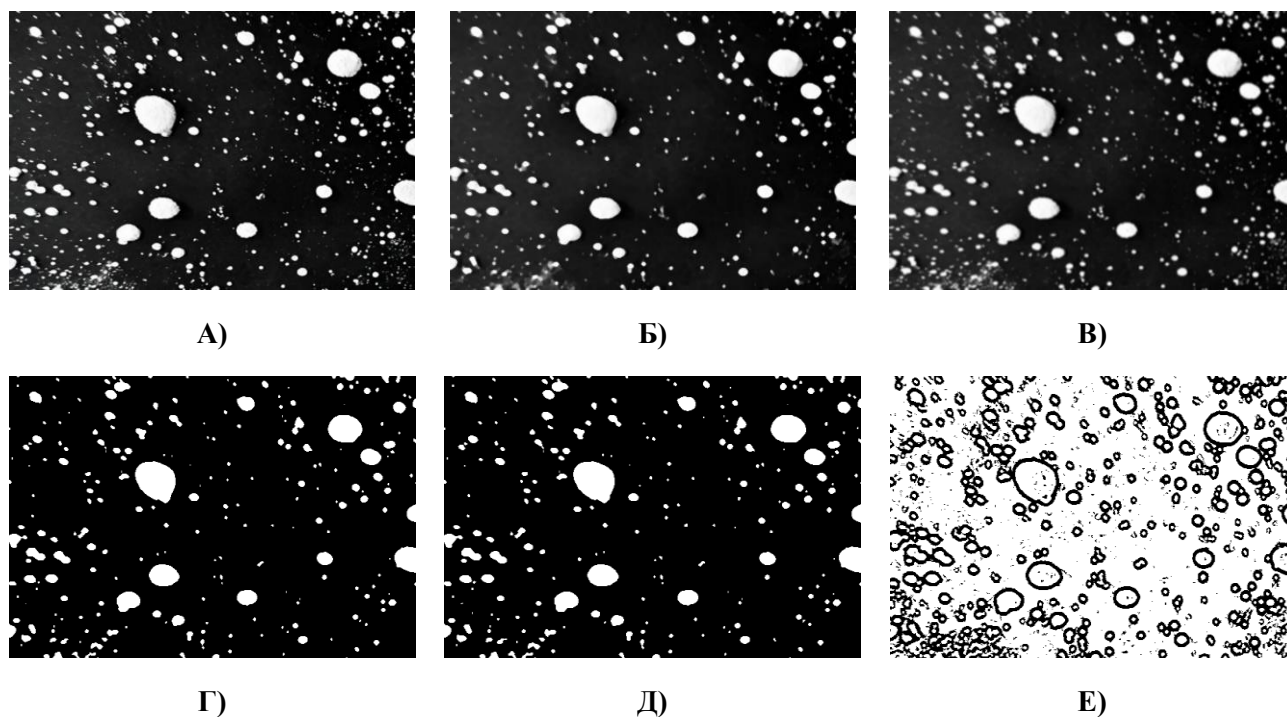


Рис. 3. А) Исходное изображение. Б) Результат предобработки исходного изображения с помощью медианной фильтрации.

В) Результат применения операции размытие по Гауссу.

Г) Результат пороговой сегментации с фиксированным порогом.

Д) Результат применения метода Оцу для сегментации изображения.

Е) Результат пороговой сегментации изображения с адаптивным порогом

Fig. 3. A) Original image. Б) Result of preprocessing the original image using median filtering.

В) Result of applying the Gaussian blur. Г) Result of fixed threshold segmentation.

Д) Result of applying Otsu's method for image segmentation.

Е) Result of adaptive threshold segmentation

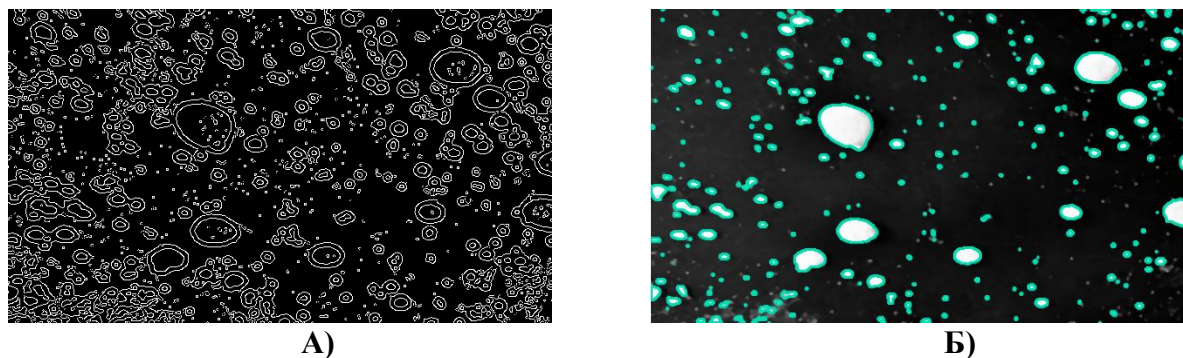


Рис. 4. А) Выделение контуров с помощью оператора Кэнни.

Б) Изображение с обнаруженными контурами дефектов

Fig. 4. A) Contours detection using the Canny edge detector.

Б) Image with detected defect contours

Схема алгоритма применения пороговой сегментации представлена на рис. 5, иллюстрирующем основные этапы: предобработку, выбор порога, пороговую сегментацию.

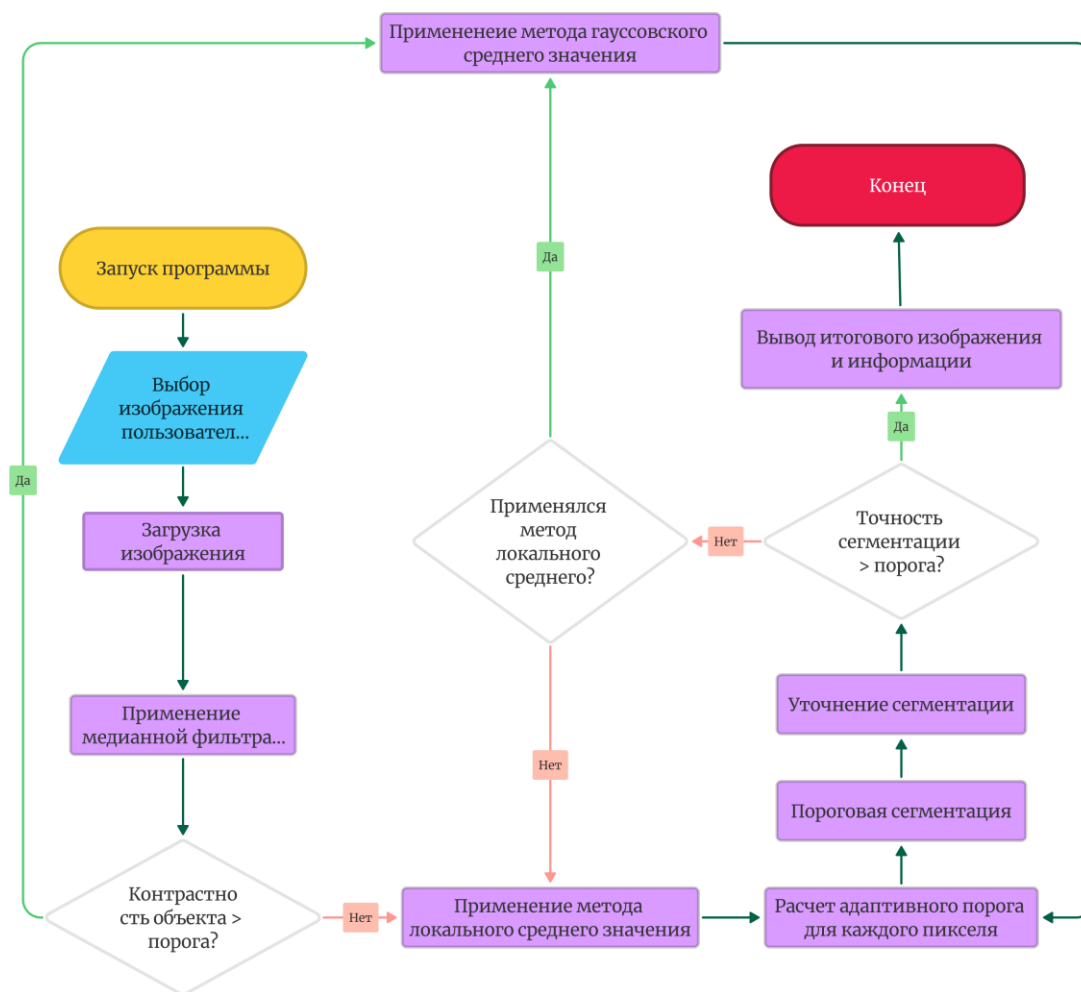


Рис. 5. Алгоритм применения пороговой сегментации

Fig. 5. Algorithm for applying threshold segmentation

Пороговая сегментация проста в реализации и позволяет быстро выявлять потенциальные дефекты на изображениях покрытий. Она подходит для автоматического контроля качества и анализа микроскопических изображений, где требуется высокая точность и четкость выделения объектов.

Морфологическая обработка изображений включает в себя различные операции, такие как эрозия, дилатация, открытие и закрытие, которые помогают улучшить качество изображения, выделяя дефекты и устраняя помехи. Этот метод используется для улучшения четкости и выделения мелких дефектов, которые могут быть трудно обнаружимы на исходном изображении.

Этапы применения морфологической обработки

1. *Перевод исходного изображения в бинарное.* Это позволяет разделить дефекты и фон и сделать дефекты более очевидными для последующей обработки. Бинаризация может быть выполнена с использованием метода пороговой сегментации (рис. 6, А).

2. *Применение морфологических операций.* Морфологические операции, такие как эрозия и дилатация, являются основными для выявления границ дефектов. Они помогают убирать шум и улучшать контуры объектов на изображении.

Эрозия (рис. 6, Б) – операция, которая уменьшает размер объекта, удаляя пиксели на его границе. Эта операция полезна для удаления мелких шумов, особенно тех, которые прилегают к объектам изучения. Формула эрозии для каждого пикселя:

$$E(X) = \{x \in X: B \subseteq X\}, \quad (6)$$

где X – бинарное изображение; B – структурный элемент.

Дилатация (рис. 6, В) – операция, расширяющая объект на изображении. Она используется для восстановления контуров объектов после эрозии и помогает усилить выделенные границы дефектов:

$$D(X) = \{x \in X: B \cap X \neq \emptyset\}, \quad (7)$$

где X – бинарное изображение; B – структурный элемент.

3. *Операции замыкания и открытия.* После эрозии и дилатации можно применить морфологические операции замыкания и открытия, чтобы лучше выделить и сгладить границы дефектов:

- открытие (рис. 6, Г) – это комбинация эрозии и дилатации, при которой сначала выполняется эрозия, а затем дилатация, оно позволяет удалить мелкие объекты и изолированные шумы;
- замыкание – это сначала дилатация, а затем эрозия, оно используется для закрытия небольших пробелов в контурах объектов (рис. 6, Д).

Формулы для операций открытия O и замыкания C :

$$O(X) = D(E(X)), C(X) = E(D(X)). \quad (8)$$

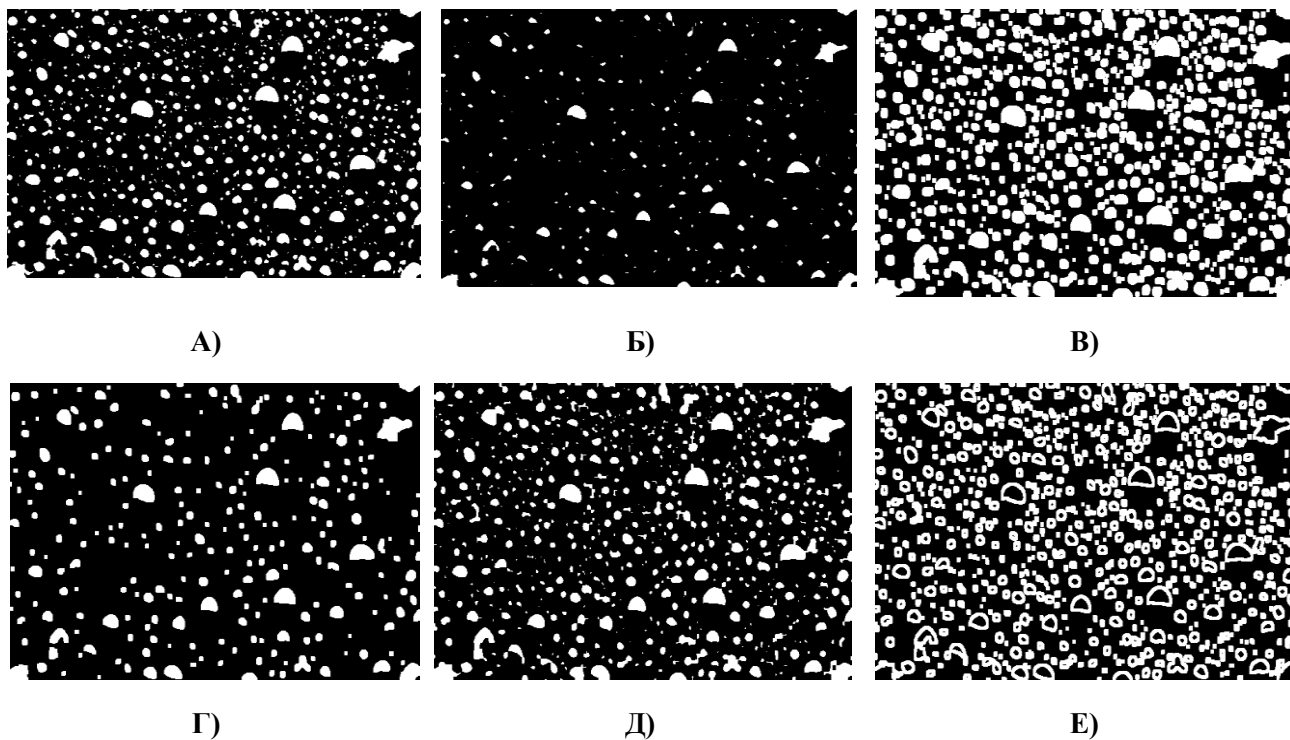


Рис. 6. А) Результат операции бинаризации. Б) Результат операции эрозии.
В) Результат операции дилатации.
Г) Результат операции открытия. Д) Результат операции замыкания.
Е) Результат применения морфологического градиента

Рис. 6. А) The result of the binarization operation. Б) The result of the erosion operation.
В) The result of the dilation operation.
Г) The result of the opening operation. Д) The result of the closing operation.
Е) The result of applying a morphological gradient

4. *Выделение границ с помощью оператора градиента.* Для окончательного выделения границ можно применить оператор морфологического градиента, который вычисляет разницу между дилатированным и эродированным изображением. Этот метод позволяет получить четкие контуры объектов, что особенно полезно при анализе границ дефектов:

$$G(X) = D(X) - E(X). \quad (9)$$

Результат применения градиентного оператора показан на рис. 6, Д, где границы дефектов выделены более отчетливо.

5. *Анализ геометрических характеристик дефектов*, таких как площадь, периметр и форма, что помогает классифицировать типы дефектов.

Результаты

Для документирования результатов анализа формируется таблица, в которой фиксируются характеристики выделенных дефектов: координаты, площадь, периметр и эксцентриситет (табл. 1).

Таблица 1.
Данные морфологического анализа

Table 1.
Morphological analysis data

№ дефекта	Площадь (пикс.)	Периметр (пикс.)	Эксцентриситет
1	12,00	16,00	1,00
2	17,50	17,41	1,00
3	19,50	19,41	0,99
4	39,50	25,41	1,00
5	36,00	24,49	0,53
6	34,00	21,66	1,00
7	78,00	35,66	1,00
8	141,00	76,77	1,00
9	72,00	42,49	0,86
10	153,50	46,73	0,98
11	109,50	41,07	0,94
12	48,00	28,00	1,00
13	135,00	44,14	0,57
14	294,00	65,46	0,77
15	63,50	31,07	1,00
16	28,00	22,00	1,00
17	499,50	88,87	0,93
18	46,00	26,83	0,99
19	46,00	26,83	0,95
20	501,50	134,18	0,87
21	588,50	184,47	1,00
22	112,00	42,49	0,99
23	119,00	41,31	0,86
24	76,50	33,07	0,00
25	886,00	238,37	0,99
26	106,00	56,49	0,23
27	270,00	75,46	0,53
28	45,00	25,66	0,06
29	35,50	23,41	0,00
30	710,00	141,74	0,99

Применение методов компьютерного зрения к изображениям композиционных покрытий показало свою высокую эффективность в выделении и характеристике дефектов. Применение операций эрозии, дилатации, замыкания и градиента позволило:

- получить четкие и полные контуры объектов;
- улучшить точность определения площади и периметра дефектов;
- повысить качество анализа структуры поверхности.

Результаты морфологического анализа подтверждают, что использование указанных операций способствует повышению точности последующей классификации дефектов.

Выводы

В результате проведенного анализа и применения корреляционного метода удалось выявить основные дефекты двухкомпонентных покрытий, включая трещины, пористость и неоднородности структуры. Расчет коэффициента корреляции показал высокую эффективность для автоматизированного определения отклонений, что позволило снизить вероятность субъективных ошибок и ускорить процесс контроля качества. Применение пороговой сегментации подтвердило возможность точного выделения дефектных участков, их классификации по размерам и форме, что важно для оценки влияния дефектов на эксплуатационные характеристики покрытия.

Таким образом, использование предложенных методов обработки изображений в сочетании с корреляционным анализом и пороговой сегментацией обеспечивает надежный контроль качества двухкомпонентных покрытий. Разработанные алгоритмы могут быть адаптированы для различных типов покрытий, что делает их универсальными и перспективными для промышленного применения. В будущем планируется расширить функционал системы за счет внедрения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования дефектов на ранних стадиях нанесения покрытий.

Библиографический список

1. **Бикмасов, Р.Г.** Применение базальтоволоконных композитных труб в качестве метода по защите от коррозии промысловых трубопроводных систем // Научно-практические исследования. 2021. № 2-2(37). С. 4-6. – EDN IBVCCR.
2. Патент № 2436868 С2 Российская Федерация, МПК С23С 30/00, В32В 18/00, F01D 1/00. Защищенный против коррозии компонент из композитного материала с керамической матрицей, содержащей кремний: № 2008139139/02: заявл. 03.04.2007: опубл. 20.12.2011 / К. Луше-Пуилльери, Э. Буйон, А. Тавиль [и др.]. – EDN EDGNXO.
3. **Чудакова, А.Ф.** Современные композитные материалы, применяемые в нефтяной промышленности для защиты от сероводородной коррозии / А.Ф. Чудакова, С.А. Сырбу, А.С. Митрофанов // Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. С. 127-132. EDN SWOWAO.
4. 05.07-19Б4.190 Синтез методом плазменного распыла и характеристика алюминиевого композита, усиленного углеродными нанотрубками // РЖ 19Б-4. Физическая химия (Кинетика. Катализ. Фотохимия. Радиационная химия. Плазмохимия). 2005. № 7. EDN HNBPN.
5. **Новиков, В.Ю.** Микроструктура и высокотемпературное окисление покрытия ZrB_2 - $MoSi_2$ - Y_2O_3 - Al на поверхности углерод-углеродных композитов / В.Ю. Новиков, М.Н. Япрынец, И.А. Павленко // Школа молодых новаторов: Сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 150-153. EDN FTIYMW.
6. **Филиппов, А.А.** Исследование влияния нанодисперсных частиц на механические свойства гетерогенного материала / А.А. Филиппов, Т.А. Борисова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2546-2547. EDN RUFGMDH.
7. **Поляков, В.В.** О дефектоскопии многослойных металлополимерных слоистых композитов системы Al -(ПЭНД- Al)- Al методом вихревых токов / В.В. Поляков, С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков [и др.] // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 133-138. EDN RBPXXF.
8. **Воропай, А.Н.** Получение наноструктурированных композитов на основе высокопористых углеродных матриц, наполненных Ni или $Ni(OH)_2$, и определение факторов, влияющих на их физико-химические свойства: специальность 02.00.04 «Физическая химия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. – Кемерово, 2015. – 133 с. EDN TNQPDD.

9. **Андрианова, Н.Н.** Исследование эмиссионных процессов и структуры поверхностного слоя материалов при высоких флюенсах облучения пучками атомарных и молекулярных ионов : специальность 01.04.08 «Физика плазмы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – М., 2008. – 22 с. – EDN MBNQHF
10. **Визильтер, Ю.В.** Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAC Vision / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь [и др.]. – Москва: ООО ДМК-пресс «Электронные книги», 2007. – 464 с. EDN RAZBZV.
11. **Bimrose, M.V.** Automatic detection of hidden defects and qualification of additively manufactured parts using X-ray computed tomography and computer vision / Miles V. Bimrose, Tianxiang Hu, Davis J. McGregor, Jiongxin Wang, Sameh Tawfick, Chenhui Shao, Zuozhu Liu, William P. King // Manufacturing Letters, Volume 41, Supplement, 2024, pp. 1216-1224.
12. **Baoya Wang.** A defect detection method for Akidzuki pears based on computer vision and deep learning / Baoya Wang, Jin Hua, Lianming Xia, Fangyuan Lu, Xia Sun, Yemin Guo, Dianbin Su // Postharvest Biology and Technology, Volume 218, 2024, pp. 113157.
13. **An Xinhao.** Computer vision-based substructure isolation method for localized damage identification / Xinhao An, Jilin Hou, Dengzheng Xu, Guang Dong // Structures, Volume 70, 2024, pp. 107660.

Дата поступления

в редакцию: 25.11.2024

Дата принятия

к публикации: 11.02.2025

УДК 534.01

EDN: ISPTZX

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА УСЛОВНОГО ЭКСТРЕМУМА ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ В АНАЛИЗЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПОТОКЕ

А.В. ЧернышовORCID: 0009-0005-3717-8333 e-mail: andrey.chernyshov5@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Обобщен и дополнен предложенный ранее метод условного экстремума фазовой скорости, введено понятие качественного и количественного изменения закона изменения состояния динамической системы, сформирована методологическая основа для использования этого метода. Полученная методологическая основа позволила разработать оригинальный подход к задаче исследования движения транспортного средства в потоке. Результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций по безопасному управлению транспортным средством, синтезу алгоритмов управления подвижными объектами, разработке тренажеров, оптимизации движительно-рулевого комплекса транспортных средств и пр.

Ключевые слова: условный экстремум фазовой скорости, годограф фазовой скорости, безопасный алгоритм управления.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернышов, А.В. Практические аспекты применения метода условного экстремума фазовой скорости в анализе движения транспортного средства в потоке // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 37-49. EDN: ISPTZX

PRACTICAL USES OF METHOD OF PHASE VELOCITY CONDITIONAL EXTREMUM IN ANALYSIS OF VEHICLE MOVEMENT IN TRAFFIC FLOW

A.V. ChernyshovORCID: 0009-0005-3717-8333 e-mail: andrey.chernyshov5@mail.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper generalizes and supplements the method of conditional extremum of phase velocity previously proposed by the author. The concept of qualitative and quantitative change in the law of change of state of a dynamic system is introduced and a methodological basis for using this method is formed. This made it possible to develop an original approach to the problem of studying the movement of a vehicle in a traffic flow. The results can be used in developing recommendations for safe vehicle control, synthesizing control algorithms for moving objects, developing simulators, optimizing the vehicle propulsion and steering systems and so on.

Key words: conditional extremum of phase velocity, phase velocity hodograph, safety control algorithm.

FOR CITATION: A.V. Chernyshov. Practical uses of method of phase velocity conditional extremum in analysis of vehicle movement in traffic flow. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 37-49. EDN: ISPTZX

Введение

Поиск методов исследования динамических свойств технических систем остается актуальным на протяжении более ста лет. За столь длительный период был разработан специализированный теоретический аппарат. Теория, которая изначально опиралась на аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, выделилась в отдельную научную дисциплину.

ну – теорию автоматического регулирования. Ее основы были заложены И.А. Вышнеградским и Д.К. Максвеллом, необходимо упомянуть также А.М. Ляпунова и его теорию устойчивости движения «в малом». Сформировались математически обоснованные и практически проверенные методы и подходы к исследованию линейных и нелинейных систем. В процессе накопления опыта и развития инструментов исследования у динамических систем обнаруживались различные особенности, важные для практического применения. Как справедливо было замечено И.В. Зубовым, «... необходимость разработки новых качественных и количественных методов исследования динамики систем, ... связана с поиском условий устойчивого, надежного и безопасного функционирования сложных динамических систем» [1].

Один из наиболее удобных и наглядных методов исследования динамических систем на плоскости является метод фазовой плоскости [2]. Под динамической системой понимается любой объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени, и задан закон, который описывает изменение (эволюцию) начального состояния с течением времени. Фазовая плоскость образуется декартовой системой координат, по осям которой откладываются координаты состояния или их производные (рис. 1). Будем рассматривать класс объектов, динамика которых описывается двумя автономными дифференциальными уравнениями первого порядка с непрерывными на всей фазовой плоскости правыми частями, которые имеют непрерывные первые производные:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = P(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = Q(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

Пара (x, y) определяет на фазовой плоскости состояние системы в определенный момент времени. Дифференциальные уравнения (1) задают закон изменения координат состояния динамической системы. Решение уравнения, при заданных начальных условиях (x_0, y_0, t_0) , есть кривая, заданная параметрическим уравнением $l = F(x, y)$, где $x = f_1(x_0, y_0, t)$, $y = f_2(x_0, y_0, t)$. Такая кривая называется фазовой траекторией или интегральной кривой. Изображающая точка движется вдоль фазовой траектории. Скорость v , с которой изображающая точка пробегается по фазовой траектории называется фазовой скоростью, модуль которой вычисляется по формуле: $v = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$. В стационарных точках

(точка m_3 на рис. 1) $\frac{dx}{dt} = 0$ и $\frac{dy}{dt} = 0$, поэтому фазовая скорость $v = 0$.

В [3] было показано, что на фазовой плоскости динамической системы могут быть выделены области с различным типом движения изображающей точки (по сути, речь идет о фазовом ускорении вдоль фазовой траектории; области различного типа движения изображающей точки – те, где ускорение имеет разные знаки): ускоренным и замедленным (области A и D на рис. 1).

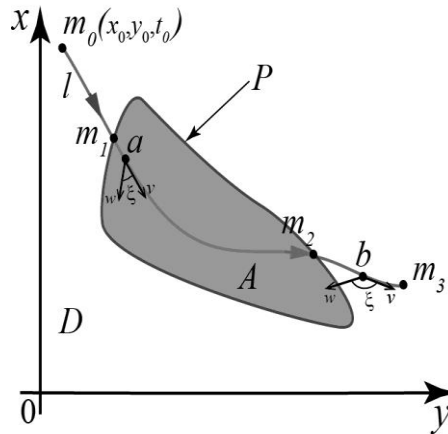


Рис. 1. Интегральная кривая l на фазовой плоскости.

Области ускоренного (A) и замедленного (D) движений изображающей точки, граница (P) между ускоренным и замедленным типами движений

Fig. 1. Trajectory l above the phase plane.

Areas of accelerated (A) and decelerated (D) types of motion of representative point, border line (P) of accelerated and decelerated types of motions

Суть предлагаемого метода заключалась в замене изображающей точки материальной с единичной массой и рассмотрении кинематики криволинейного движения. Предполагалось, что материальная точка перемещается по криволинейной траектории со скоростью v и ускорением w в плоскости xOy под действием условных обобщенных сил. В зависимости от угла между вектором скорости и ускорения выбирался тип движения: если угол ξ острый – ускоренное (точка a , рис. 2), и замедленное (точка b , рис. 2), если угол ξ тупой. Действительно, вектор ускорения w , с которым движется материальная точка, раскладывается на две составляющие: касательную w_τ и нормальную w_n (рис. 2). Скорость и касательное ускорение связаны формулами (ρ – кривизна траектории):

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= w_\tau \\ w_n &= \frac{v^2}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

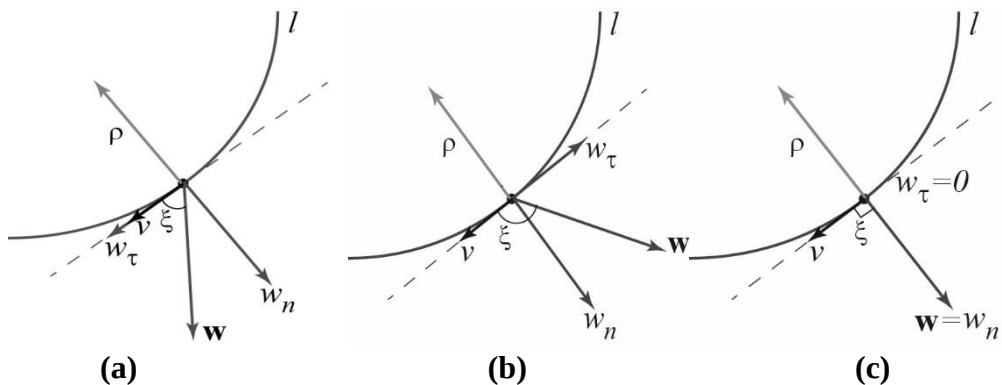


Рис. 2. К выбору типа движения изображающей точки: (a) – ускоренное; (b) – замедленное;

(c) – граница между ускоренным и замедленным движением $w_\tau = 0$, $\xi = \pm \frac{\pi}{2}$

Fig. 2. Towards the choice of the type of motion of representative point: (a) – accelerated;

(b) – decelerated; (c) – border line of the accelerated and decelerated motions $w_\tau = 0$, $\xi = \pm \frac{\pi}{2}$

Интуитивно понятно, что граница между ускоренным и замедленным движением (P на рис. 1) соответствует равномерному движению, т.е., если $\xi = \pm \frac{\pi}{2}$, то $w_\tau = 0$ (рис. 2с). Фактически граница P или условие $\xi = \pm \frac{\pi}{2}$ определяет на фазовой плоскости геометрическое место критических точек, в которых $\frac{dv}{dt} = 0$ и, одновременно, $v \neq 0$. Если при каких-либо начальных условиях $l \cap P$, то найдутся точки (m_1 и m_2 , рис. 1), которые могут являться экстремумом фазовой скорости на $l = F(x, y)$ (такой экстремум в математическом анализе называется *условным* или *относительным* [4]), т.е. сформируется множество $M = \{m_1, m_2\}$. Рассмотрим выполнение необходимых и достаточных условий существования условного экстремума в точках m_1 и m_2 (рис. 1). Для этого будем использовать усовершенствованный метод фазовой плоскости [5], суть которого заключается в построении годографа фазовой скорости $G = \hat{F}\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right)$ в декартовой системе координат $\frac{dx}{dt} O \frac{dy}{dt}$ (рис. 3) и поиска *точек касания* изолиний фазовой скорости и G . Годограф фазовой скорости – кривая G , вычерченная концом радиус-вектора R :

$$R = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{dx}{dt} = R \cos(\varphi)$$

$$\frac{dy}{dt} = R \sin(\varphi)$$

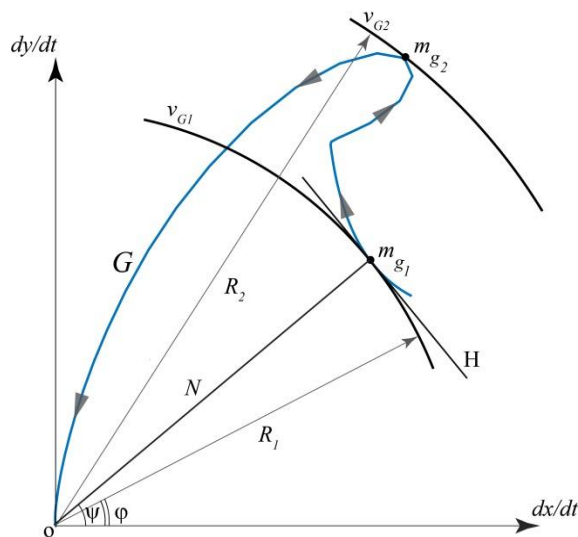


Рис. 3. Годограф фазовой скорости. На участке $m_{g_1} - m_{g_2}$ изображающая точка движется ускоренно (находится в области А фазовой плоскости). Радиус-векторы R_i , проведенные к точкам m_{g_i} , располагаются на одной прямой с соответствующими нормальными N

Fig. 3. Phase velocity hodograph. At the part of trajectory $m_{g_1} - m_{g_2}$ representative point has accelerated motion (the point is in the A). Radius-vectors R_i , traced to the m_{g_i} , are in the common line and it have own normal N

Формирование множества, определяющего закон изменения состояний динамической системы

Понятие состояния (S) является одним из ключевых в теории управления. Для подвижных объектов состояние, как правило, описывается координатами материальных точек и их скоростями. Такое описание должно быть достаточным для того, чтобы определить его дальнейшее изменение (закон изменения) по нему самому.

Множество $V = \{v_{G_1}, \dots, v_{G_k}\}$ - множество изолиний $v = c_i, (c_i \in \mathbb{R}, c_i > 0)$ на плоскости $\frac{dx}{dt} O \frac{dt}{dt}$. Очевидно, что это окружности радиуса $R = \sqrt{c_i}$ с центром в точке $O(0,0)$. Отметим точки касания изолинии и годографа $G : M_G = \{m_{g_1}, \dots, m_{g_n}\}$ (рис. 3: т. m_{g_1}, m_{g_2}). Проанализируем точки касания на выполнение необходимого условия существования условного экстремума. Известно, что необходимое условие выполняется в тех критических точках, в которых градиенты функций коллинеарны. Таким образом, в рассматриваемой задаче проверим коллинеарность ∇G и ∇v в *общей точке касания*, т.е., другими словами, радиус-вектор R_i и нормаль N должны быть расположены на одной прямой. Принимая во внимание, что изолинии v_{G_i} – окружности, сделаем вывод, что радиус R , проведенный в точку касания, ортогонален касательной H и расположен на одной прямой с нормалью к v_{G_i} . В то же время нормаль в точке касания есть ∇G . Поскольку H – общая касательная, ∇G и ∇v расположены на одной прямой и $tg(\varphi) = tg(\psi)$ (рис. 3). Таким образом, *необходимое* условие условного экстремума для множества M_G выполняется.

Используя формулы из [3], выведем критерий, для $\xi = \pm \frac{\pi}{2}$:

$$\arccos \left(\frac{\frac{d^2 x}{dt^2}}{\sqrt{\left(\frac{d^2 x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{dt^2}\right)^2}} \right) \pm \arccos \left(\frac{\frac{dx}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}} \right) = \pm \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Для проверки на *достаточность* убедимся, что в т. m_{g_i} именно касание, а не перегиб (рис. 4). Методы анализа графиков функций на наличие точек перегиба хорошо известны. Для использования на практике, когда неизвестна математическая модель, предлагаем выполнять проверку на достаточность путем проверки величины $\Delta R = R(\varphi_g) - R(\varphi_i), i=1,2$ (рис. 4) на смену знака при переходе через точку m_g . После проверки на достаточность сформируем множество $\bar{M}_G \subseteq M_G$, на котором выполнено достаточное условие условного экстремума.

Каждому элементу множества $\bar{M}_G$ соответствует элемент множества V . Выписав пары $(m_{g_i}, R(v_{G_i}))$ в хронологическом порядке и сравнив значения $R(v_{G_i})$ для каждой пары, определим условные минимумы или максимумы.

Годограф фазовой скорости G получается путем непрерывного отображения l на плоскость $\frac{dx}{dt} O \frac{dt}{dt}$. Также верно, что существует непрерывное отображение для множества $V = \{v_{G_1}, \dots, v_{G_k}\}$ на плоскость xOy . Таким образом, если на G найдутся точки условного экстремума (общие для G и V), то эти точки будут отражены на l , т.е. существует непрерывное отображение $f : \bar{M}_G \rightarrow M$. Пары $(m_i, R(v_{G_i}))$, которые содержат координаты m_i и ее скорости $R(v_{G_i})$, могут быть использованы для описания изменения состояния динамической системы.

Достаточность такого описания определяется тем, что пары $(m_i, R(v_{G_i}))$ на фазовой траектории образуют геометрическое место точек, фазовая скорость которых принимает экстремальные значения. Множество, сформированное парами $(m_i, R(v_{G_i}))$, задает закон изменения состояний вдоль траектории.

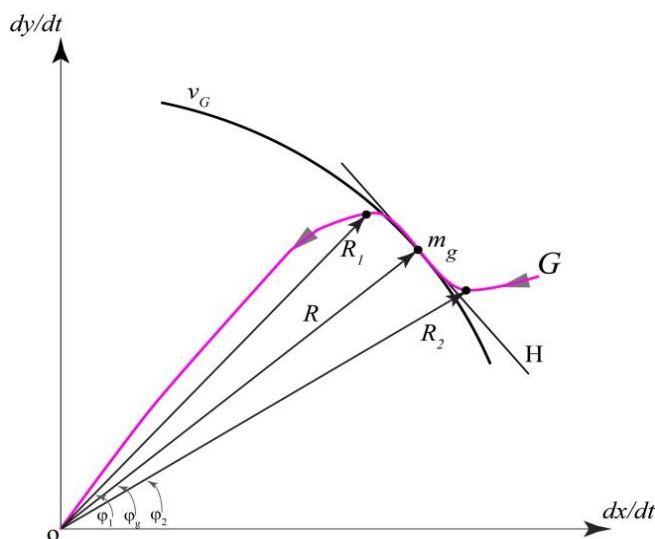


Рис. 4. Необходимое условие условного экстремума выполнено, а достаточное нет: в точке касания перегиб G . При переходе через точку m_g происходит смена знака ΔR

Fig. 4. The necessary criterion of the conditional extremum is fulfilled, but the sufficient criterion is not: there is an inflection G at the point of contact. The ΔR sign changes when passing through a point m_g

Методология оценки изменений закона, определяющего смену состояний динамических систем методом условного экстремума фазовой скорости

Продemonстрируем применение метода условного экстремума для оценки изменения закона, определяющего смену состояния динамической системы второго порядка методом условного экстремума фазовой скорости:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ax + by \\ \frac{dy}{dt} = cx + dy \end{cases} \quad (4)$$

На фазовой плоскости интегральные кривые могут быть в виде спирали (стационарное состояние – фокус (стационарное состояние «узел» топологически эквивалентно «фокусу»)), седла, эллипса (предельный цикл). Вид интегральных кривых определяется корнями λ_1, λ_2 характеристического уравнения системы (4), которые, в свою очередь, зависят от коэффициентов (a, b, c, d) [6]. Рассмотрим, для примера, случай, когда $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ и $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} < 0$

(особая точка – седло). Система (4) может быть приведена к каноническому виду:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = \lambda_1 \bar{x} \\ \frac{d\bar{y}}{dt} = \lambda_2 \bar{y} \end{cases} \quad (5)$$

Деля одно уравнение на другое и интегрируя, получим уравнение интегральной кривой:

$$\bar{y} = C|\bar{x}|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (6)$$

Фазовая скорость есть функция правых частей дифференциального уравнения, описывающего динамику системы. Для (5) запишем:

$$v = \sqrt{\left(\frac{d\bar{x}}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{y}}{dt}\right)^2} = \sqrt{(\lambda_1 \bar{x})^2 + (\lambda_2 \bar{y})^2}$$

Геометрическое место критических точек фазовой скорости найдем из условия $\frac{dv}{dt} = 0, v \neq 0$:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial \bar{x}} \lambda_1 \bar{x} + \frac{\partial v}{\partial \bar{y}} \lambda_2 \bar{y} = -\frac{\lambda_1^3 \bar{x}^2 + \lambda_2^3 \bar{y}^2}{\sqrt{(\lambda_1 \bar{x})^2 + (\lambda_2 \bar{y})^2}} = 0, \quad \bar{x} \neq 0, \bar{y} \neq 0 \quad (7)$$

На фазовой плоскости экстремумы фазовой скорости будут расположены на прямых, задаваемых уравнением $\frac{dv}{dt} = 0$ или $p(x, y) = \lambda_1^3 \bar{x}^2 + \lambda_2^3 \bar{y}^2 = 0$ (рис. 5). Прямые $p(x, y) = 0$ – границы областей ускоренного (A) и замедленного (D) движений изображающей точки. Точка пересечения фазовой траектории (рис. 5а: т. m_1) с $p(x, y)$ – условный экстремум. Критические точки можно найти аналитически, как общие точки интегральной кривой и $p(x, y)$:

$$C|\bar{x}|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} = -\frac{\lambda_1^3}{\lambda_2^3} \bar{x}^2$$

Получение аналитического решения методом множителей Лагранжа для нашего примера нецелесообразно, так как уравнение связи можно представить в виде $\bar{y} = f(\bar{x})$ и, поэтому, поиск условного экстремума сводится к поиску обычного экстремума подстановкой (6) в (7). Данный алгоритм здесь не приводится, так как он идентичен поиску условий общих точек интегральной кривой и $p(x, y)$.

Для случая $\bar{x} > 0$:

$$\bar{x}^{2\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}-1\right)} = -\frac{\lambda_1^3}{\lambda_2^3} C \quad \text{или} \quad \bar{x} = \sqrt[n]{-\frac{\lambda_1^3}{\lambda_2^3} C}, \quad \text{где } C - \text{константа интегрирования,}$$

$n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 < 0$. Таким образом, на каждой интегральной кривой существует один экстремум.

Годограф фазовой скорости изображен на рис. 5б. Фазовая скорость в условном экстремуме определяется радиусом r (рис. 5б).

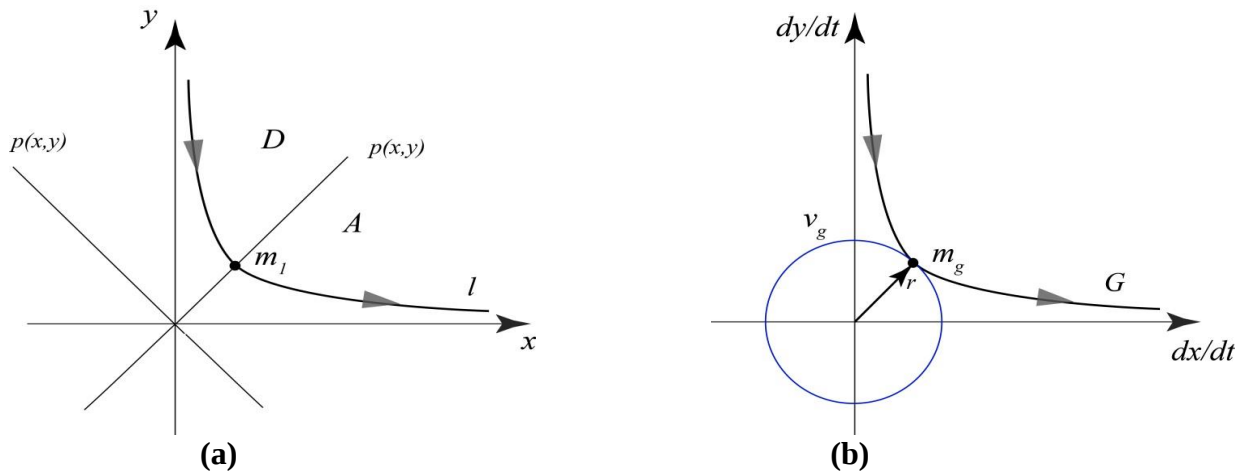


Рис. 5. К определению множества (m_1, r) системы (4)

Fig. 5. Towards the definition of the set (m_1, r) of the system (4)

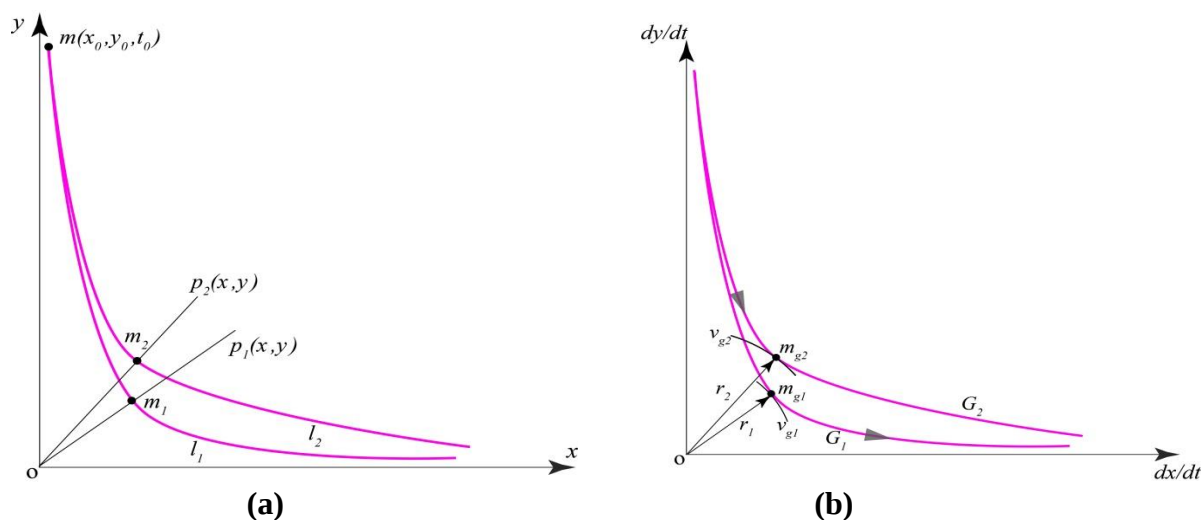


Рис. 6. Качественное изменение состояния динамической системы при изменении коэффициентов модели: в т. m_1 условного экстремума кривой l_1 фазовая скорость равна r_1 , а в т. m_2 условного экстремума кривой l_2 фазовая скорость равна r_2

Fig. 6. Qualitative change in the state of a dynamic system due to variation of the model coefficients: at the point m_1 of the conditional extremum of the curve l_1 the phase velocity is equal to r_1 , and at the point m_2 of the conditional extremum of the curve l_2 the phase velocity is equal to r_2

Допустим, в динамической системе (4) произошли изменения, что нашло отражение в изменении коэффициентов (a, b, c, d) . Обозначим исходный набор коэффициентов (a_1, b_1, c_1, d_1) , а измененный (a_2, b_2, c_2, d_2) . Далее будем рассматривать две траектории l_1 и l_2 , выпущенные из одной точки фазовой плоскости (рис. 6а). Траектория l_1 – решение (4), если коэффициенты равны (a_1, b_1, c_1, d_1) , l_2 – если (a_2, b_2, c_2, d_2) . Закон изменения состояний динамической системы для первого случая определен парой (m_1, r_1) , а для второй – (m_2, r_2) . Закон изменения состояний динамической системы изменился *качественно*, так как число экстремумов осталось прежним, изменилось только значение фазовой скорости (рис. 6).

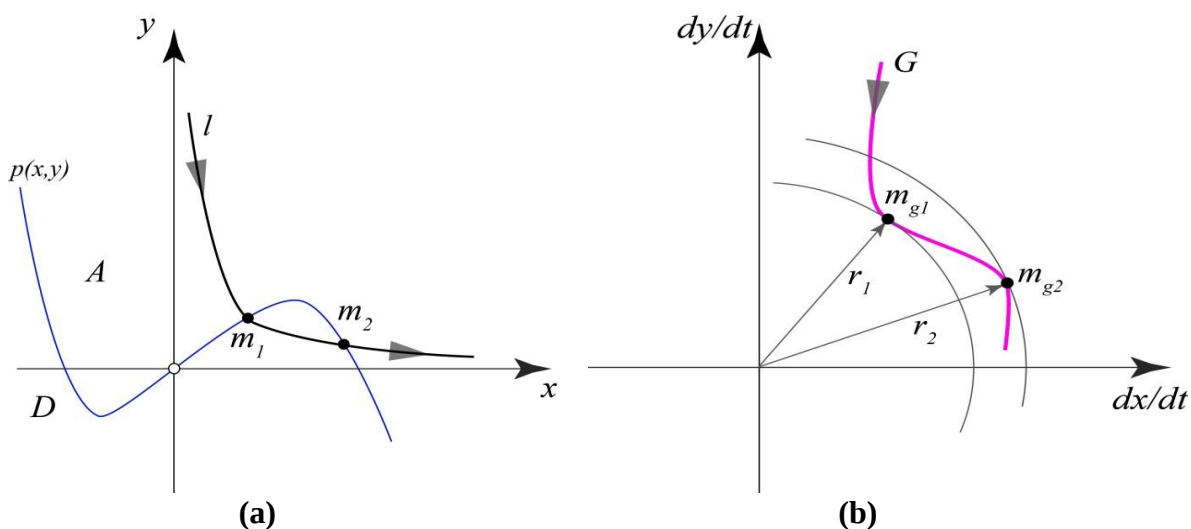


Рис. 7. Количественные изменения в динамике системы: состояние системы определяется двумя парами: (m_1, r_1) и (m_2, r_2)

Fig. 7. Quantitate changes in the dynamics of the system: the state of the system is determined by two pairs: (m_1, r_1) и (m_2, r_2)

Пусть в процессе эксплуатации система (4) изменилась:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = \lambda_1 \bar{x} + \bar{x}^2 \\ \frac{d\bar{y}}{dt} = \lambda_2 \bar{y} \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение интегральной кривой системы (8):

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \frac{\lambda_2 \bar{y}}{\bar{x}(\lambda_1 + \bar{x})}$$

Интегралы табличные, поэтому запишем:

$$y = C \left| \frac{\lambda_1 + \bar{x}}{\bar{x}} \right|^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (9)$$

Геометрическое место критических точек фазовой скорости $\left(\frac{dv}{dt} = 0 \right)$:

$$p(x, y) = (\lambda_1 + 2\bar{x})(\lambda_1 \bar{x} + \bar{x}^2)^2 + \lambda_2^3 \bar{y}^2 = 0 \quad (10)$$

Если $\frac{\lambda_1 + \bar{x}}{\bar{x}} > 0$, то подставляя (9) в (10):

$$p(x, y) = (\lambda_1 + 2\bar{x})(\lambda_1 \bar{x} + \bar{x}^2)^2 + C \lambda_2^3 \left(\frac{\lambda_1 + \bar{x}}{\bar{x}} \right)^{2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} = 0$$

На рис. 7а показана рассчитанная численно кривая $p(x, y)$ для системы (8). Построив годограф фазовой скорости (рис. 7b), определим точки условного экстремума сначала на годографе, а затем отобразим их на фазовую плоскость (рис. 7а). В итоге вместо одной пары (m_1, r_1) получим две: (m_1, r_1) и (m_2, r_2) , характеризующие новый закон изменения состояний динамической системы. Это *количественное* изменение.

Практическое приложение предлагаемой методологии

Оценка закона изменения состояния методом условного экстремума фазовой скорости – универсальный метод, применимый для анализа различных динамических систем. В частности, он может быть использован для решения задачи синтеза алгоритмов управления подвижными объектами, обеспечивающими безопасное передвижение в потоке. Новизна подхода к решаемой задаче заключается в характеристике синтезируемого «безопасного алгоритма». Термин «безопасный алгоритм управления» в специальной литературе однозначно не определен, хотя в большинстве случаев он интуитивно понятен. В задачах управления подвижными объектами он может трактоваться как управление, обеспечивающее минимум (ли отсутствие) аварий. В данной работе «безопасный алгоритм» связывается с безопасным стилем вождения. Учитывая, что термин «стиль вождения» является устоявшимся и используется преимущественно в рамках социально-психологических исследований, в статье вводится термин «динамика объекта в потоке», который объединяет динамические характеристики транспортного средства и стиль вождения, определяясь психоэмоциональным состоянием водителя, а также другими характеристиками личности, имеющими отношение к процессу управления автомобилем.

Автомобиль управляется человеком-оператором (водителем), который формирует индивидуальный алгоритм управления. Очевидно, что алгоритм управления не может быть одинаковым для всех ТС, движущихся в потоке, так как на его формирование оказывают влияние: психоэмоциональное состояние водителя [7], конструктивные и динамические осо-

бенности транспортного средства. В то же время, на все без исключения ТС в потоке действуют общие ограничения в виде правил дорожного движения, априорной мотивации водителя [8], светофоров, перекрестков и пр. Таким образом, движение ТС в потоке *упорядоченное* (это утверждение имеет место на интервале времени). Порядок тем выше, чем «плотнее» движение. Рассмотрение транспортного потока с точки зрения упорядоченности в данной статье подробно не освещается. Отметим, что энтропийный подход не является новым и был использован, например, в [8]. Упорядоченное движение характеризуется невысокой (в пределе – нулевой) энтропией. Это значит, что транспортные средства, движущиеся в одном потоке, в каждый момент времени находятся в (почти) одинаковом состоянии. Можно предположить, что законы изменения ТС в одном упорядоченном потоке статистически одинаковые. Это, также, означает, что водитель так воздействует на управляющие органы ТС, чтобы закон изменения состояний совпадал с законом изменения состояний большинства ТС в потоке. Сформулируем определение: *безопасный алгоритм управления – алгоритм, при котором транспортное средство, двигаясь в потоке, не увеличивает энтропию.*

Таким образом, возникает ряд взаимодополняющих задач. Первая связана с необходимостью описания закона изменения состояния ТС, двигающихся в потоке. Вторая связана с синтезом алгоритма управления по известному закону изменения состояния. Третья задача – оценка технической возможности ТС к реализации безопасного алгоритма.

В данной работе мы подробно остановимся на решении первой задачи. Ранее было предложено описывать состояние динамической системы парой $(m_i, R(v_{G_i}))$ или $(m_{g_i}, R(v_{G_i}))$. Рассмотрим движение в транспортном потоке (подобные задачи рассматриваются в теории массового обслуживания, теории игр и др. [9, 10]). Траектория движения – кривая на плоскости географических координат X-Y. Кривая строится по точкам, которые могут быть получены, например, по данным GPS-приемника. Для этого в процессе эксперимента использовался туристический навигатор GARMIN, который фиксировал путевые точки с постоянным шагом, равным 1 сек. После обработки массив точек был нанесен на плоскость X-Y (рис. 8).

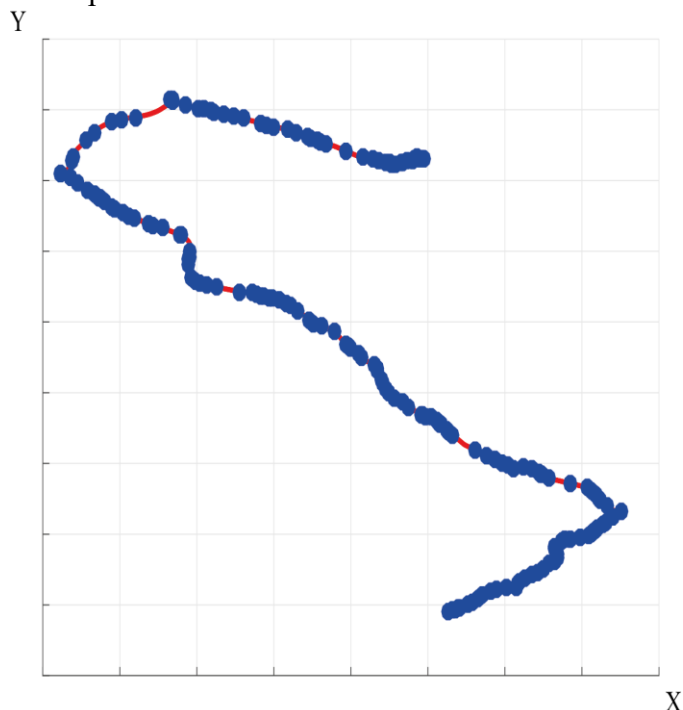


Рис. 8. Часть трассы «Дзержинск – Ардатов».

*Траектория движения транспортного средства на плоскости географических координат.
Точками нанесены экстремумы фазовой скорости*

Fig. 8. Part of the Dzerzhinsk – Ardatov route.

*The trajectory of the vehicle on the plane of geographic coordinates.
The dots indicate the phase velocity extremes*

Пары $(m_i, R(v_{G_i}))$ наносятся на траекторию. Однако использование фазовой плоскости в данном случае не наглядно. Удобнее использовать плоскость годографа фазовой скорости $\frac{dx}{dt} O \frac{dy}{dt}$, на котором экстремумы фазовой скорости – множество (облако) точек (S). Фазовая скорость (скорость движения ТС вдоль траектории) на плоскости годографа задается окружностями радиуса $R(v_{G_i})$. Выполним сегментирование плоскости годографа окружностями, выбрав, предварительно, диапазоны фазовых скоростей (рис. 9). После этого, в качестве топологического описания облака S будем рассматривать полигон частот распределения точек в соответствующих кольцах (рис. 10).

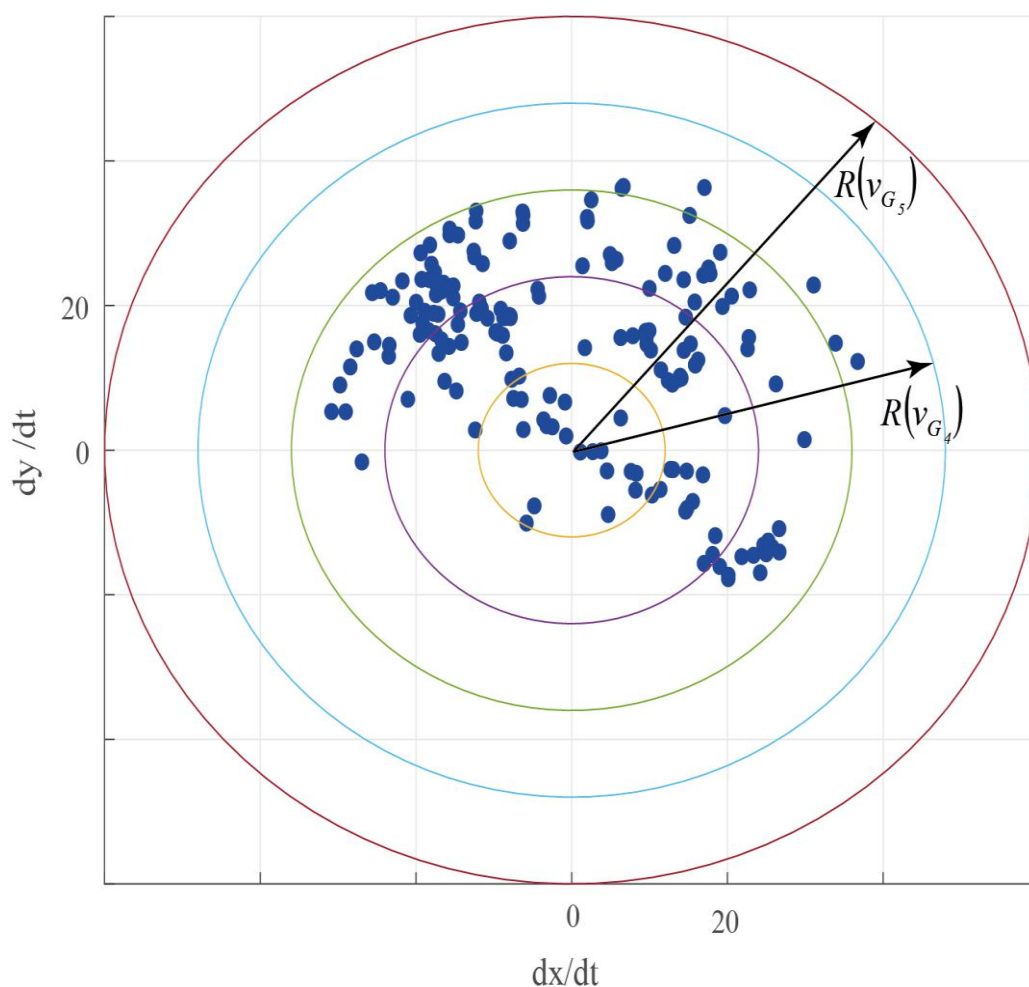


Рис. 9. Облако точек S на сегментированной плоскости годографа фазовой скорости (при движении по трассе на рис. 8)

Fig. 9. Cloud of points S on the segmented plane of the phase velocity hodograph (when moving along the route on fig. 8)

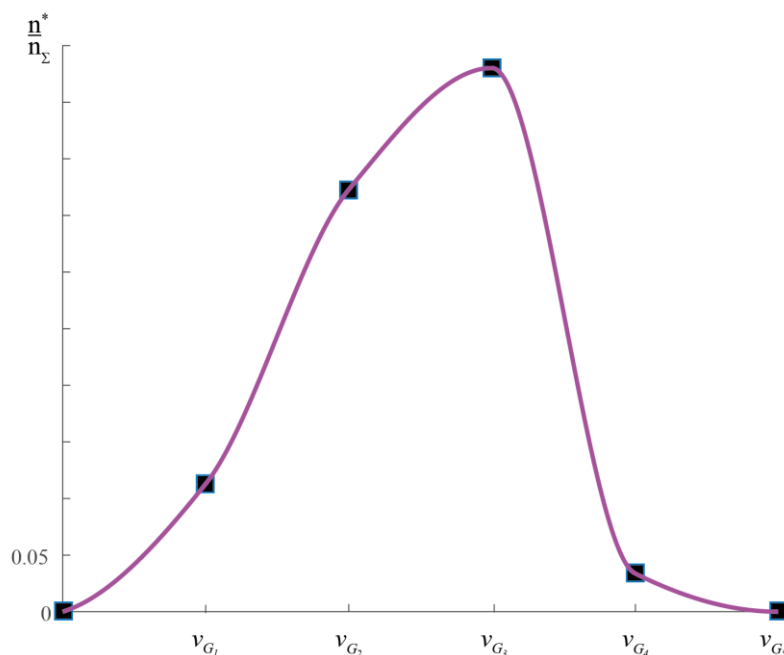


Рис. 10. Полигон частот распределения условных экстремумов фазовой скорости – топологическое описание облака точек рис. 9:

n^* – число точек в i -м кольце, n_Σ – общее число точек в облаке

Fig. 10. Polygon of frequency distribution of conditional extremum of phase velocity is a topological description of cloud of points in fig. 9:

n^* is the number of points in the i -th segment, n_Σ is the total number of points in the cloud

Заключение

Топологическое описание облака точек, полученное при анализе движения транспортного средства, характеризует закон изменения его состояния. Экспериментально подтверждено, что при движении за городом на разных участках (в светлое время суток в будни), на разных легковых автомобилях, управляемыми разными водителями (стаж не менее 15 лет) кривая распределения точек в облаке имеет форму рис. 10. Это подтверждает предположение о том, что в упорядоченном потоке ТС законы изменения состояний отдельных элементов совпадают.

Метод условного экстремума фазовой скорости применительно к задаче исследования движения транспортного средства в потоке позволяет найти общий для всех ТС закон изменения состояний выбранном участке трассы. Результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций по безопасному управлению транспортным средством, синтезу алгоритмов управления подвижными объектами, разработке тренажеров, оптимизации движительно-рулевого комплекса транспортных средств и пр.

Библиографический список

1. **Зубов, И.В.** Методы анализа динамики управляемых систем / И.В. Зубов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 224 с.
2. **Андронов, А.А.** Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1959. – 916 с.
3. **Chernyshov A.V., Chernyshova S.A.** A method of investigating the phenomenon of bifurcation memory in the dynamics of river vessels. Russian Journal of Nonlinear. Dynamics. 2022. V. 18. № 2. Pp. 171-181. DOI: 10.20537/nd220202
4. **Зорич, В.А.** Математический анализ. Часть I. / В.А. Зорич. – М.: МЦНМО, 2019. – 564 с.

5. **Чернышов, А.В.** Совершенствование метода фазовой плоскости для исследования влияния эффекта «бифуркационной памяти» на динамику корабля / А.В. Чернышов, С.А. Чернышова // Изв. РАН. МТТ. 2024. № 1. С. 38-47. DOI: 10.31857/S0572329923600111
6. **Андронов, А.А.** Качественная теория динамических систем второго порядка / А.А. Андронов, Е.А. Леонтович, И.И. Гордон, А.Г. Майер. – М.: Наука, 1966. – 568 с.
7. **Лобанова, Ю.И.** Вождение – как деятельность, поведение и стилевая характеристика // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. 2014. Т. 5. № 4. С. 97-107.
8. **Колесниченко, А.В.** Конструирование энтропийной транспортной модели на основе статистики Тсаллиса // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 33. 23 с.
9. **Малинецкий, Г. Г.** Дорожное движение в контексте фундаментальных исследований / Г.Г. Малинецкий, В.В. Семёнов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2007. № 64. 29 с.
10. **Гасников, А.В.** Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / А.В. Гасников. – М.: МЦНМО, 2012. – 376 с.

*Дата поступления
в редакцию:* 29.01.2025

*Дата принятия
к публикации:* 20.02.2025

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.586

EDN: FXXVYZ

ТЕСТИРОВАНИЕ МНОГОПЕТЛЕВОГО КОНТУРА В РЕЖИМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Н.А. Прибатурин

ORCID: 0009-0005-3861-6630 e-mail: nialp@ibrae.ac.ru

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

*Москва, Россия***П.Д. Лобанов**

ORCID: 0000-0002-3020-6021 e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

*Новосибирск, Россия***А.С. Курдюмов**

ORCID: 0000-0002-1833-0484 e-mail: kurdumov@itp.nsc.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

*Новосибирск, Россия***А.И. Светоносков**

ORCID: 0009-0000-3540-4070 e-mail: svetonosov.a.i@gmail.com

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

*Новосибирск, Россия***А.В. Чинак**

ORCID: 0000-0003-3011-7464 e-mail: chinak@mail.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирск, Россия

Приведены результаты тестирования стенда с жидкометаллическим теплоносителем, имеющего четыре циркуляционных контура, соединяющихся в верхней камере: один источник тепловыделения в виде семи-стержневого имитатора тепловыделяющей сборки и четыре теплообменника, отводящие тепло от каждого контура. Получены данные по режиму естественной циркуляции свинцово-висмутového расплава в двух- и четырехпетлевой циркуляционной системе, данные по изменению режима естественной циркуляции при нарушении отвода тепла от одной из циркуляционных петель.

Ключевые слова: реакторная установка, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, естественная циркуляция, многопетлевой контур, тепловыделяющая сборка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прибатурин, Н.А. Тестирование многопетлевого контура в режиме естественной циркуляции свинцово-висмутového теплоносителя / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, А.И. Светоносков, А.В. Чинак // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 50-58. EDN: FXXVYZ

TESTING OF MULTI-LOOP CIRCUIT IN NATURAL CIRCULATION MODE OF LEAD-BISMUTH COOLANT

N.A. Pribaturin

ORCID: 0009-0005-3861-6630 e-mail: nialp@ibrae.ac.ru

Nuclear Safety Institute RAS

Moscow, Russia

P.D. Lobanov

ORCID: 0000-0002-3020-6021 e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.S. Kurdyumov

ORCID: 0000-0002-1833-0484 e-mail: kurdumov@itp.nsc.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.I. Svetonosov

ORCID: 0009-0000-3540-4070 e-mail: svetonosov.a.i@gmail.com

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.V. Chinak

ORCID: 0000-0003-3011-7464 e-mail: chinak@mail.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents the results of test bench with a liquid metal coolant with four circulation circuits connected in the upper chamber: one heat source in the form of a seven-rod fuel assembly simulator and four heat exchangers removing heat from each circuit. Data on the mode of natural circulation of lead-bismuth melt in two- and four-loop circulation systems, as well as data on changes in the natural circulation mode when the heat transfer in one of the circulation loops is disrupted are obtained.

Key words: reactor plant, heavy liquid metal coolant, natural circulation, multi-loop circuit, fuel assembly.

FOR CITATION: N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Kurdyumov, A.I. Svetonosov, A.V. Chinak. Testing of multi-loop circuit in natural circulation mode of lead-bismuth coolant. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 50-58. EDN: FXXVYZ

Введение

Исследование процессов установления режима естественной циркуляции (ЕЦ) в контуре реакторной установки (РУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) и, собственно, работы замкнутого контура реактора в режиме ЕЦ – крайне важные задачи, поскольку их решения определяют основные положения обоснования безопасности РУ со свинцовым теплоносителем. Они не могут быть решены без знания теплогидравлических характеристик течения металлического теплоносителя при работе установки в режиме ЕЦ. В замкнутом контуре без использования насосов естественная конвекция действует как единственный возможный способ циркуляции жидкости.

Несмотря на высокий интерес к ЕЦ в РУ с тяжелым жидким металлом (свинцовый расплав, свинцово-висмутовый сплав), круг ее исследований при параметрах работы с

ТЖМТ все еще весьма ограничен. В научных центрах Италии и Германии [1-3] выполнены и продолжаются исследования режима ЕЦ демонстрирующие особенности естественной циркуляции в контуре с одной циркуляционной петлей для эвтектики *свинец – висмут*. В ряде случаев эксперименты были обеспечены пре-тестовыми и пост-тестовыми расчетами.

В работах [4-6] подробно изучен и описан режим ЕЦ свинцово-висмутового теплоносителя с целью получения экспериментальных данных и проверки кодов, включая CFD-модели. Эксперимент проведен на установке с замкнутым гидродинамическим контуром, состоящим из двух горячих и одной холодной ветки. В контуре используется жидкий эвтектический сплав свинца и висмута. ЕЦ в этих работах изучалась на установке с двумя последовательно соединенными петлями. Основной контур состоял из бака-аккумулятора со свинцово-висмутовым сплавом, а также вертикальных и горизонтальных участков циркуляционных петель. Высота контура – 6500 мм; расстояние между осями вертикальных участков – 740 мм, длина вертикального участка – 5830 мм. Внутренний диаметр труб установки – 27,86 мм. Нагрев теплоносителя производится электричеством, тепло от контура отводится теплообменником, установленным в верхней точке системы. В работе [6] описаны итоги экспериментов, полученных на такой установке.

В последнее годы в Китае активно проводятся исследования использования жидкометаллических теплоносителей в энергетических установках [7-9]. В работе [9] описан эксперимент с устойчивыми и переходными режимами ЕЦ расплава свинца и висмута в контуре, диаметр которого – 42 мм, расстояние между центрами нагрева и охлаждения – 3700 мм; мощность нагрева – 30 кВт. Контур циркуляции состоит из бака-аккумулятора с металлическим теплоносителем, вертикальной нагревательной секции, бака-расширителя, горизонтальной охлаждающей секции и измерительных устройств (термопары, расходомер, датчики перепада давления). Теплоноситель нагревается электричеством в секции длиной 1500 мм и охлаждается водой в секции длиной 1200 мм. В работе исследовались установившиеся и переходные режимы ЕЦ при условии ступенчатого изменения мощности нагрева и двух уровнях гидравлического сопротивления контура, далее экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования. Установлено, что на ЕЦ влияет геометрия контура и его гидравлическое сопротивление. Из-за высокого теплового расширения и высокой теплопроводности расплава ЕЦ в системе начинается очень быстро; отмечена быстрая реакция изменения скорости потока теплоносителя на резкие перепады мощности нагрева, а резкие перепады температуры приводили к блокировке потока (временной) и резким колебаниям температуры теплоносителя. В работе [10] отражено экспериментально-расчетное исследование развития ЕЦ свинцово-висмутового теплоносителя в замкнутом циркуляционном контуре. Для экспериментальных исследований ЕЦ была использована одна циркуляционная петля контура. Было показано формирование устойчивого течения жидкометаллического теплоносителя из состояния покоя за счет подвода избыточного тепла к имитатору тепловыделяющей сборки. С помощью CFD-модуля CONV-3D на базе DNS выполнено моделирование происходящих процессов. Особенностью этого контура является его модульная схема, что позволяет в дальнейших исследованиях включать в работу от одного до четырех замкнутых гидродинамических контуров.

Отличием настоящей работы от описанных выше исследований является тестирование циркуляционного контура при работе нескольких циркуляционных петель, имеющих один источник тепла и несколько теплообменников для отвода тепла. Такое исследование дополняет и расширяет существующие данные, полученные в работе [10], и позволяет выявить закономерности развития естественной конвекции, которые можно упустить при анализе процессов циркуляции на реальных реакторных установках с несколькими контурами циркуляции теплоносителя.

Конструкция многопетлевого контура

Исследования проводились в контуре, состоящем из четырех петель, представляющих собой вертикальные цилиндрические каналы с постоянным внутренним диаметром (внутренний диаметр каналов – 35 мм, толщина стенок – 1,5 мм). Петли контура соединяются наверху, в контуре присутствует источник теплоты и четыре теплообменника для охлаждения. Восходящая линия циркуляционной системы имеет расширительный бак, горизонтальные линии, выходящие из бака (длина – 750 мм), горизонтальные линии, к которым подводится тепло и опускные линии (длина – 3078 мм). Расстояние между участками нагрева и охлаждения – 2860 мм. Объем контура с теплоносителем равен 0,022 м³.

В нижней части восходящей линии стенда присутствует источник тепла в виде модели ТВС. Модель ТВС состоит из семи вертикальных стержней, имитирующих тепловыделяющие элементы (номинальной мощностью 2 кВт, линейной мощностью 4,35 кВт/м), расположенных в шестигранной решетке с относительным шагом 1,4 между центрами стержней.

Установка позволяет проводить исследования с одной, двумя, тремя и четырьмя петлями, так как есть возможность отключать отдельные петли, установив заглушки. Для каждой возвратной петли возможна регулировка расхода с помощью дросселя.

Схема стенда приведена на рис. 1.

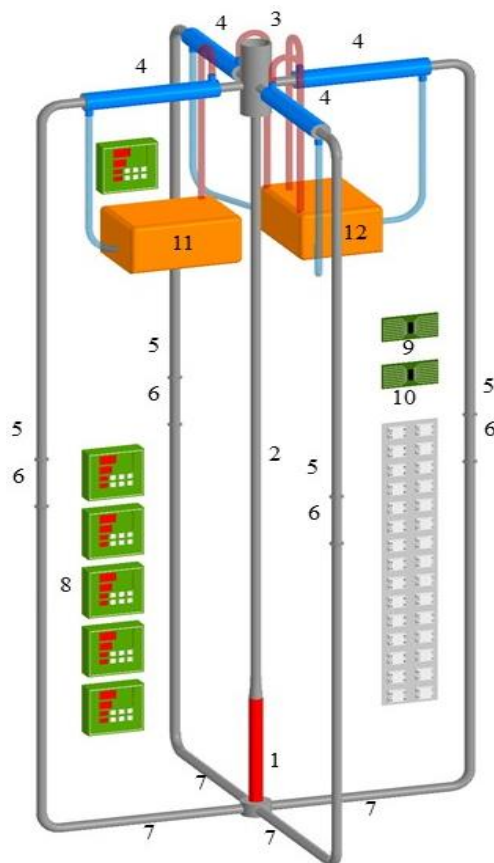


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – модель-имитатор ТВС; 2 – восходящая линия; 3 – верхний бак; 4 – теплообменники;
 5 – нисходящие петли; 6 – участки для подключения измерительных систем;
 7 – горизонтальные участки; 8 – измерители-регуляторы ТРМ-138; 9 – контроллеры;
 10 – система управляемых реле; 11, 12 – баки с теплоносителем второго контура

Fig. 1. Test bench diagram:

- 1 – fuel assembly simulator; 2 – ascending line; 3 – upper tank; 4 – heat exchangers; 5 – descending loops;
 6 – sections for connecting measuring systems; 7 – horizontal sections; 8 – TRM-138 measuring and control devices; 9 – controllers; 10 – controlled relay system; 11, 12 – tanks with second-circuit coolant

Нагретый источником тепла (1) теплоноситель проходит подъемную трубу (2), расширительный бак (3), охлаждающие теплообменники (4), нисходящие участки (5) с измерительными приборами (6) и нижние горизонтальные участки с дросселями (7). Температуры жидкометаллического и охлаждающего контуров измеряются подключенными к измерителям-регуляторам ТРМ-138 (8) термопарами типа *хромель-алюмель*, установленными в потоках. Все элементы стенда соединяются хомутами. Материал стенда – нержавеющая сталь 12Х18Н10. Нагрев и поддержание температуры обеспечивается нагревательным проводом, подключенным к системе реле (10), управляемой контроллерами (9), температура стенок элементов контролируется термопарами. Теплоноситель поступает в источник тепла через боковые входы через патрубки. Поток теплоносителя, поступающего в зону нагрева, распределяется равномерно. Охладители (система отвода тепла) расположены на верхних горизонтальных участках петель. Каждый теплообменник состоит из трубы с внутренним диаметром 35 мм и толщиной стенки 1,5 мм, установленной в кожухе с внешним диаметром 70 мм и толщиной стенки 2 мм, в котором протекает теплоноситель второго контура (рис. 2а).

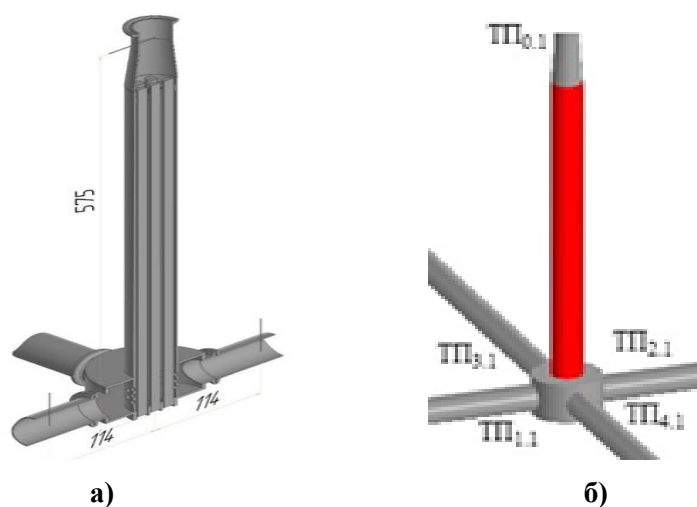


Рис. 2. Схема модели-имитатора ТВС и места установки термопар

Fig. 2. Diagram of fuel assembly simulator and the installation locations of thermocouples

Все трубы покрыты теплоизоляцией, подвод и отвод теплоносителя второго контура к теплообменнику осуществлялся через патрубки, между ними и трубами установлены термопары во втулках. Температура элементов стенда во время эксперимента поддерживается постоянной, для этого использовалось 19 нагревательных линий и 21 термопара для контроля температуры. Все элементы восходящей линии стенда покрыты базальтовой теплоизоляцией толщиной 0,2 м с коэффициентом теплопроводности 0,30-0,48 Вт/(м·°С)). Теплообменники и возвратные петли изолировались высокотемпературной каучуковой изоляцией толщиной 0,13 м и коэффициентом теплопроводности 0,032-0,040 Вт/(м·°С). Установленные на входе и выходе модели ТВС термопары (ТП_{0,1}, ТП_{1,1}, ТП_{1,2}, ТП_{1,3}, ТП_{1,4}) измеряют температуру теплоносителя в центре сечения (рис. 2б). Термопара, измеряющая температуру теплоносителя на выходе из источника тепла, установлена на расстоянии 575 мм от его нижней части. Температура теплоносителя во входных патрубках измерялась на расстоянии 114 мм от оси источника тепла. Для измерения скорости теплоносителя были использованы двухсенсорные корреляционные датчики, установленные по центру каждой из возвратных петель (конструкция и принцип работы их работы приведены в [10]). До заполнения труб свинцово-висмутовым теплоносителем подающая магистраль предварительно нагревалась до 150 °С с последующей стабилизацией температуры. После достижения всеми элементами стенда, теплоносителем в установленном сверху плавильном баке и подающей магистралью заданных температур открывался подающий вентиль, и стенд заполнялся до необходимого уровня.

После стабилизации температуры теплоносителя во всех контурах начинал проводиться эксперимент. Первым этапом было плавное увеличение подачи тепла от источника к теплоносителю для формирования циркуляционного потока.

Результаты тестирования

Основные эксперименты были проведены в двух- и четырехпетлевых режимах работы циркуляционного контура. Так, на рис. 3 показано изменение температуры на входе и выходе из источника тепла, при работе двух петель, энерговыделение составляло 1,8 кВт. После включения тепловыделения примерно 25 мин наблюдается колебательный процесс, связанный с формированием течения свинцово-висмутового теплоносителя, после чего работа контура стабилизируется. Поток теплоносителя разделяется после расширительного бака, проходит через теплообменники стока тепла и попадает в нисходящие линии. Температура в каждой нисходящей линии становится ниже, чем на выходе из источника тепла. Температуры в обеих нисходящих линиях практически одинаковы (рис. 3). При установившемся режиме естественной циркуляции температура на выходе из модели ТВС составляет 175 °С, на входах в источник тепла колеблется в диапазоне 150-152 °С.

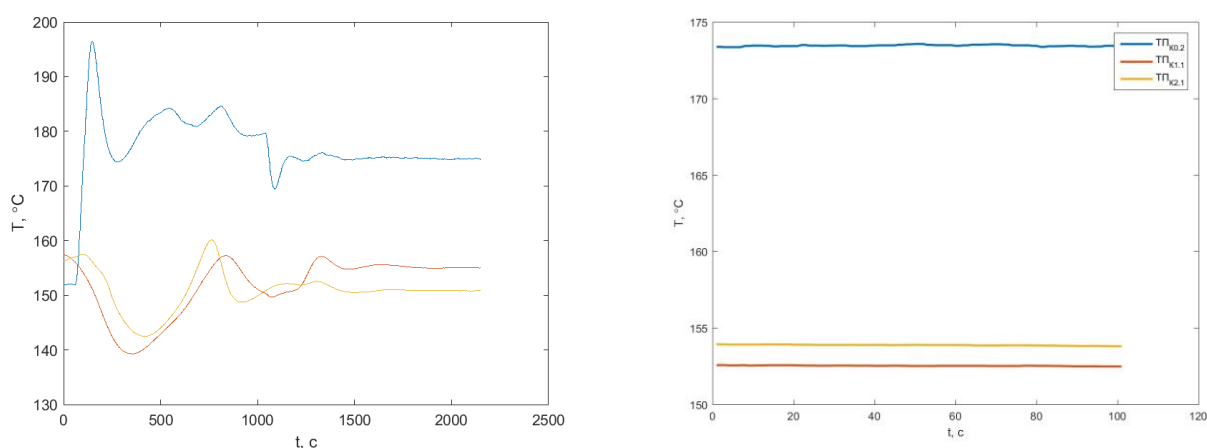


Рис. 3. Изменение температуры теплоносителя на выходе и входе в модель ТВС при использовании двух циркуляционных петель:

- а) включение источника тепловыделения и выход на стационарное состояние;
б) изменение температуры при стационарном режиме ЕЦ. Подводимая мощность 1,8 кВт*

Fig. 3. Change in the coolant temperature at the outlet and inlet of the fuel assembly model using two circulation loops:

- a) switching on the heat source and reaching a steady state;
b) change in temperature during the steady state of the EC. Supplied power 1.8 kW*

При увеличении мощности тепловыделения до 2,7 кВт температура на выходе из источника тепла составляет 195 °С. Температуры на входах в ТВС составляют значения, колеблющиеся в диапазоне 163-164 °С (рис. 4а). На рис. 4б показана зависимость от времени температур теплоносителя после источника теплоты и на выходе из обеих петель при мощности энерговыделения в ТВС равной 3,6 кВт. Сохраняется период установления циркуляционного течения длительностью около 25 мин. В установившемся режиме температура на выходе из обеих петель находится в диапазоне 173-175 °С, на выходе из источника теплоты: 212 °С.

Скорость теплоносителя в каждой из циркуляционных петель помимо ее измерений оценивалась по тепловому балансу, учитывая физические свойства свинцово-висмутового теплоносителя. С увеличением подводимой мощности увеличивается средняя скорость циркуляции теплоносителя, что подтверждается измерениями.

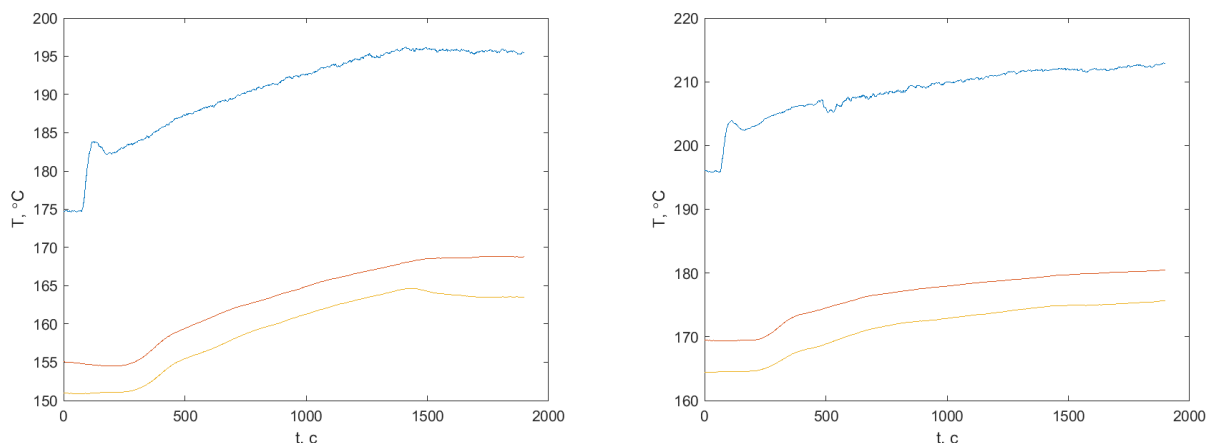


Рис. 4. Тестирование двухпетлевой конфигурации контура, режимы включения тепловыделения и выхода на стационарное состояние ЕЦ:
Подводимая мощность: а) 2,7 кВт, б) 3,6 кВт

Fig. 4. Testing of the two-loop circuit configuration, modes of switching on heat release and reaching the steady state of the natural circulation:
Supplied power: a) 2.7 kW, b) 3.6 kW

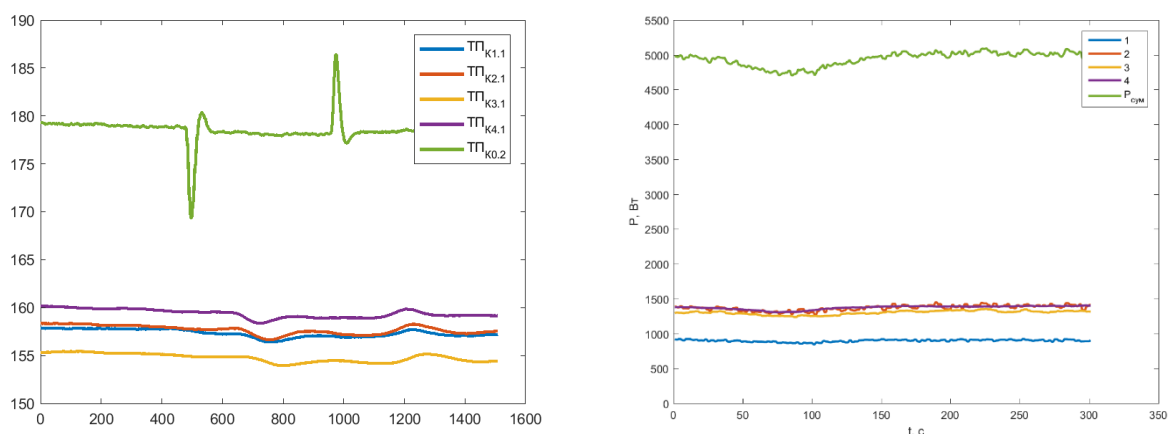


Рис. 5. Стационарная работа четырехпетлевого контура:
а) температуры теплоносителя на выходе и входе в модель ТВС, подводимая мощность 3,6 кВт;
б) мощность, снимаемая с каждой петли и суммарная отводимая мощность, подводимая мощность 5 кВт

Fig. 5. Stationary operation of a four-loop circuit:
a) coolant temperatures at the outlet and inlet of the fuel assembly model, supplied power 3.6 kW;
b) power removed from each loop and the total removed power, supplied power 5 kW

Для создания устойчивой циркуляции теплоносителя во всех четырех петлях подводимая энергия была соответственно увеличена в два раза. Циркуляция формировалась при минимальной мощности 3,6 кВт (рис. 5а). Температура теплоносителя на выходе из источника тепла составляла около 180 °С. Температуры теплоносителя на входе в модель ТВС (соответственно на выходе из четырех нисходящих участков) находились в диапазоне 155-158 °С. С повышением количества подведенного тепла к теплоносителю, наблюдалась устойчивая работа контура при этом наблюдался и рост температур теплоносителя во всех четырех циркуляционных петлях (рис. 6). Необходимо отметить, что баланс подводимого и отводимого от каждой петли тепла всегда сохранялся (рис. 5б). При увеличении подводимой мощности до 6,4 кВт (рис. 6) температуры на входе источник тепла повышались до 170-175 °С, а разница температур на входе и выходе из модели ТВС составляла около 30 °С.

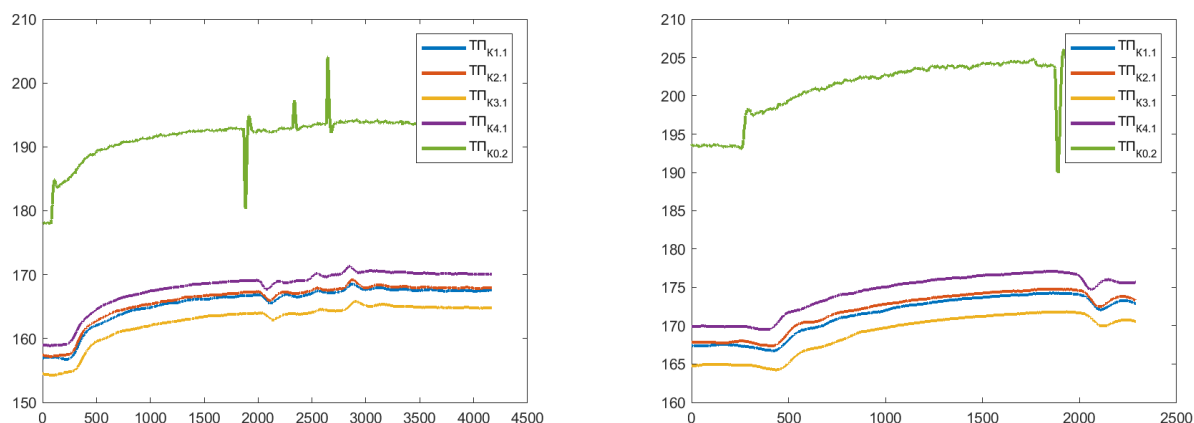


Рис. 6. Тестирование четырехпетлевой конфигурации контура, режимы включения тепловыделения и выхода на стационарное состояние ЕЦ: подводимая мощность: а) 5 кВт, б) 6,4 кВт

Fig. 6. Testing of the four-loop circuit configuration, modes of switching on heat release and reaching the steady state of the natural circulation: Supplied power: a) 5 kW, b) 6.4 kW

Было проведено тестирование особенностей развития естественной циркуляции теплоносителя в условиях неравномерного теплосъема на разных циркуляционных петлях. Для создания такого режима создавалось условие отвода меньшего количества тепла от одной из циркуляционных петель по сравнению с другими. Обеспечение неравномерных условий создавалось с помощью управления начальной температурой теплоносителя второго контура.

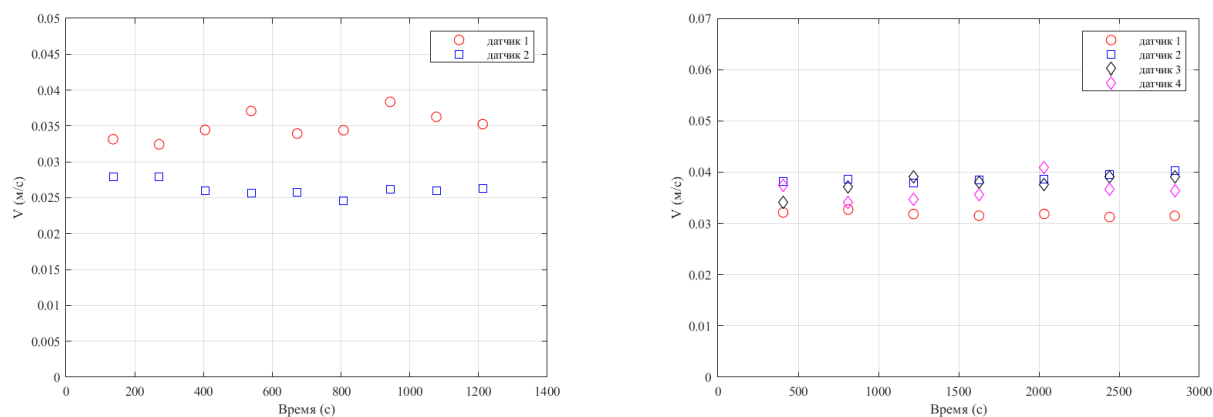


Рис. 7. Скорости теплоносителя в каждой петле:
а) двухпетлевая схема циркуляции, мощность энерговыделения 1,8 кВт;
б) четырехпетлевая схема циркуляции, мощность энерговыделения 5 кВт

Fig. 7. Speeds of the coolant in each loop:
a) two-loop circulation scheme, energy release of 1.8 kW;
b) four-loop circulation scheme, energy release of 5 kW

В режиме с перекосом отвода тепла в двухпетлевом режиме мощность, выделяемая в модели-имитаторе ТВС, составляла 1,8 кВт. Снимаемая с первой петли мощность составляла около 1100 Вт, снимаемая со второй – около 800 Вт. Это приводило к образованию различия температуры на входах в ТВС с первой и второй петель на величину порядка 2-3 °C. Изменялась и скорость теплоносителя в петлях: при установившемся режиме течения скорость теплоносителя в первой циркуляционной петле составляла 0,035 м/с, во второй петле – 0,025 м/с

(рис. 7). При проведении тестирования в четырехпетлевом режиме мощность энерговыделения составляла 5 кВт, теплосъем в одной из петель был равен 1000 Вт, для остальных петель 1300 Вт. Результаты распределения скорости теплоносителя при перекосе снимаемой мощности в четырехпетлевой конфигурации приведены на рис. 7б. Для петли с ухудшенным теплосъемом в стационарном режиме наблюдается снижение скорости циркуляции жидкометаллического теплоносителя до величины порядка 0,03 м/с. Для петель без вынужденного ухудшения теплообмена скорость потока на оси нисходящих линий выше примерно на 30 %.

Заключение

Выполнено тестирование работы гидродинамического контура, имеющего четыре циркуляционные петли, соединенных в верхней камере – баке с теплоносителем: источник тепловыделения в виде имитатора ТВС и четыре теплообменника, отводящие тепло в режиме ЕЦ. Конструкция контура позволяла проводить тестирования при разном количестве подключений циркуляционных петель и нарушении теплосъема в одной из них.

Установлено, что если теплоноситель циркулирует по нескольким петлям, то сохраняется температурный напор, необходимый для поддержания естественной циркуляции в общем контуре. Суммарное тепло, отводимое через петли, соответствует общему теплоподводу. Зависимости расхода теплоносителя и температурного напора от мощности нагрева в случае многопетлевой системы близки к линейным.

Библиографический список

1. **C. Bertani**, A. Bersano, M. De Salve, G. Sobrero. Experimental analysis of the start-up of a natural circulation loop in single and two-phase flow. Nuclear Engineering and Design, V. 385, № 15 December 2021, 111532.
2. **A. Borgohain**, et. al. Natural circulation studies in a LBE loop for a wide range of temperature. Nuclear Engineering and Design, V. 300. 2016, Pp. 358-375.
3. **Leitai Shi**, et.al. Experimental study on the natural circulation capability and heat transfer characteristic of liquid lead bismuth eutectic. Progress in Nuclear Energy. V. 115. 2019, Pp. 99-106.
4. **D. Grishchenko**, M. Jeltsov, K. Kööp, A. Karbojian, W. Villanueva, P. Kudinov. The TALL-3D facility design and commissioning tests for validation of coupled STH and CFD codes. Nuclear Engineering and Design. V. 290, 15 August 2015, Pages 144-153.
5. **K. Kööp**, M. Jeltsov, D. Grishchenko, P. Kudinov. Pre-test analysis for identification of natural circulation instabilities in TALL-3D facility // Nuclear Engineering and Design 314 (2017) 110-120.
6. **D. Grishchenko**, A. Papukchiev, C. Liud, C. Geffrayc, M. Polidorie, K. Kp, M. Jeltsov, P. Kudinov. TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability. Nuclear Engineering and Design 358 (2020) 110386
7. **Chen-Ch. Yue**, Liu-Li Chen, Ke-Feng Lyu, Yang Li, Sheng Gao, Yue-Jing Liu, Qun-Ying Huang. Flow characteristics of natural circulation in a lead-bismuth eutectic loop. Nucl. Sci. Ttch. (2017) 28:39.
8. **L. Shi**, G.H. Su, F. Zhu, T. Bing, Y. Hou, Sh. Wei, Ch. Wang, W. Tian, S. Qiu, J. Wu. Experimental study on the natural circulation capability and heat transfer characteristic of liquid lead bismuth eutectic. Progress in Nuclear Energy 115 (2019) 99-106.
9. **Xin Wang**, Bo Kuang, Wenjun Hu, Pengrui Qiao, Jieming Hou. Natural circulation with LBE as a working substance // Progress in Nuclear Energy, Volume 153, November 2022, 104428.
10. **Прибатурин Н.А.** Экспериментально – расчетное исследование естественной циркуляции свинцово – висмутового теплоносителя / Н.А. Прибатурин и др. // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4 (143). С. 72-81.

**Дата поступления
в редакцию: 10.01.2025**

**Дата принятия
к публикации: 20.02.2025**

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.021

EDN: DWGOFC

АНАЛИЗ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РУЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

М.К. Бережнов

ORCID: 0009-0008-4297-6403 e-mail: berezhnov.m@bk.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***М.М. Жилейкин**

ORCID: 0000-0002-8851-959X e-mail: jileykin_m@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Проведен анализ потери устойчивости для автомобилей с передним и задним приводом, созданы линейные модели и построены амплитудно-частотные характеристики. Сформулированы условия возникновения резонансов для каждой из двух систем. Доказано отсутствие риска возникновения потери устойчивости для заднеприводного автомобиля и сформулировано условие, при выполнении которого возможна потеря устойчивости у переднеприводного автомобиля.

Ключевые слова: рулевое управление, рулевой привод, рулевой механизм, потеря устойчивости, амплитудно-частотная характеристика, расчетная модель автомобиля.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бережнов, М.К. Анализ рисков возникновения потери устойчивости транспортного средства при колебательном процессе воздействия на рулевое управление / М.К. Бережнов, М.М. Жилейкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 59-65. EDN: DWGOFC

ANALYSIS OF RISKS OF LOSS OF VEHICLE STABILITY DURING OSCILLATORY PROCESS OF IMPACT ON STEERING CONTROL

M.K. Berezhnov

ORCID: 0009-0008-4297-6403 e-mail: berezhnov.m@bk.ru

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia***M.M. Zhileykin**

ORCID: 0000-0001-8843-9488 e-mail: jileykin_m@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The paper analyzes the loss of stability for front- and rear-wheel drive vehicles. Linear models are created and frequency response are studied. The conditions for the occurrence of resonances for each of the two systems are formulated. It has been proven that there is no risk of loss of stability for a rear-wheel drive vehicle, and a condition has been formulated under which loss of stability is possible for a front-wheel drive vehicle.

Key words: steering drive, steering mechanism, loss of stability, frequency response, calculated model of the car.

FOR CITATION: M.K. Berezhnov, M.M. Zhilejkin. Analysis of risks of loss of vehicle stability during oscillatory process of impact on steering control. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 59-65. EDN: DWGOFC

Введение

Рулевое управление автомобиля состоит из рулевого механизма, рулевого привода и усилителя [1]. Тенденция электрификации транспортных средств привела к тому, что, несмотря на то, что в Российской Федерации запрещены продажа и эксплуатация автомобилей, рулевой привод которых не обеспечивает механическую связь между управляемыми колесами и рулевым колесом, проектирующие компании продолжают разработки рулевого управления, где за привод каждого из управляемых колес отвечает отдельный электродвигатель. Индивидуальное управление поворотом управляемых колес способствует повышению устойчивости и управляемости, что обеспечивается за счет введения автоматического корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания) [2-5], поэтому такое рулевое управление не предусматривает применения тяг, обеспечивающих механическую связь между колесами. В России ранее не производились автомобили с подобным рулевым приводом, поэтому нет оснований полагать, что отсутствие связи управляемых колес между собой не скажется негативным образом на управляемости и устойчивости автомобиля. Для анализа подобных рисков изначально требуется исследовать колебательный процесс воздействия на рулевое управление автомобиля во время его движения.

Математический аппарат

Для первоначального анализа был выбран математический аппарат, разработанный А.С. Литвиновым [6]. Движение двухосного автомобиля с передней управляемой и обеими ведущими осями он описывает двумя дифференциальными уравнениями:

$$\dot{\delta}_1 = \frac{v_a}{L}(\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{\sum K_{y1}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z} \right) \delta_1 - \frac{\sum K_{y2}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} - \frac{ab}{J_z} \right) \delta_2 + \frac{j_a}{v_a}(\theta_{1cp} - \delta_1) + \frac{g}{G_a v_a} P_y + \frac{a}{J_z v_a} M_z - \frac{\theta_{1cp}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z} \right) X_1 + \Omega_{k1}; \quad (1)$$

$$\dot{\delta}_2 = \frac{v_a}{L}(\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{\sum K_{y1}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} - \frac{ab}{J_z} \right) \delta_1 - \frac{\sum K_{y2}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} + \frac{b^2}{J_z} \right) \delta_2 - \frac{j_a}{v_a} \delta_2 + \frac{g}{G_a v_a} P_y - \frac{b}{J_z v_a} M_z - \frac{\theta_{1cp}}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} - \frac{ab}{J_z} \right) X_1, \quad (2)$$

где v_a – скорость движения транспортного средства; L – колесная база; θ_{1cp} – средний угол поворота передних колес; δ_1 – средний угол увода передних колес; δ_2 – средний угол увода задних колес; K_{y1} – суммарный коэффициент сопротивления уводу передних колес; K_{y2} – суммарный коэффициент сопротивления уводу задних колес; g – ускорение свободного падения; G_a – вес транспортного средства; a – расстояние от передней оси до центра тяжести транспортного средства; b – расстояние от задней оси до центра тяжести; J_z – момент инерции транспортного средства вокруг оси Z ; j_a – боковое ускорение; проекция внешних сил, действующих на транспортное средство; M_z – внешние моменты, действующие на транспортное средство, вокруг оси Z ; X_1 – тяговая сила на колесе; Ω_{k1} – скорость поворота управляемых колес.

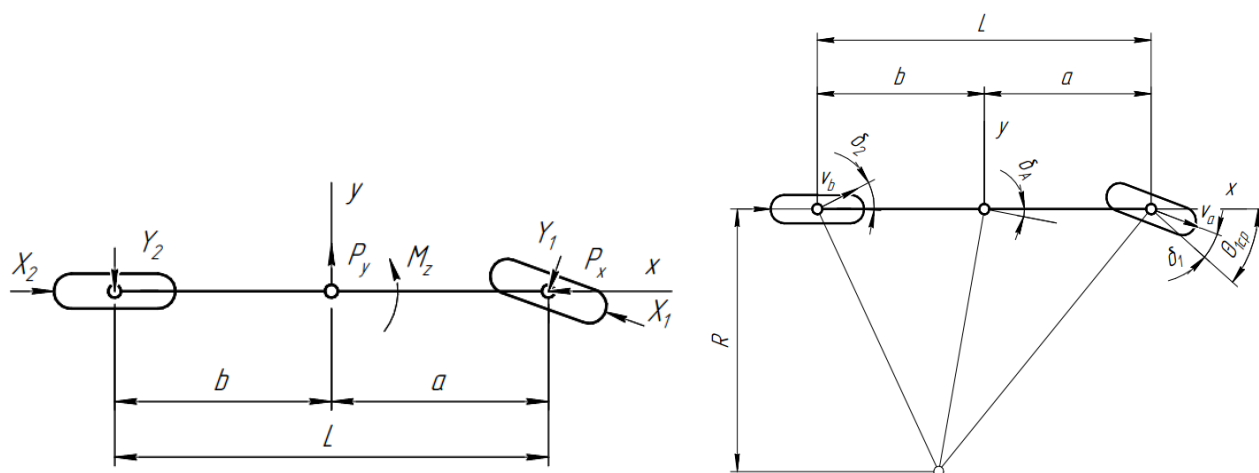


Рис. 1. Расчетная модель автомобиля

Fig. 1. Calculated model of the car

Расчетная модель автомобиля представлена на рис. 1. В ней приняты следующие допущения [7]:

- а) углы увода правого и левого колес каждой оси одинаковы;
- б) синусы и тангенсы углов поворота колес, углов увода, сумм углов поворота и углов увода равны углам;
- в) косинусы углов поворота колес, углов увода, сумм углов поворота и углов увода равны единице;
- г) касательные реакции, действующие на правое и левое колеса каждой оси, одинаковы;
- д) углы поворота правого и левого колес одинаковы;
- е) коэффициенты сопротивления уводу правого и левого колес одинаковы.

Исследуем поведение данной модели автомобиля с тяговым приводом на переднюю или на заднюю оси. Помимо допущений, принятых А.С. Литвиновым, с целью упрощения модели примем также ряд других:

- а) центр масс ТС находится на равном удалении от передней и задней оси, следовательно, $a = b$;
- б) коэффициент сопротивления уводу передних и задних колес равны, следовательно, $K_{y1} = K_{y2}$.

Также приравняем к нулю внешние силы и крутящие моменты, поскольку рассматривается самостоятельное движение автомобиля, на который не оказывается никакое внешнее воздействие.

Модель переднеприводного автомобиля

Система дифференциальных уравнений с учетом допущений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_1 = \frac{v_a}{L}(\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{K}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z}\right)\delta_1 - \frac{K}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} - \frac{a^2}{J_z}\right)\delta_2 + \frac{j_a}{v_a}(\theta_{1cp} - \delta_1) - \\ \frac{\theta_{1cp}}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z}\right)X_1 + \Omega_{k1}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{\delta}_2 = \frac{v_a}{L}(\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{K}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} - \frac{a^2}{J_z}\right)\delta_1 - \frac{K}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z}\right)\delta_2 - \frac{j_a}{v_a}\delta_2 - \frac{\theta_{1cp}}{v_a}\left(\frac{g}{G_a} - \frac{a^2}{J_z}\right)X_1. \quad (4)$$

Если мы вычтем из нижнего уравнения верхнее и выразим $\delta_2 - \delta_1$ как δ_A , и $\dot{\delta}_2 - \dot{\delta}_1$ как $\dot{\delta}_A$, соответственно, получим следующее:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_A + \delta_A A &= -\Omega_{k1} + \theta_{1cp} B, \\ A &= \frac{1}{v_a} \left(\frac{2Ka^2}{J_z} + j_a \right), \\ B &= \frac{1}{v_a} \left(X_1 \frac{2a^2}{J_z} - j_a \right).\end{aligned}\quad (5)$$

Для полученной линейной системы построим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Входным воздействием данной системы является процесс поворота рулевого колеса, а выходным процессом – разность углов увода колес передней и задней осей.

После всех преобразований получаем следующее уравнение АЧХ рассматриваемой системы:

$$|H(w)| = \sqrt{\frac{B^2 + w^2}{A^2 + w^2}} \text{ или } |H(\vartheta)| = \sqrt{\frac{B^2 + \left(\frac{\vartheta}{360}\right)^2}{A^2 + \left(\frac{\vartheta}{360}\right)^2}}, \quad (6)$$

где w – круговая частота, а ϑ – частота воздействия на рулевое колесо автомобиля.

Возьмем производную данной функции по угловой скорости и приравняем к 0, чтобы определить, в каких точках она достигает экстремумы. Полученная производная имеет вид:

$$\frac{\partial |H(w)|}{\partial w} = \frac{w(A^2 - B^2)}{(A^2 + B^2)^{\frac{3}{2}} * \sqrt{B^2 + w^2}} \quad (7)$$

Проанализировав полученное выражение, можем сделать вывод, что экстремум достигается при $w = 0$.

Используя полученное уравнение, изучим потерю устойчивости при колебательном процессе воздействия на рулевое колесо транспортного средства, со следующими техническими характеристиками:

- снаряженная масса – 12 220 кг;
- полная масса – 18 800 кг;
- длина колесной базы – 6 170 мм;
- максимальная скорость – 90 км/ч;
- максимальное боковое ускорение – 0,3 g;
- максимальный крутящий момент на двигателе – 400 Нм.

Примем значение массы автомобиля – 15 510 кг; скорости – 45 км/ч; бокового ускорения – 0,15 g; крутящего момента на двигателе – 200 Нм. Построим графики зависимости $|H(\vartheta)|$, где ϑ – частота воздействия на рулевое колесо автомобиля, варьируя параметры, упомянутые выше (рис. 2.1-2.4).

Основываясь на полученных зависимостях, можно сделать вывод, что система не входит в резонанс [8]. Объясняется это тем, что $|H(w)|$ зависит от отношения $\frac{B}{A}$, и, если посмотреть на выражения данных коэффициентов, становится очевидным, что это возможно только при условии $X_1 > K$. Это невозможно для рассматриваемого нами транспортного средства и крайне редко встречается в автомобилях в принципе.

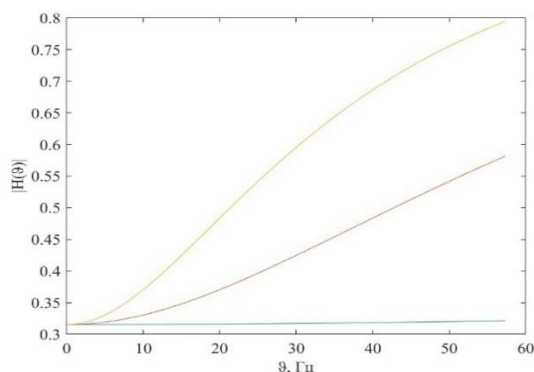


Рис. 2.1. АЧХ для различных скоростей движения переднеприводного автомобиля:
синий – 5 км/ч; красный – 45 км/ч;
желтый – 90 км/ч

Fig. 2.1. Frequency response for different speeds of a front-wheel drive vehicle:
blue – 5 km/h; red – 45 km/h; yellow – 90 km/h

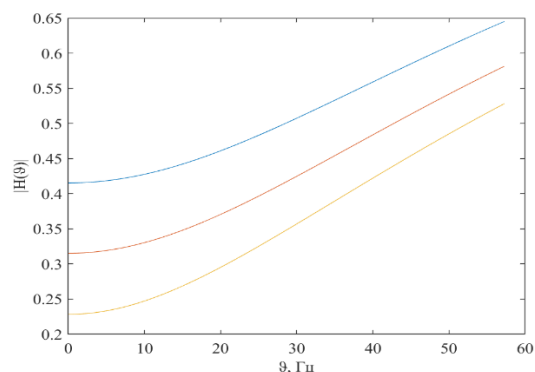


Рис. 2.2. АЧХ для различных боковых ускорений при движении переднеприводного автомобиля:
синий – 0 g; красный – 0,15 g; желтый – 0,3 g

Fig. 2.2. Frequency response for various lateral accelerations when driving a front-wheel drive vehicle:
blue – 0 g; red – 0.15 g; yellow – 0.3 g

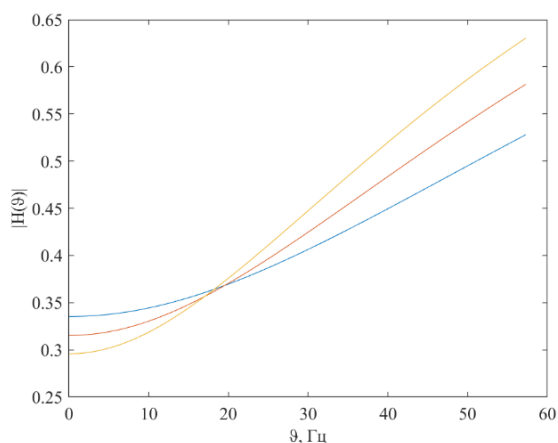


Рис. 2.3. АЧХ для различных масс переднеприводного автомобиля:
синий – 12220 кг; красный – 15510 кг;
желтый – 18800 кг

Fig. 2.3. Frequency response for different weights of a front-wheel drive vehicle:
blue – 12,220 kg; red – 15,510 kg;
yellow – 18,800 kg

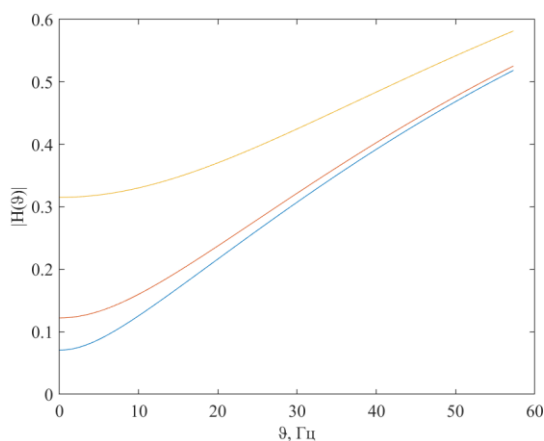


Рис. 2.4. АЧХ для различного крутящего момента на двигателе переднеприводного автомобиля:
синий – 0 Нм; красный – 200 Нм;
желтый – 400 Нм

Fig. 2.4. Frequency response for different engine torques of a front-wheel drive vehicle:
blue – 0 Nm; red – 200 Nm;
yellow – 400 Nm

Модель заднеприводного автомобиля

Система дифференциальных уравнений, описывающая заднеприводный автомобиль, с учетом допущений будет иметь вид:

$$\dot{\delta}_1 = \frac{v_a}{L} (\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{K}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z} \right) \delta_1 - \frac{K}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} - \frac{a^2}{J_z} \right) \delta_2 + \frac{j_a}{v_a} (\theta_{1cp} - \delta_1) + \Omega_{k1}, \quad (8)$$

$$\dot{\delta}_2 = \frac{v_a}{L} (\theta_{1cp} + \delta_2 - \delta_1) - \frac{K}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} - \frac{a^2}{J_z} \right) \delta_1 - \frac{K}{v_a} \left(\frac{g}{G_a} + \frac{a^2}{J_z} \right) \delta_2 - \frac{j_a}{v_a} \delta_2. \quad (9)$$

Если вычтем из нижнего уравнения верхнее и выразим $\delta_2 - \delta_1$ как δ_A , и $\dot{\delta}_2 - \dot{\delta}_1$ как $\dot{\delta}_A$, соответственно, получим следующее:

$$\dot{\delta}_A + \delta_A A = -\Omega_{k1} - \theta_{1cp} B, \quad (10)$$

где $A = \frac{1}{v_a} (\frac{2Ka^2}{J_z} + j_a)$, $B = \frac{j_a}{v_a}$

Для полученной линейной системы построим АЧХ. Входным воздействием данной системы является процесс поворота рулевого колеса, а выходным процессом – разность углов увода колес передней и задней осей.

После всех преобразований получаем следующее уравнение АЧХ рассматриваемой системы:

$$|H(w)| = \sqrt{\frac{B^2 + w^2}{A^2 + w^2}} \text{ или } |H(\vartheta)| = \sqrt{\frac{B^2 + (\frac{\vartheta}{360})^2}{A^2 + (\frac{\vartheta}{360})^2}}, \quad (11)$$

где w – круговая частота, а ϑ – частота воздействия на рулевое колесо автомобиля.

Поскольку уравнение АЧХ совпадает с предыдущим случаем, то условие резонанса тоже будет совпадать.

Построим графики зависимости $|H(\vartheta)|$ аналогично автомобилю с передним приводом для транспортного средства с теми же характеристиками (рис. 3.1-3.4).

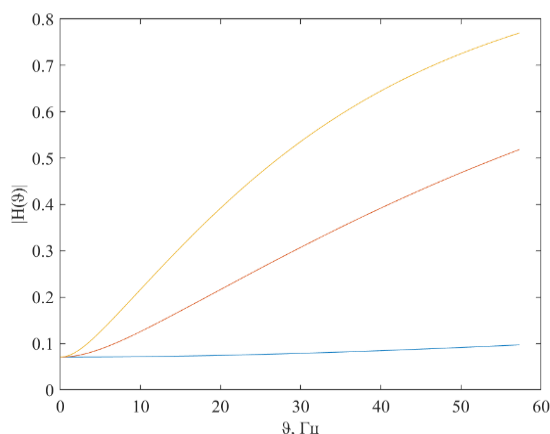


Рис. 3.1. АЧХ для различных скоростей движения заднеприводного автомобиля:
синий – 5 км/ч, красный – 45 км/ч,
желтый – 90 км/ч

Fig. 3.1. Frequency response for different speeds of a rear-wheel drive vehicle:
blue – 5 km/h, red – 45 km/h, yellow – 90 km/h

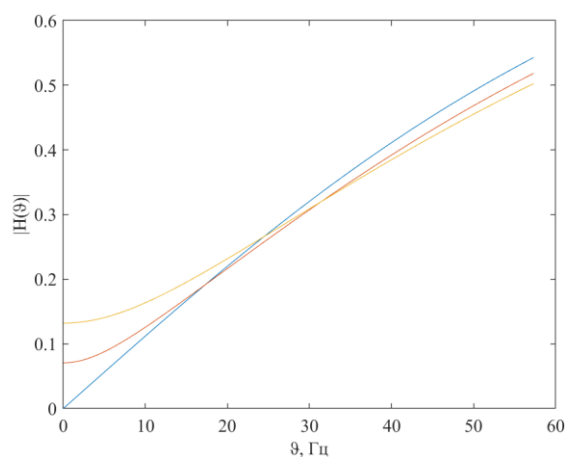


Рис. 3.2. АЧХ для различных боковых ускорений при движении заднеприводного автомобиля:
синий – 0 g, красный – 0,15 g, желтый – 0,3 g

Fig. 3.2. Frequency response for different lateral accelerations when driving a rear-wheel drive vehicle:
blue – 0 g, red – 0.15 g, yellow – 0.3

Основываясь на полученных зависимостях, можно сделать вывод, что система не входит в резонанс. Объясняется это тем, что $|H(w)|$ зависит от отношения $\frac{B}{A}$, и, если посмотреть на выражения данных коэффициентов станет понятно, что B всегда больше, чем A .

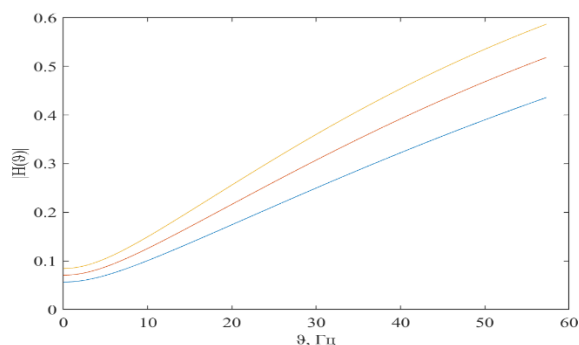


Рис. 3.3. АЧХ для различных масс заднеприводного автомобиля:
синий – 12220 кг, красный – 15510 кг,
желтый – 18800 кг

Fig. 3.3. Frequency response for different masses of a rear-wheel drive vehicle:
blue – 12220 kg, red – 15510 kg, yellow – 18800 kg

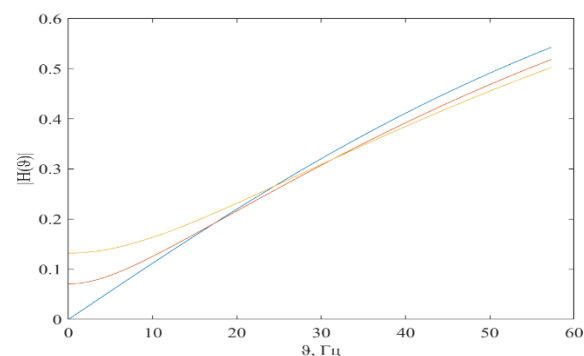


Рис. 3.4. АЧХ для различного крутящего момента на двигателе заднеприводного автомобиля:
синий – 0 Нм, красный – 200 Нм,
желтый – 400 Нм

Fig. 3.4. Frequency response for different engine torques of a rear-wheel drive vehicle:
blue – 0 Nm, red – 200 Nm, yellow – 400 Nm

Выводы

Риск возникновения потери устойчивости при колебательном процессе воздействия на рулевое колесо заднеприводного автомобиля отсутствует.

У переднеприводного автомобиля потеря устойчивости может произойти только в том случае, если численное значение тяговой силы на ведущем колесе, измеряемое в [Н], будет больше численного значения коэффициента сопротивления увода шины, измеряемого в $\left[\frac{\text{Н}}{\text{рад}}\right]$.

Библиографический список

1. **Афанасьев, Б.А.** Проектирование полноприводных колесных машин / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белосусов, Л.Ф. Жеглов и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. Т.3. С. 319-341.
2. **S. Mammarr, V.B. Baghdassarian** Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering / // Proceedings of the American Control Conference. 2000. Vol. 1, pp. 105-109.
3. **Rodrigues, A.O.** Evaluation of an active steering system. Master's degree project. Sweden, 2004. URL: http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf (дата обращения 10.09.2024).
4. **Тарасик, В.П.** Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск: Новое знание, 2016. – 592 с.
5. **Рязанцев, В.И.** Активное управление сходжением колес автомобиля / В.И. Рязанцев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 212 с.
6. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
7. **Жилейкин, М.М.** Моделирование систем транспортных средств / М.М. Жилейкин, Г.О. Котиев. – М.: ГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 240 с.
8. **Бахмутов, С.В.** Многокритериальная параметрическая оптимизация в задачах совершенствования характеристик управляемости и устойчивости автотранспортных средств / С.В. Бахмутов, А.А. Ахмедов // Известия МГТУ МАМИ. 2007. № 2 (4). С.19-30.

**Дата поступления
в редакцию: 28.11.2024**

**Дата принятия
к публикации: 21.01.2025**

УДК 629.016

EDN: KWFHYC

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Н.В. БузуновORCID: 0009-0007-6614-6378 e-mail: buzunovnv@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***А.С. Муравьев**ORCID: 0009-0008-4901-9112 e-mail: aleksandr.muravev@bmstu.ruНОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»
*Москва, Россия***Р.Д. Пирожков**ORCID: 0009-0000-0302-9181 e-mail: pirozhkov@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Разработаны алгоритмы управления гидростатической трансмиссией специальной транспортной машины с использованием имитационного моделирования. Приведена методология и дано описание этапов разработки алгоритмов: формирование концепции, отладка, проверка в составе программного обеспечения физического контроллера, тестирование систем транспортного средства, в котором может участвовать имитационная модель внешней среды. Представленная разработка была успешно внедрена в систему управления опытной машины. Сравнение результатов моделирования и натурного эксперимента позволяет сделать вывод о достаточной для рассматриваемых целей точности имитационной модели и состоятельности приведенного подхода к проектированию.

Ключевые слова: гидростатическая трансмиссия, гидромотор, гидронасос, имитационная математическая модель, тестирование транспортного средства.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бузунов, Н.В. Разработка алгоритмов управления гидростатической трансмиссией с использованием имитационной модели реального времени / Н.В. Бузунов, А.С. Муравьев, Р.Д. Пирожков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 66-78. EDN: KWFHYC

HYDROSTATIC TRANSMISSION CONTROL ALGORITHMS DEVELOPMENT USING REAL-TIME IMITATIONAL MODEL

N.V. BuzunovORCID: 0009-0007-6614-6378 e-mail: buzunovnv@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***A.S. Muravyev**ORCID: 0009-0008-4901-9112 e-mail: aleksandr.muravev@bmstu.ruJSC «KAMAZ-BAUMAN»
Moscow, Russia

R.D. Pirozhkov

ORCID: 0009-0000-0302-9181 e-mail: pirozhkov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The paper presents control algorithms for a hydrostatic transmission of a special transport vehicle using simulation modeling. The methodology is presented and the stages of algorithm development are described: concept formation, debugging, testing as part of the physical controller software, testing of vehicle systems, which may involve a simulation model of the external environment. The presented development was successfully implemented into the control system of the prototype. Comparison of the results of modeling and a natural experiment shows that the accuracy of the simulation model is sufficient for the purposes under consideration and the presented approach can be used in design.

Key words: hydrostatic transmission, hydraulic motor, hydraulic pump, simulation mathematical model, vehicle testing.

FOR CITATION: N.V. Buzunov, A.S. Muravyev, R.D. Pirozhkov. Hydrostatic transmission control algorithms development using real-time imitational model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 66-78. EDN: KWFHYC

Введение

Использование имитационных моделей при синтезе законов управления различными исполнительными устройствами значительно ускоряет процесс разработки. Имитационные модели позволяют проводить тестирование и отладку принципов управления задолго до появления рабочего прототипа изделия, что особенно актуально при разработке новых образцов техники. Отладочные работы с применением имитационного моделирования в режиме реального времени позволяют экономить время относительно отладочных работ на опытном образце. Также использование имитационных моделей позволяет исследовать эксплуатационные режимы, которые могут значительно сократить срок службы образца техники или вывести его из строя. Очень часто экстремальные режимы эксплуатации представляют большой интерес для исследования. Это объясняется необходимостью обеспечения безопасности эксплуатации и отыскания возможностей предотвращения таких экстремальных режимов. В силу указанных преимуществ применение имитационных моделей прочно вошло в современные практики разработки.

1. Постановка задачи

Технические характеристики специальной транспортной машины, для которой разрабатываются алгоритмы управления гидростатической трансмиссией, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Технические характеристики объекта разработки

Table 1.

Technical characteristics of the vehicle being developed

Параметр	Значение
Колесная формула	8x8
Снаряженная масса, кг	22000
Максимальная скорость, км/ч	23
Радиус колеса, м	0,66

Гидрообъемная передача (ГОП) указанной трансмиссии состоит из аксиально-поршневых гидромашин с изменяемым объемом. Схематично устройство используемой ГОП представлено на рис. 1, ее характеристики приведены в табл. 2.

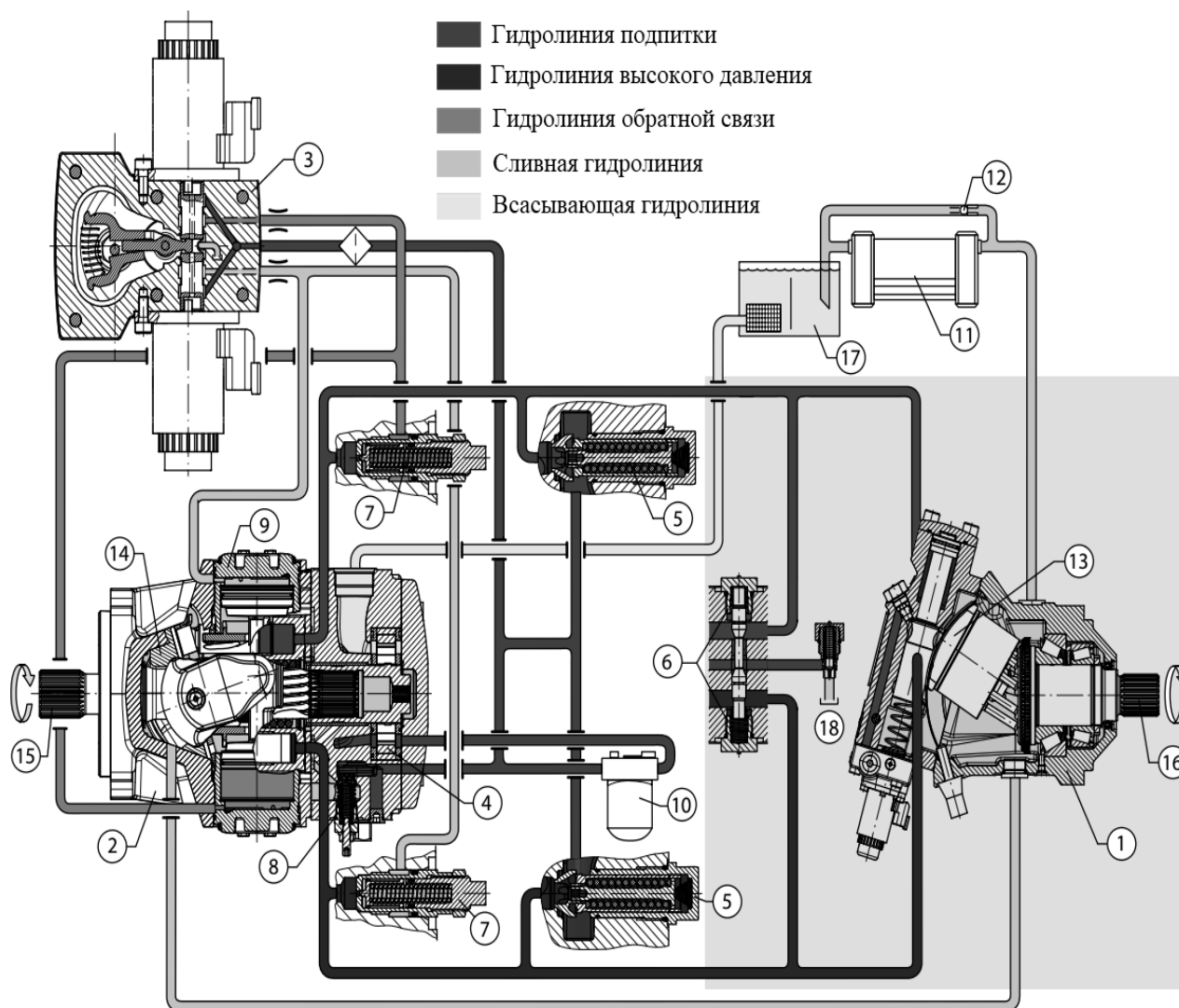


Рис. 1. Схема гидрообъемной передачи:

1 – гидромотор с изменяемым объемом, 2 – гидронасос с изменяемым объемом, 3 – электромеханический узел регулирования объема гидронасоса, 4 – подкачивающий насос, 5 – клапана подкачки, 6 – золотник промывки, 7 – предохранительные клапана, 8 – клапан ограничения давления подпитки, 9 – сервоцилиндр, 10 – фильтр, 11 – радиатор, 12 – термостат, 13 – блок цилиндров гидромотора, 14 – наклонная шайба гидронасоса, 15 – входной вал, 16 – выходной вал, 17 – гидробак, 18 – гидролиния в корпус мотора

Fig. 1. Hydrostatic transmission diagram:

1 – variable displacement hydraulic motor, 2 – variable displacement hydraulic pump, 3 – electromechanical hydraulic pump volume control unit, 4 – booster pump, 5 – booster valves, 6 – flushing piston valve, 7 – safety valves, 8 – feed pressure limiting valve, 9 – servo cylinder, 10 – filter, 11 – radiator, 12 – thermostat, 13 – hydraulic motor cylinder block, 14 – hydraulic pump swash plate, 15 – input shaft, 16 – output shaft, 17 – hydraulic tank, 18 – hydraulic line to motor housing

Таблица 2.
Характеристики гидрообъемной передачи

Table 2.
Hydrostatic transmission characteristics

Параметр	Значение
Максимальный объем гидронасоса, см ³	100
Диапазон изменения объемов гидромотора, см ³	37-160
Давление открытия предохранительного клапана, бар	450
Давление подкачки, бар	1-2
Приведенный объемный модуль упругости рабочей жидкости, МПа	1560

Схема трансмиссии представлена на рис. 2. Гидронасос ГОП через механическую передачу связан с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Выходной вал гидромотора входит в раздаточную коробку, которая, в свою очередь, соединена с ведущими мостами машины.

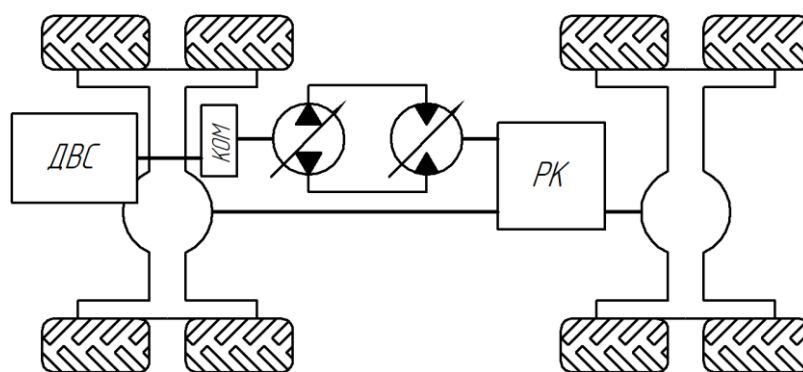


Рис. 2. Схема трансмиссии:

*ДВС – двигатель внутреннего сгорания, КОМ – коробка отбора мощности,
РК – раздаточная коробка*

Fig. 2. Transmission diagram:

ДВС – internal combustion engine, КОМ – power take-off, РК – transfer case

Необходимо обеспечить автоматическое управление объемами гидромашин на основе:

- степени нажатия педали ускорения;
- информации от датчиков скорости вращения валов гидромашин;
- заранее заданного закона управления оборотами ДВС, механически связанного с валом гидронасоса.

Управление ДВС осуществляется согласно зависимости частоты вращения коленчатого вала (рис. 3) от степени нажатия на педаль ускорения.

Поведение машины с точки зрения водителя должно быть интуитивно понятным. Как эталон можно рассматривать управление ускорением на личном транспорте. В этом случае педаль газа задает крутящий момент ДВС. Таким образом, степень нажатия педали газа пропорциональна прямолинейному ускорению автомобиля. Следовательно, момент, развиваемый на гидромоторе, должен быть пропорционален степени нажатия педали ускорения. Момент на гидромоторе, в свою очередь, прямо пропорционален разности давлений между линией высокого давления и низкого давления, а также текущему рабочему объему гидромотора. Текущие рабочие объемы гидромашин также определяют кинематическое передаточное отношение ГОП. Для упрощения задачи синтеза закона управления гидромашинами рассматривается разгон с места до максимальной скорости при полностью нажатой педали ускорения.

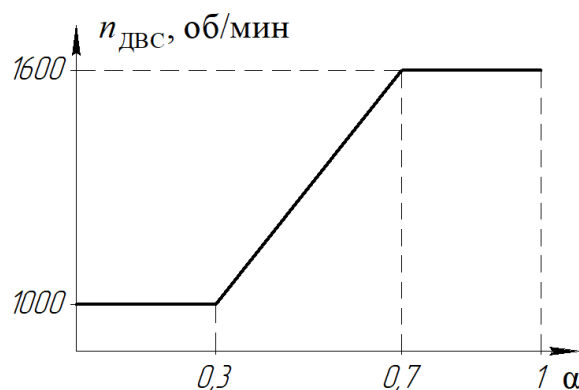


Рис. 3. Зависимость частоты вращения коленчатого вала ДВС от степени нажатия на педаль ускорения

Fig. 3. Dependence of the engine crankshaft speed on the degree of pressure on the acceleration pedal

Из рис. следует, что в этом случае ДВС будет работать на своих максимальных оборотах в течение всего процесса разгона, который можно разбить на два этапа. На первой стадии объем гидромотора максимален, обеспечивая наибольшее передаточное отношение и наибольший момент на колесах, объем гидронасоса меняется от нулевого к максимальному. Разгон осуществляется за счет постепенного увеличения подачи насоса.

На втором этапе объем гидромотора постепенно уменьшается от максимального к минимальному, обеспечивая уменьшение передаточного отношения и увеличение скорости вращения выходного вала, объем и подача насоса остаются неизменными.

Передаточные отношения в трансмиссии приведены в табл. 3.

Таблица 3.
Передаточные отношения трансмиссии

Table 3.
Transmission gear ratios

Параметр		Значение
Передаточное отношение от гидромотора к колесам, i_k	на повышенной передаче	43,85
	на пониженной передаче	136,8
Передаточное отношение между ДВС и валом гидронасоса, i_H		0,92

Изменение объема гидромотора разрешено только на повышенной передаче, так как пониженная передача предназначена для случаев движения машины в тяжелых дорожных условиях, что не предполагает высоких скоростей.

Можно приближенно определить максимальную скорость машины и скорость в момент завершения первого этапа разгона [1]:

$$v = \frac{q_H}{q_M} \cdot \frac{\omega_H r_k}{i_H i_k}, \quad (1)$$

где q_H – максимальный рабочий объем гидронасоса;
 q_M – максимальный рабочий объем гидромотора;
 ω_H – угловая скорость вала гидронасоса;
 r_k – радиус колеса.

Определенная по формуле (1) максимальная скорость равна 27 км/ч, а скорость в конце первого этапа разгона – 6 км/ч.

2. Метод разработки алгоритмов

Процесс разработки алгоритмов с использованием имитационных моделей можно условно разделить на три этапа (рис. 4) [2].

На первом из них используются имитационные модели объекта управления, системы управления и внешней среды. Формируется концепция разрабатываемых алгоритмов и их первоначальная отладка.

На втором этапе разработки полученные алгоритмы проверяются в составе программного обеспечения физического контроллера, который взаимодействует с имитационной моделью объекта управления.

На третьем этапе разработки происходит тестирование систем транспортного средства, в котором может участвовать имитационная модель воздействий внешней среды.

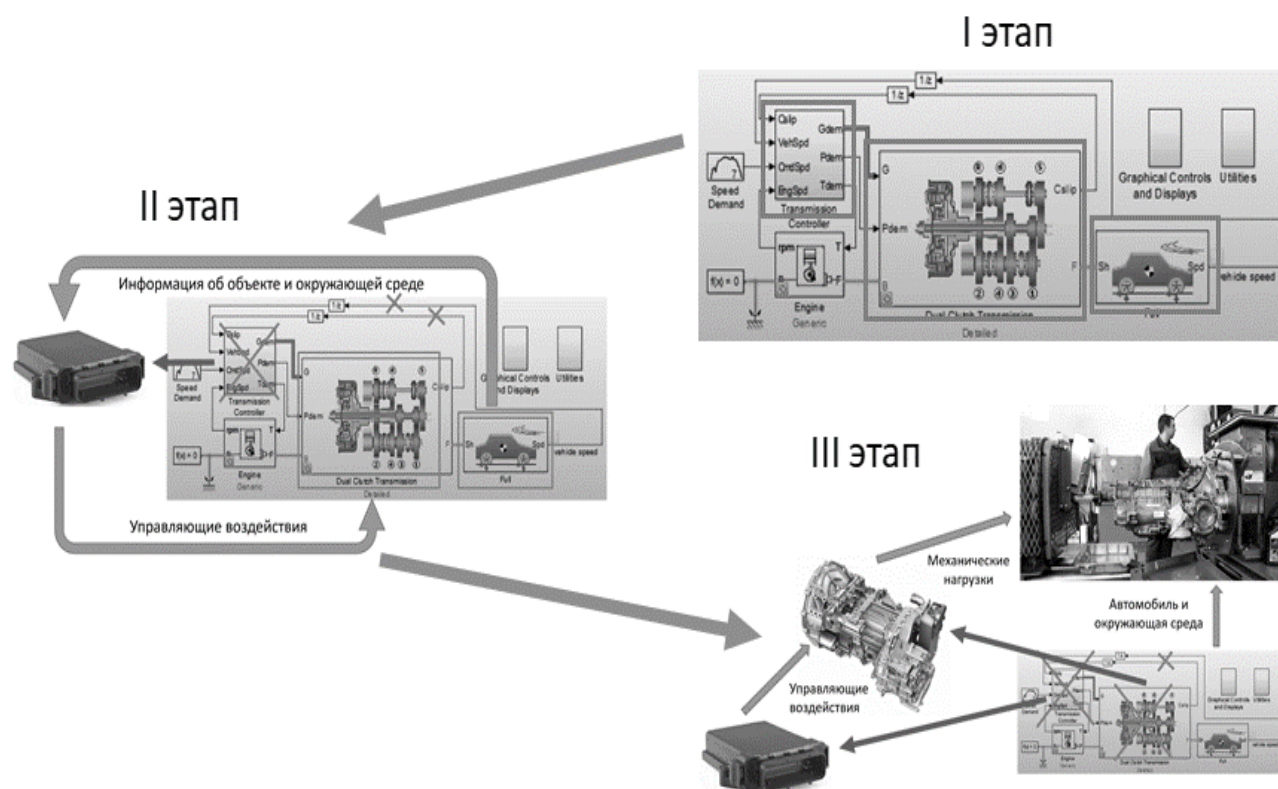


Рис. 4. Этапы разработки алгоритмов систем управления

Fig. 4. Stages of development of control system algorithms

При использовании данного подхода необходимо обеспечить функционирование имитационных моделей в режиме реального времени.

3. Предлагаемый алгоритм работы трансмиссии

Первоначально рассматривается разгон с места с максимальным возможным ускорением. В этом случае имеем постоянные обороты ДВС и, соответственно, гидронасоса.

Первый этап разгона предлагается обеспечить одним из наиболее простых способов – рабочий объем гидронасоса увеличивается в линейной пропорции относительно нажатия педали ускорения. Зависимость объема насоса от степени нажатия педали ускорения представлена на рис. 5.

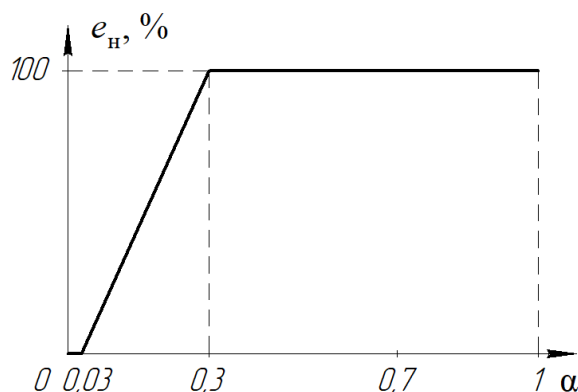


Рис. 5. Зависимость относительного рабочего объема гидронасоса от степени нажатия педали ускорения

Fig. 5. Dependence of the relative working volume of the hydraulic pump on the degree of pressing of the acceleration pedal

Если педаль ускорения будет нажата достаточно быстро, произойдет скачкообразное изменение рабочего объема гидронасоса, в связи с чем давление в напорной линии гидросистемы превысит давление настройки предохранительных клапанов, и произойдет их срабатывание, что нежелательно. Помимо этого, резкое изменение объема гидронасоса может привести к остановке двигателя за счет слишком быстрого появления нагрузки на коленчатом валу, которое не будет должным образом отработано регулятором оборотов ДВС.

Для предотвращения указанных явлений используется программное ограничение скорости нарастания и уменьшения объема гидронасоса, подбираемое таким образом, чтобы у водителя не возникало ощущения дискомфорта от запаздывания отклика на педаль ускорения и при этом негативные явления нивелировались.

На втором этапе разгона при постоянном объеме гидронасоса происходит уменьшение рабочего объема гидромотора. В качестве отправной точки закона изменения объема гидромотора в зависимости от угловой скорости вала гидромотора можно принять зависимость (рис. 6), полученную из уравнения равенства расходов гидромашин [1]:

$$q_H \omega_H = q_M \omega_M, \quad (2)$$

где ω_M – угловая скорость вала гидромотора.

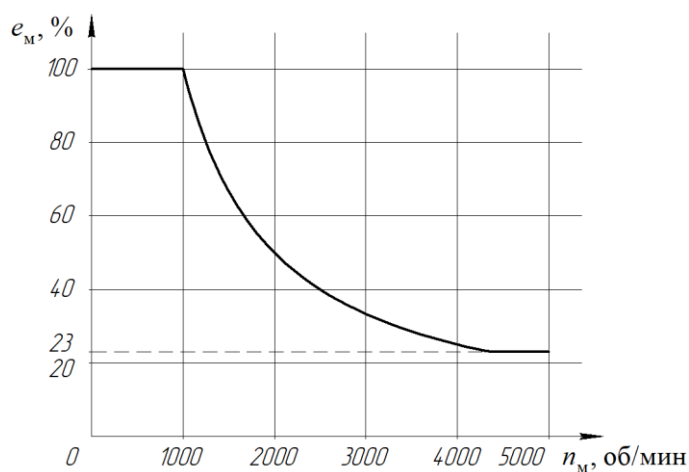


Рис. 6. Зависимость относительного рабочего объема гидромотора от частоты вращения вала гидромотора

Fig. 6. Dependence of the relative working volume of the hydraulic motor on the rotation frequency of the hydraulic motor shaft

Кривая на рис. 6 демонстрирует необходимый рабочий объем гидромотора при заданных оборотах насоса и мотора для «идеального» ГОП, в котором полностью отсутствуют объемные потери. При изменении объема гидромотора, согласно зависимости на рис. 6, не удастся достичь ускорения машины. В ней не учитывается наличие механических потерь в узлах трансмиссии, сопротивление движению машины, объемные потери в ГОП. Работа гидромотора по данной зависимости должна привести к постепенному уменьшению скорости машины. Для использования данной зависимости вводится дополнительная корректировка, призванная согласовать степень нажатия педали ускорения с требуемым объемом гидромотора для достижения необходимой интенсивности разгона машины (рис. 7). Для случая разгона с максимальным ускорением корректировка будет заключаться в умножении значения, полученного в соответствии с кривой изменения объема гидромотора, на постоянный коэффициент (поскольку степень нажатия педали ускорения постоянна и равна единице).

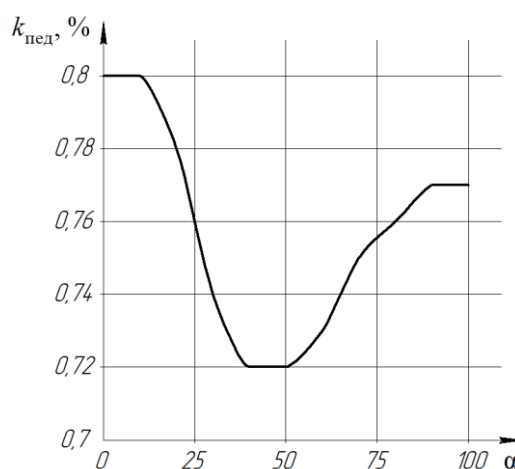


Рис. 7. Коэффициент корректировки объема гидромотора в зависимости от степени нажатия на педаль ускорения

Fig. 7. Coefficient of correction of the hydraulic motor volume depending on the degree of pressing on the acceleration pedal

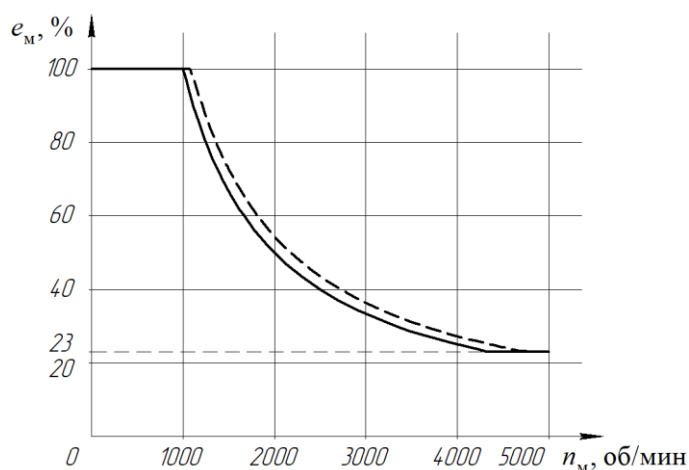


Рис. 8. Итоговая зависимость относительного рабочего объема гидромотора от частоты вращения вала гидромотора (сплошная линия), исходная зависимость (пунктир)

Fig. 8. The final dependence of the relative working volume of the hydraulic motor on the rotation frequency of the hydraulic motor shaft (solid line), the initial dependence (dashed line)

Отсюда вытекает принцип подбора итоговой кривой (рис. 8) изменения объема гидромотора при экспериментах на модели и на опытном образце, заключающийся в обеспечении разгона при постоянном значении перепада давлений в гидролиниях ГОП. Для разгона с

максимальным возможным ускорением давление в гидролиниях должно быть меньше давления срабатывания предохранительных клапанов на величину, при которой возможные пульсации давления не будут приводить к срабатыванию последних. Коэффициенты корректировки кривой изменения объема гидромотора в зависимости от степени нажатия педали ускорения (рис. 7) можно подобрать, опираясь на величину перепада давлений в гидролиниях ГОП, так как она пропорциональна ускорению машины. По рис. 7 можно видеть, что диапазон изменения коэффициента корректировки мал, при работе двигателя по зависимости на рис. 2 требуемое изменение ускорения машины в зависимости от степени нажатия педали ускорения достигается за счет изменения подачи насоса вследствие изменения частоты вращения вала двигателя и насоса соответственно.

В заключение данного раздела необходимо отметить не оговоренные ранее особенности работы алгоритма, обеспечивающие «переключение» между процессами изменения объема гидронасоса и гидромотора. В течение первого этапа разгона, до тех пор, пока относительный рабочий объем насоса не превысит отметки 90 % изменение объема мотора запрещено. После перехода ко второму этапу разгона изменение объема насоса запрещено, если относительный объем мотора меньше 70 %. Таким образом обеспечивается переход между этапами при разгоне и при замедлении.

4. Описание имитационной модели

В использованной имитационной модели ГОП используются следующие основные допущения:

- свойства рабочей жидкости описываются приведенным модулем упругости, принимаемым постоянной величиной,
- не учитываются потери энергии на местных сопротивлениях и потери на трение в гидролиниях,
- работа системы подпитки, системы промывки гидролиний и предохранительных клапанов определяется по упрощенным зависимостям, не принимаются в расчет конструктивные особенности систем, инерционность их работы,
- изменение объемов гидромашин происходит мгновенно, при появлении соответствующего управляющего воздействия.

Давление рабочей жидкости в гидролиниях определяется по зависимости:

$$p = \frac{E_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}} \int L_{\text{сж}}(t) dt, \quad (3)$$

где p – давление в гидролинии;

$E_{\text{ж}}$ – приведенный объемный модуль упругости рабочей жидкости;

$V_{\text{ж}}$ – объем гидролинии с учетом частей рабочих объемов гидронасоса и гидромотора, связанных с данной линией;

$L_{\text{сж}}$ – объем жидкости, поступающий в гидролинию в единицу времени.

Если представить уравнение (3) в дифференциальном виде и записать составляющие $L_{\text{сж}}$, получим:

$$q_{\text{Н}} n_{\text{Н}} e_{\text{Н}} - q_{\text{М}} n_{\text{М}} e_{\text{М}} - Q_{\text{сл}_1} + Q_{\text{подк}_1} - Q_{\text{ут}} - Q_{\text{ут в н}_1} - Q_{\text{пр}_1} = \frac{V_{\text{ж}_1}}{E_{\text{ж}}} \frac{dp_1}{dt}$$

для линии высокого давления,

$$-q_{\text{Н}} n_{\text{Н}} e_{\text{Н}} + q_{\text{М}} n_{\text{М}} e_{\text{М}} - Q_{\text{сл}_2} + Q_{\text{подк}_2} + Q_{\text{ут}} - Q_{\text{ут в н}_2} - Q_{\text{пр}_2} = \frac{V_{\text{ж}_2}}{E_{\text{ж}}} \frac{dp_2}{dt} \quad (4)$$

для линии низкого давления,

где $n_{\text{Н}}, n_{\text{М}}$ – скорость вращения вала гидронасоса и гидромотора соответственно;

$e_{\text{Н}}, e_{\text{М}}$ – параметр регулирования гидронасоса и гидромотора соответственно, может принимать значения из отрезка $[-1; 1]$;

$Q_{сл_1}, Q_{сл_2}$ – расходы через сливные клапана в линии высокого и низкого давления соответственно;

$Q_{подк_1}, Q_{подк_2}$ – расходы через клапана подпитки гидролиний;

$Q_{ут}$ – внутренние утечки жидкости в гидронасосе и гидромоторе;

$Q_{ут\ вн_1}, Q_{ут\ вн_2}$ – внешние утечки жидкости в линии высокого и низкого давления соответственно;

$Q_{пр_1}, Q_{пр_2}$ – расходы через узел промывки гидролиний;

p_1, p_2 – давление в линии высокого и низкого давления соответственно.

Внутренние утечки жидкости в гидромашинах определяются по формуле [3, 4]:

$$Q_{ут} = k_{ут.внутр}(p_1 - p_2) \quad (5)$$

где $k_{ут.внутр}$ – коэффициент внутренних утечек гидромашин.

Внешние утечки жидкости в гидромашинах определяются по формуле [3, 4]:

$$Q_{ут\ вн\ i} = k_{ут.внеш\ i} p_i \quad (6)$$

где $k_{ут.внеш\ i}$ – коэффициент внешних утечек для гидролинии.

Расходы $Q_{кл_1}, Q_{кл_2}, Q_{подк_1}, Q_{подк_2}, Q_{пр_1}, Q_{пр_2}$ определяются согласно зависимостям (7), (8), (9):

$$\begin{cases} Q_{сл\ i} = Q_{кл\ max} \text{th}(k_{сл}(p_i - p_{max})), \text{ если } p_i > p_{max} \\ Q_{сл\ i} = 0, \text{ если } p_i \leq p_{max} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_{подк\ i} = Q_{подк\ max} \text{th}(k_{подк}(p_i - p_{min})), \text{ если } p_i < p_{min} \\ Q_{подк\ i} = 0, \text{ если } p_i \geq p_{min} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_{пр\ i} = Q_{пр\ max} \text{th}(k_{пр}(p_i - p_{пр})), \text{ если } (p_i > p_{пр}) \wedge (p_i > p_j), \\ Q_{пр\ i} = 0, \text{ если } \neg((p_i > p_{пр}) \wedge (p_i > p_j)), \\ Q_{пр\ j} = 0, \\ p_i = \max(p_1, p_2), \\ p_j = \min(p_1, p_2), \end{cases} \quad (9)$$

где $Q_{кл\ max}, Q_{подк\ max}, Q_{пр\ max}$ – константы, определяющие максимальные расходы через сливные клапаны, клапаны подкачки и узел промывки соответственно;

$k_{сл}, k_{подк}, k_{пр}$ – коэффициент, определяющий характеристику расхода клапана в зависимости от перепада давления;

p_{max} – максимальное допустимое давление в гидролинии;

p_{min} – давление подкачки;

$p_{пр}$ – давление открытия клапана промывки.

Переход от разности давлений в гидролиниях к теоретическому крутящему моменту, реализуемому на гидронасосе и гидромоторе, происходит по следующим зависимостям [1]:

$$\begin{aligned} T_{т.н} &= 0,159(p_2 - p_1)q_n\epsilon_n, \\ T_{т.м} &= 0,159(p_1 - p_2)q_m\epsilon_m. \end{aligned} \quad (10)$$

Для определения крутящего момента механических потерь можно использовать предложенную зависимость:

$$T_{пот} = -\text{sign}(\omega) \cdot T_{тр} \left(\left(1 - e^{-\frac{1}{S_1}|\omega|} \right) + S_2|\omega| \right), \quad (11)$$

где ω – угловая скорость вращения вала гидромашин;

$T_{тр}$ – момент сопротивления в момент страгивания вала гидромашины;

S_1, S_2 – положительные константы, определяющие вид кривой момента сопротивления.

Фактический момент на валу гидромашины равен сумме теоретического момента и момента механических потерь:

$$\begin{aligned} T_H &= T_{т.Н} + T_{пот.Н} \\ T_M &= T_{т.М} + T_{пот.М} \end{aligned} \quad (12)$$

Предложенные зависимости позволяют реализовать работу модели в режиме реального времени на современном персональном компьютере, а также обеспечивают повторяемость результатов моделирования при использовании различных методов и при различных шагах интегрирования.

5. Проведение эксперимента

Для демонстрации работы имитационной модели и сравнения результатов имитационного моделирования с экспериментом на прототипе, при отладке работы алгоритма на машине была проведена запись следующих параметров:

- давления в гидролиниях ГОП;
- частоты вращения гидронасоса и гидромотора;
- степени нажатия на педаль ускорения.

Для проведения вычислительного эксперимента на имитационной модели, в качестве исходных данных была использована запись степени нажатия на педаль ускорения. На рис. 9 можно видеть запись степени нажатия педали ускорения в эксперименте на машине. Соответствующий отклик ДВС, согласно зависимости на рис. 3, можно отследить по частоте вращения гидронасоса. На рис. 10 продемонстрирован запрос относительного рабочего объема гидромотора в процессе разгона и частота вращения гидромотора. По данным графикам можно видеть работу гидромотора по зависимости на рис. 6.

Рис. 11 демонстрирует давления в гидролиниях в процессе разгона. Можно видеть, что при полностью нажатой педали ускорения давления близки к давлению открытия предохранительных клапанов, но не превышают его, что говорит о корректной работе алгоритмов управления трансмиссией.

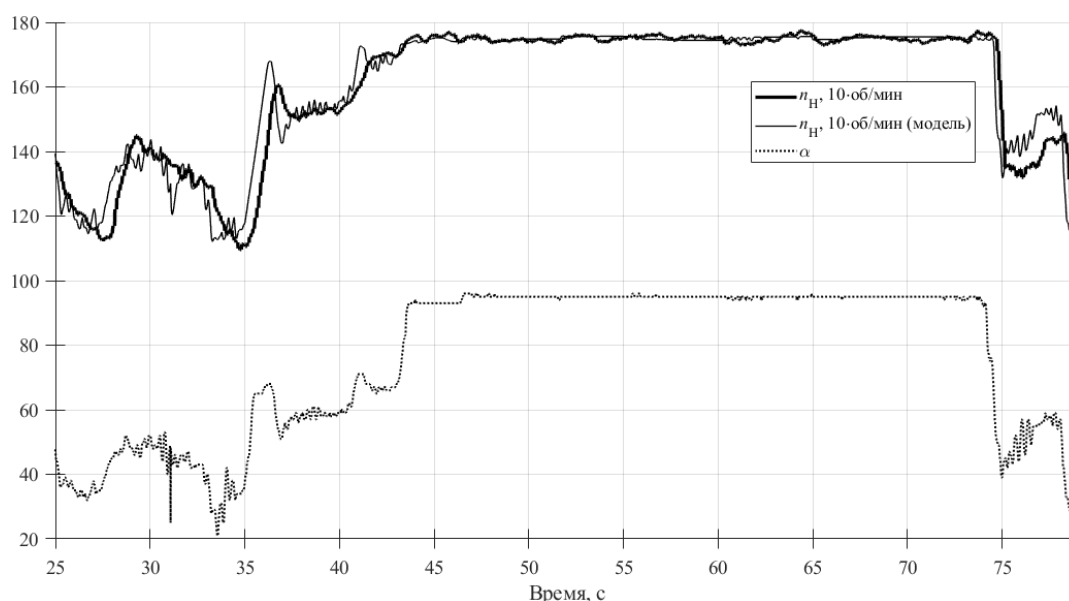


Рис. 9. Частота вращения вала гидронасоса и степень нажатия на педаль ускорения в натурном и вычислительном эксперименте

Fig. 9. Rotation frequency of the hydraulic pump shaft and the degree of pressing on the acceleration pedal in natural experiment and simulation

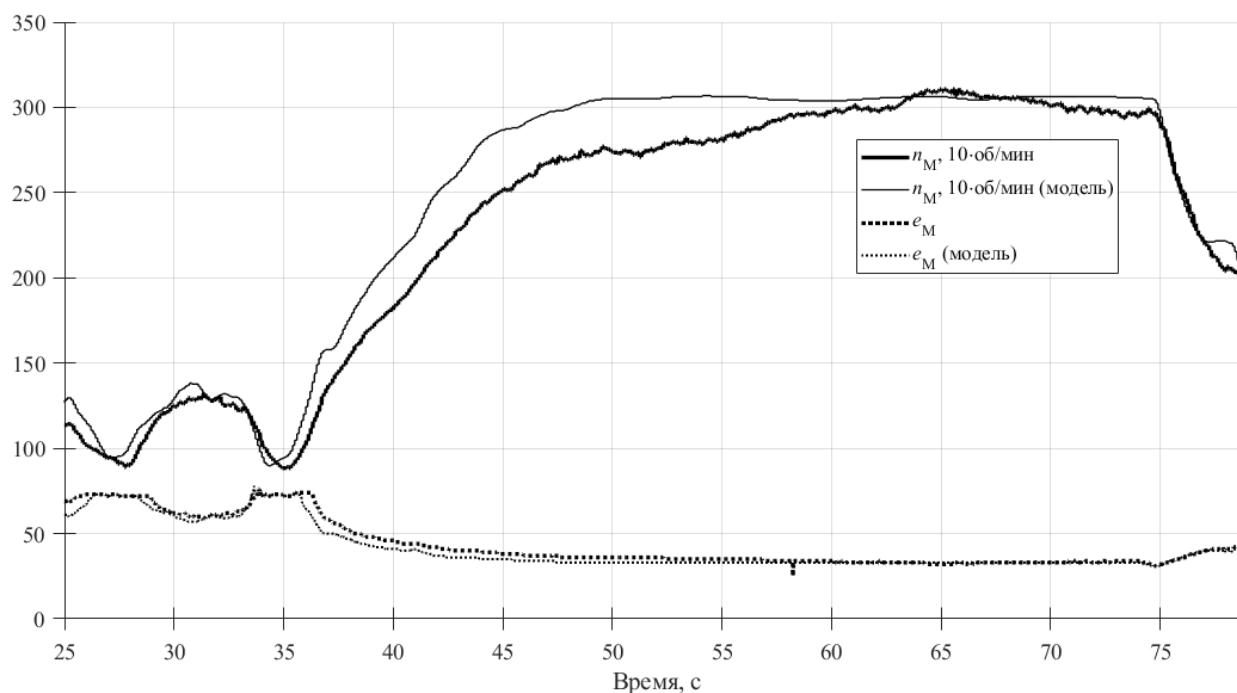


Рис. 10. Частота вращения вала гидромотора и относительный рабочий объем гидромотора в натурном и вычислительном экспериментах

Fig. 10. Rotational frequency of the hydraulic motor shaft and relative working volume of the hydraulic motor in natural experiment and simulation

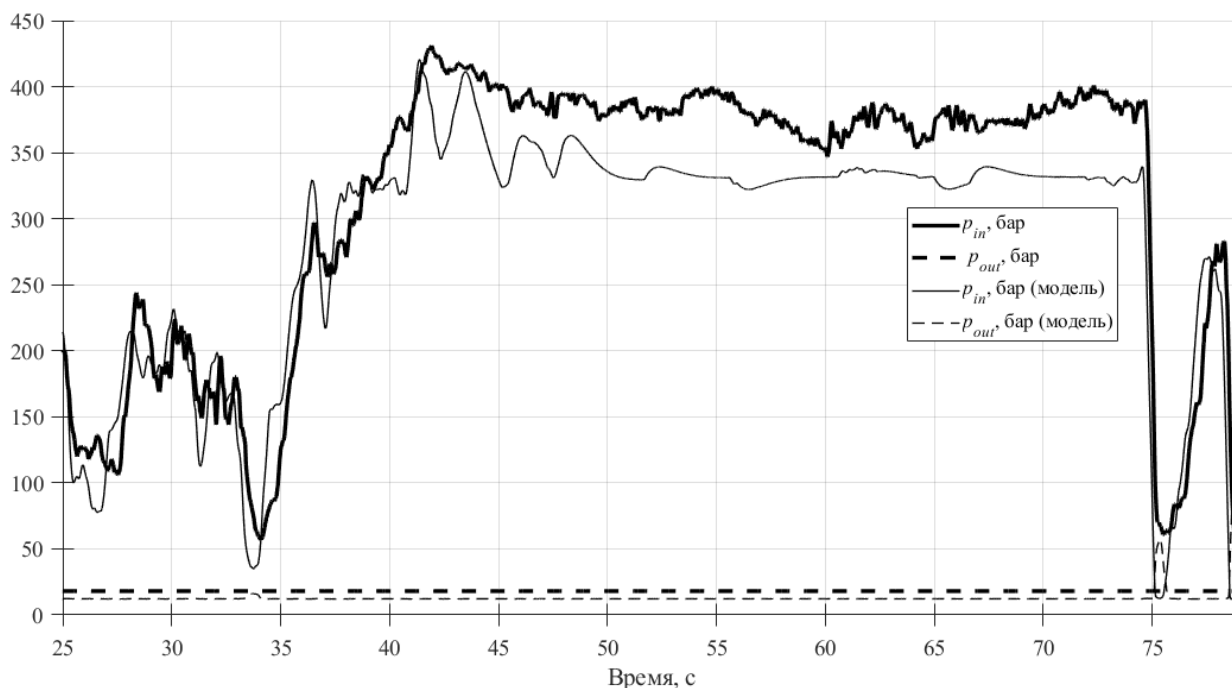


Рис. 11. Давления в гидролиниях ГОП в натурном и вычислительном эксперименте

Fig. 11. Pressures in hydrostatic transmission lines in natural experiment and simulation

Сравнивая результаты эксперимента с результатами имитационного моделирования можно отметить, в первую очередь их качественное совпадение. Максимальное расхождение результатов наблюдается в значениях давления и составляет порядка 18%, при этом после первой итерации отладки алгоритмов на машине не составит труда учесть это отклонение.

Оценивая работу имитационной модели в целом, можно заключить, что ее точность достаточна для решаемых задач разработки алгоритмов.

Заключение

Имитационное моделирование является мощным инструментом разработки и проектирования новых образцов техники. Применение имитационных моделей реального времени позволяет ускорить процесс разработки, сэкономить материальные ресурсы на отладке и изучить широкий спектр эксплуатационных режимов проектируемой техники.

В данной работе рассмотрен пример разработки алгоритмов с применением имитационного моделирования. Впоследствии разработка была успешно внедрена в систему управления опытной машины. Сравнение результатов моделирования и натурного эксперимента позволяет сделать вывод о достаточной, для рассматриваемых целей, точности имитационной модели и состоятельности приведенного подхода к проектированию.

Библиографический список

1. **Башта, Т.М.** Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
2. **Бузунов, Н.В.** Моделирование движения колесных машин в режиме «реального времени» для реализации бортовых систем управления автономным ходом / Н.В. Бузунов, Г.О. Котиев, Б.В. Падалкин // Международный автомобильный научный форум (МАНФ-2018) «Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем» – 2018. – М.: НАМИ, 2018. С. 490-503.
3. **Sun, H.** Robust Inverse Dynamics Control for a Hydrostatic Transmission with Actuator Uncertainties / H. Sum, H. Ashemann // 6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems – 2013. Pp. 116-124.
4. **Jelali, M.** Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control / M. Jelali, A. Kroll – London: Springer-Verlag, 2003. – 355 p.

*Дата поступления
в редакцию: 04.06.2024*

*Дата принятия
к публикации: 28.12.2024*

УДК 629.015

EDN: LIBSTS

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ

А.В. Климов

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Исследовано влияние S-образного закона назначения крутящего момента в управлении электромеханической силовой передачей на динамическую нагруженность механической трансмиссии и энергоэффективность движения. Показана возможность исключения возбуждения колебаний при изменении режима движения и направления приложения нагрузки в механической трансмиссии силовой передачи. Высокое значение рекуперативного момента при отпуске педали хода и движении в тормозном режиме снижает эффективность движения, увеличивая удельные энергозатраты. Применение S-образного закона назначения крутящего момента возможно для реализации алгоритмов управления движением и реализации программного обеспечения.

Ключевые слова: колебания в электромеханической силовой передаче, пересопряжение зубьев, динамическая нагруженность, S-образный закон задания момента, энергоэффективность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Климов, А.В. Влияние закона управления на колебательные процессы в электромеханическом приводе // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 79-86. EDN: LIBSTS

THE INFLUENCE OF THE CONTROL LAW ON OSCILLATORY PROCESSES IN AN ELECTROMECHANICAL DRIVE

A.V. Klimov

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

Abstract. The influence of the S-shaped law of torque assignment in the control of an electromechanical power transmission on the dynamic load of a mechanical transmission and on the energy efficiency of movement is studied. The possibility of excluding the excitation of oscillations when changing the driving mode and the direction of load application in the mechanical transmission of the power transmission is shown. A high value of the regenerative torque when releasing the accelerator pedal and moving in braking mode reduces the movement efficiency, increasing the specific energy consumption. The application of the S-shaped law of torque assignment is possible for the implementation of motion control algorithms and software implementation.

Key words: oscillations in an electromechanical power transmission, overstretching of teeth, dynamic loading, S-shaped law of torque setting, energy efficiency.

FOR CITATION: A.V. Klimov. The influence of the control law on oscillatory processes in an electromechanical drive. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 79-86. EDN: LIBSTS

Введение

Транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии сегодня все чаще встречаются на дорогах. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы в качестве общественного пассажирского транспорта и грузовые электромобили, используемые для различных нужд. Главным свойством данной техники является обеспечение требуемого запаса хода на одной подзарядке. Для этого необходимо применять совершенные компоненты

силовой передачи, источники энергии и методы управления, обеспечивающие минимизацию энергозатрат. Поскольку процессы в электромеханической силовой передаче протекают с высокой скоростью, в контуре управления двигателем с частотами до 10 кГц и более, при наличии низкой инерционности и жесткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. В особенности важны режимы изменения условий движения (тяговый, ведомый, тормозной), сопровождаемые изменением направления усилия в зоне контакта колеса с дорогой и направления приложения нагрузки в зубчатых зацеплениях. Данный процесс сопровождается пересопряжением, т.е. вхождением в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента данный процесс может сопровождаться ударом с последующим возбуждением фрикционных колебаний. Поэтому важно эффективно управлять назначением крутящего момента для устранения данных негативных явлений.

Электромеханическая силовая передача, включающая тяговый привод и механическую трансмиссию, позволяет реализовывать рекуперативное замедление при отпуске педали хода. При этом можно выделить три зоны работы привода в зависимости от положения педали: I – тормозной режим; II – режим движения по инерции; III – тяговый режим (рис. 1-3).

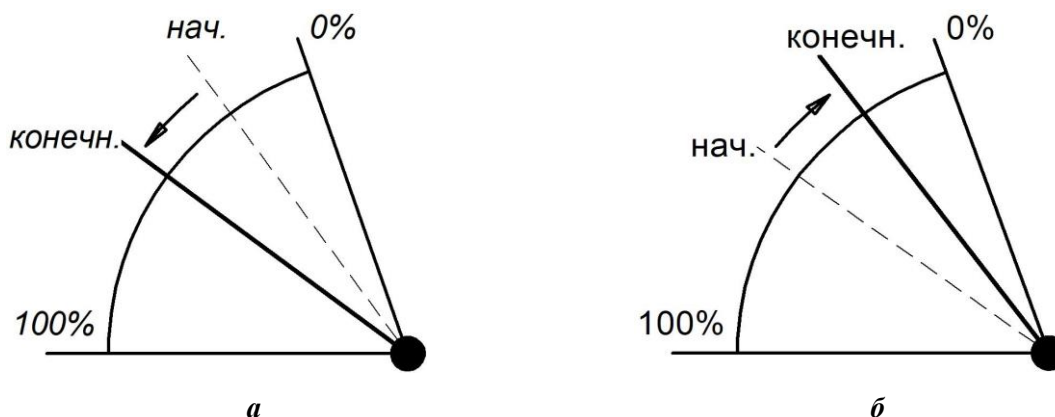


Рис. 1. Основные принципы управления ускорением и замедлением:
а – при разгоне (ускорении); б – при замедлении (торможении)

Fig. 1. Basic principles of acceleration and deceleration control:
a – during acceleration; b – during deceleration (braking)

В режиме движения по инерции для снижения динамической нагруженности механической трансмиссии электродвигатель может реализовывать небольшой рекуперативный момент. С этой точки зрения особенно важен переход между тяговым и тормозным режимами, так как в этих случаях происходит изменение направления приложения нагрузки в зубчатых передачах. Поскольку инерция электропривода мала, в данном случае могут наблюдаться ударные нагрузки в зацеплениях механической передачи, проявляющиеся в колебаниях частоты вращения валов. Данное явление может возникать из-за изменения нагрузки как на выходном звене (колесе), так и на входном (вал электродвигателя). Последнее происходит в силу высокой жесткости внешней характеристики привода и колебаний (пульсаций) крутящего момента из-за несовершенной электромагнитной системы и методов управления.

Очень важно реализовывать методы управления крутящим моментом, позволяющие исключить или минимизировать дополнительные динамические нагрузки. Данной проблемой определяется цель работы: проверка влияния законов задания момента на динамическую нагруженность различных.

Исследование характера различных зависимостей задания крутящего момента на динамическую нагруженность механических передач электропривода можно выполнять методами натурных экспериментальных исследований.

Исследование характера зависимости крутящего момента от положения педали хода

Существует как монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали (рис. 2), так и S-образный (рис. 3) [1-13].

Значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции h_{dru} – h_{drd} обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше пересопряжений при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колесах, а также влияет на энергоэффективность движения.

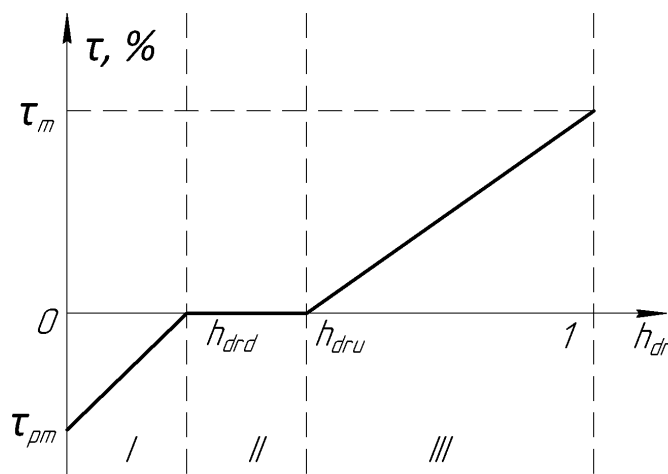


Рис. 2. Монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали

Fig. 2. Monotonous nature of the dependence of torque settings on pedal position

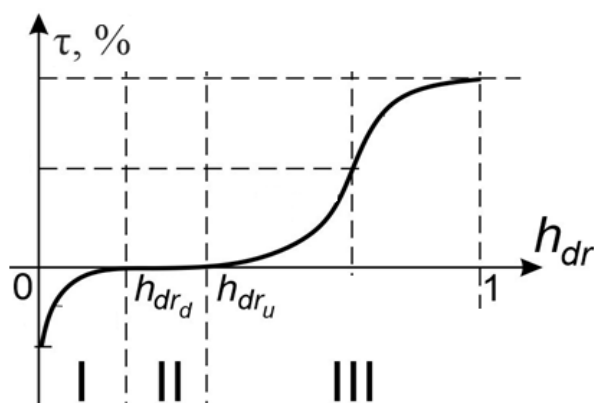


Рис. 3. S-образный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали [14]

Fig. 3. S-shaped dependence of torque settings on pedal position [14]

Были проведены испытательные заезды транспортного средства [15], имеющего как монотонный, так и S-образный характер зависимостей крутящих моментов, при которых осуществлялись разгоны после трогания с места по прямой при нажатии педали хода и замедления при ее отпускании на ровной асфальтовой дороге. На ведущие колеса были установлены тензометрические колеса *KistlerRim* для фиксации силовых и кинематических параметров. Дополнительно параметры фиксировались с помощью штатных датчиков с CAN шины. При этом фиксировались значения угловых скоростей вала электродвигателя и положение педали хода. Для монотонного характера зависимости реализации процесса изменения положения педали хода и значений частоты вращения вала ротора приведены на рис. 4.

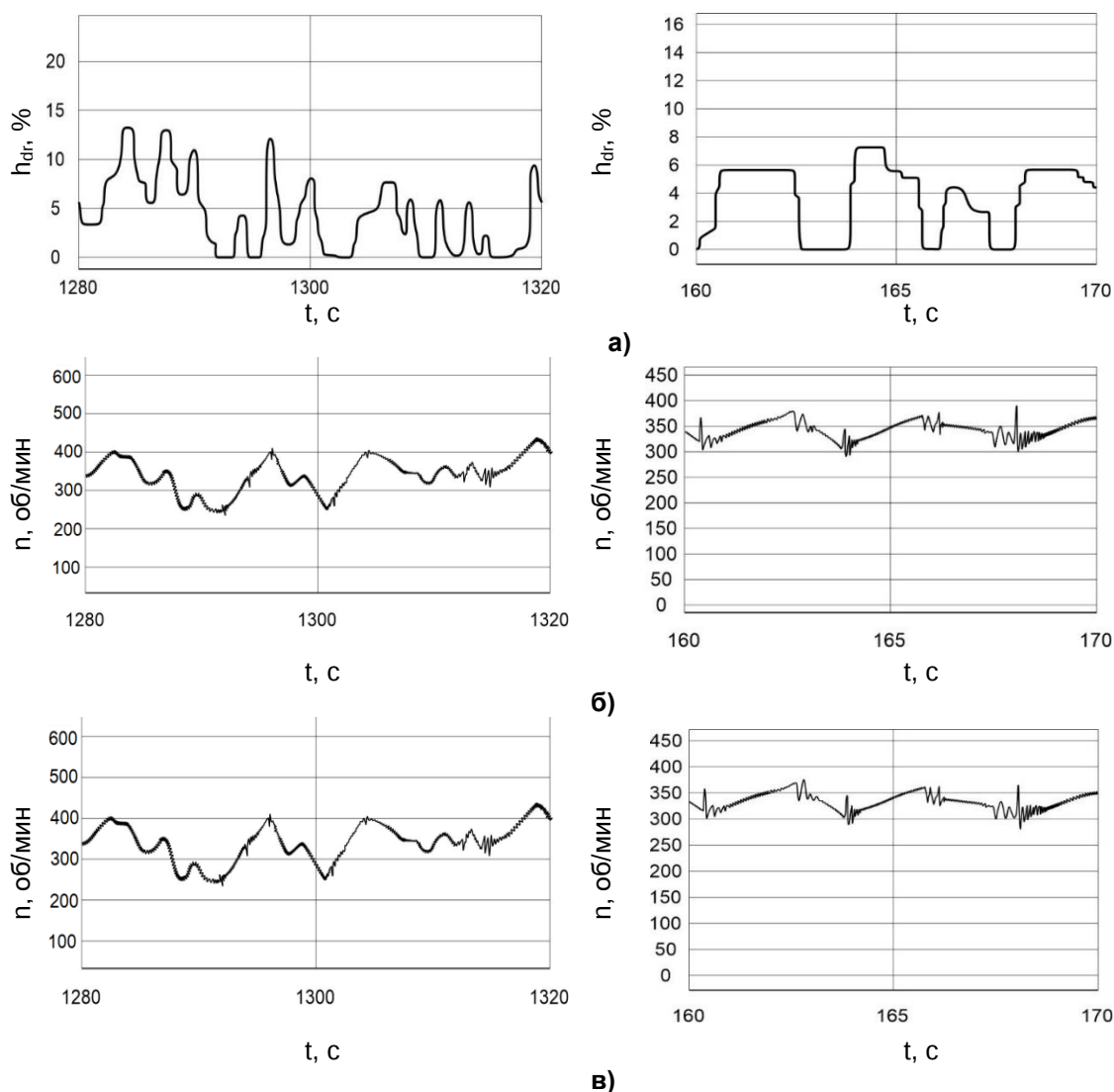


Рис. 4. Реализации частот вращения роторов тяговых электродвигателей при монотонном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):
 а) положение педали хода, %; б) частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
 в) частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин

Fig. 4. Realizations of rotation frequencies of traction electric motor rotors with a monotonic nature of the dependence of torque settings (left – fragment 1; right – fragment 2):
 а) position of the accelerator pedal, %; б) rotation frequency of the rotor of the left electric motor, rpm;
 в) rotation frequency of the rotor of the right electric motor, rpm

На рис. 4 отчетливо видны всплески на графиках угловых скоростей вращения роторов тяговых электродвигателей, свидетельствующие об ударной переключке зубьев в механической передаче. Данные всплески реализаций могут в дальнейшем провоцировать автоколебания в механической трансмиссии, которым могут способствовать процессы в зоне контакта шины с дорогой [16-36], а также в электрической машине [37, 38] подавляемые в последствие с помощью управления электромеханическим приводом [39].

S-образный характер зависимости уставки крутящего момента тягового электродвигателя положительно сказывается на режимах работы механического привода, позволяя избежать ударной переключки (пересопряжения зубьев). Реализации значений положения педали и частоты вращения вала двигателя приведены на рис. 5.

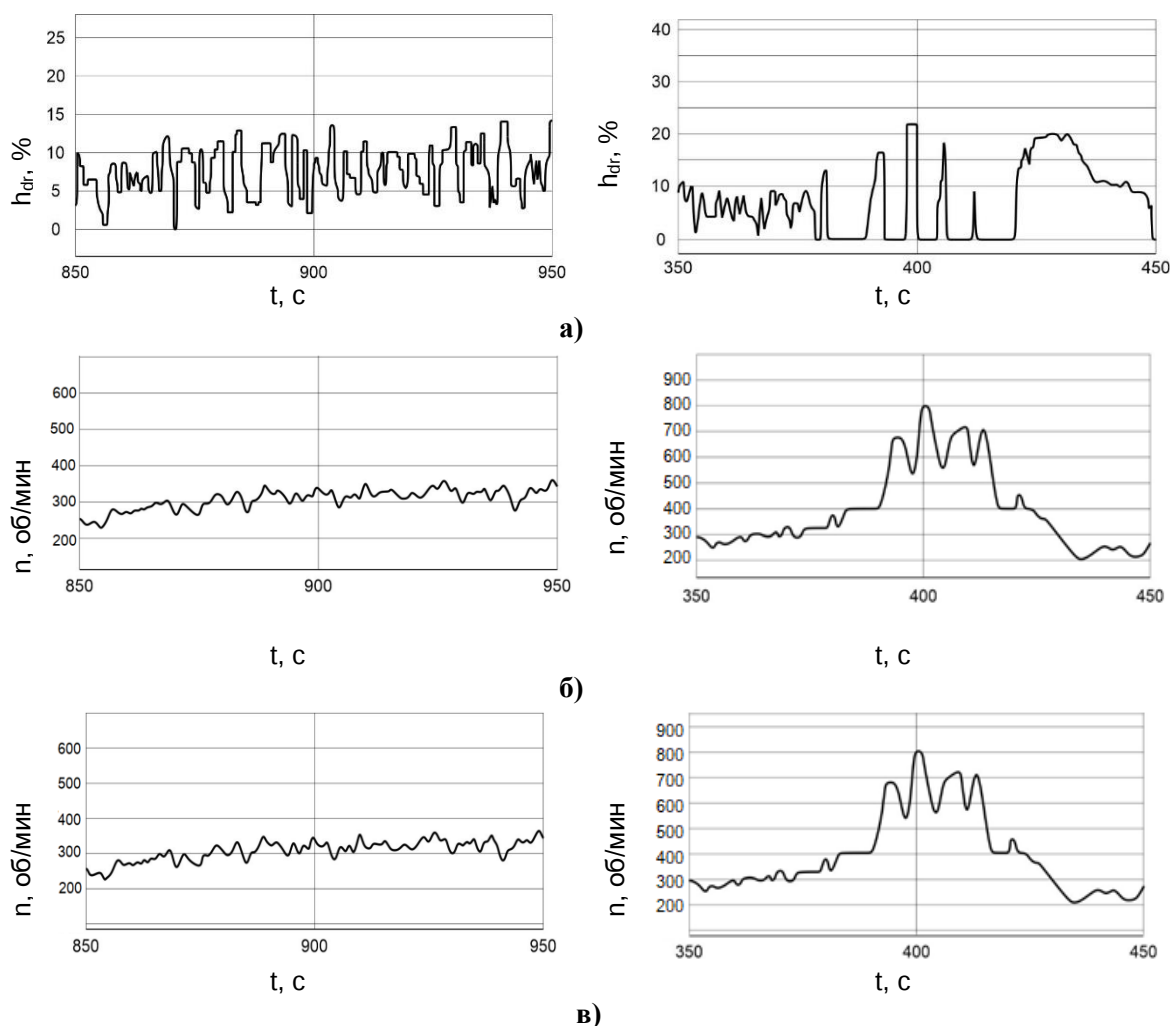


Рис. 5. Реализации положения педали хода и частот вращения роторов тяговых электродвигателей при S-образном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):

а) положение педали хода, %; б) частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин; в) частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин

Fig. 5. Realizations of the position of the accelerator pedal and the rotation frequencies of traction electric motor rotors with an S-shaped dependence of torque settings (left – fragment 1; right – fragment 2):

a) the position of the accelerator pedal, %; b) rotation frequency of the rotor of the left electric motor, rpm; c) rotation frequency of the rotor of the right electric motor, rpm

Исследование величины рекуперативного момента на энергоэффективность

Наличие режима замедления при отпускании педали хода (зоны I и II – рис. 2, 3) позволяет не только снизить динамическую нагруженность механических передач при переходных режимах движения, но и повысить энергоэффективность. Влияние на энергоэффективность проанализировано в процессе испытательных заездов исследуемого транспортного средства при осуществлении движения по циклу соответствующему городскому движению. Влияние величины рекуперативного момента при движении по инерции приведены в табл. 1.

При уменьшении рекуперативного крутящего момента удельный расход энергии на движение снижается, ввиду увеличения общего пути, пройденного транспортным средством. Однако величина уставки максимального рекуперативного момента при электродинамическом торможении и при движении по инерции должна иметь возможность настройки водителем или изменяться адаптивно в зависимости от условий движения.

Таблица 1.

Влияние уставки рекуперативного момента в диапазоне положения педали $h_{dru} - h_{drd}$

Table 1.

Effect of regenerative torque setting in the pedal position range $h_{dru} - h_{drd}$

Рекуперативный крутящий момент в диапазоне $h_{dru} - h_{drd}$, Нм	25	40	60	80
Удельный расход энергии на движение, кВт·ч/км	0,80	0,80	0,83	0,82
	0,55	0,57	0,56	0,57
	0,74	0,75	0,78	0,79

Высокое значение момента способствует излишней динамике замедления и уменьшает путь выбега, что мало энергоэффективно. Низкий рекуперативный момент не обеспечивает требуемого замедления при движении накатом.

Выводы

При введении в управление электромеханической силовой передачей S-образного закона управления устраняются колебательные явления в механических передачах при изменении режима движения с тягового на тормозной или движения по инерции, что выражается в отсутствие всплесков угловых скоростей вращения деталей. При этом снижается их динамическая нагруженность при изменении направления нагрузки в зубчатых зацеплениях – пересопряжении зубьев, за счет достижения изменения режима при нулевых производных изменения крутящего момента электродвигателя.

Величина рекуперативного момента, развиваемого электродвигателем при отпускании педали хода, влияет на энергоэффективность движения. Высокие значения рекуперативного момента увеличивают удельные затраты энергии за счет уменьшения тормозного пути на выбеге, что заставляет водителя воздействовать на педаль хода, переводя силовую передачу в тяговый режим.

Библиографический список

1. Бутарович, Д.О. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора / Д.О. Бутарович, Г.И. Скотников, А.В. Эраносян // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 275-281.
2. Wen, He. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm / He Wen, Ch. Wang, Hui, Jia // Energy Procedia. 2018. Vol. 152. Pp. 624-629. – doi:10.1016/j.egypro.2018.09.221
3. Yongqiang, Zhao. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID / Zhao Yongqiang, Xin Zhang, Jiashi Li et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1605.
4. Hongwen, He. An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle / He Hongwen, Chen Wang; Hui Jia, Xing Cui // Applied Energy. 2020. No 259. (C). – doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.
5. Zhang, J. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car / J. Zhang, C. Lv, J. Gou et al. // Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng 2012;226(10). Pp. 1289-302.
6. Guo, J. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C] / J. Guo, J. Wang, B. Cao // Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2009. Pp. 864-868.
7. Guoqing. Xu. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J] / Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun et al. // Energies. 2011. No 4 (9). Pp. 1461-1477.
8. Zhang, J. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J] / J. Zhang, C. Lv, M. Qiu et al. // Energy Conversion & Management, 2013, 76(76):1117-1124.

9. **Wang, J.W.** Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J] / J.W. Wang, S.H. Tsai, H.X. Li et al. // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018.
10. **Zhang, K.** A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J] / K. Zhang, Xu Liangfei et al. // Automotive Engineering. 2015. No 02. Pp. 125-131.
11. **Lv, C.** Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J] / C. Lv, J. Zhang, Y. Li et al. // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 92. Pp. 469-482.
12. **Kulas, R.A.** A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving / Kulas, R.A., Rieland, H., and Pechauer, J., // SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019, doi:10.4271/2019-01-0133.
13. **Wang, J.** Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. / J. Wang, I. Besselink, J. M., J. J. van Boekel, H. Nijmeijer // Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium.
14. Способ управления ускорением и замедлением транспортного средства тяговым электрическим приводом с помощью одной педали хода. Климов А.В., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Анто-
нян А.В., Давоян Г.Ю. Патент на изобретение 2799275 С1, 04.07.2023. Заявка № 2023110482 от 24.04.2023.
15. Электробус КАМАЗ-6282. Официальный сайт [Электронный ресурс]: https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения 04.03.2024).
16. Вильке, В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля / Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2015. № 4. С. 33-39.
17. **Кручинин, П.А.** Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения / П.А. Кручинин, М.Х. Магомедов, И.В. Новожилов // Известия РАН, серия МТТ. 2001, № 6, С. 63-69.
18. **Awrejcewicz, J.** Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction / J. Awrejcewicz, L. Dzyubak, C. Gheorghi // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 42. № 2. P. 383-394.
19. **Pascal, M.** Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2006. Vol. 1. №1. P. 94-102.
20. **Shin, K.** Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model / K. Shin, M.J. Brennan, J.-E. Oh, C.J. Harris // Journal of Sound and Vibration. 2002. Vol. 254. № 5. P. 837-848.
21. **Ергин, А.А.** Антиблокировочная система управления тормозным приводом колеса автомобиля / А.А. Ергин, М.Б. Коломейцева, Г.О. Котиев Г.О. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 9. С. 11-13.
22. **Soliman, A.** An investigation of anti-lock braking system for automobiles / A. Soliman, M. Kaldas //SAE Tech. Paper. 2012. No 2012-01-0209. – doi: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
23. Sun, C. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system / C. Sun, Pei //SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2015. Vol. 8, No 1. Pp. 14-21. – doi: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>.
24. **Sabbioni, E.** Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench / E. Sabbioni, F. Cheli, V. d'Alessandro // SAE Tech. Paper. 2011. No. 2011-01-0032, – doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
25. **Жилейкин, М.М.** Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 3-15. – doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15.
26. **Жилейкин, М.М.** Метод выявления потери устойчивости движения тракторов при реализации тягового усилия на прицеп или сцепной агрегат / М.М. Жилейкин, П.В. Сиротин, С.С. Носиков, Н.Н. Пуляев // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 39-48. – DOI 10.17816/0321-4443-321266. – EDN ZCQJYM.
27. **Грабар, И.Г.** Определение условий начала автоколебательных процессов в контакте модели пневматической шины с сыпучим грунтом / И.Г. Грабар, Е.Г. Опанасюк, Д.Б. Бегерский, О.Е. Опанасюк // Вісник СевНТУ. 2011. № 121. С. 139-142. – EDN UMXAMR.
28. **Клепиков, В.Б.** Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Харьков: Підручник НТУ «ХП», 2014. – 408 с. – ISBN 978-617-687-029-6.

29. **Klimov, A.V.** Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes / A.V. Klimov, B.K. Ospanbekov, A.V. Keller, S.S. Shadrin, D.A. Makarova, Y.M. Furlotov // World Electr. Veh. J. 2023, 14, 316. <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>.
30. **Klimov, A.V.** Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode / A.V. Klimov, B.K. Ospanbekov, A.V. Antonyan et al. // World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. – DOI 10.3390/wevj15080340. – EDN FHAZAU.
31. **Климов, А.В.** Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19-24. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. – EDN RXPWMI.
32. **Климов, А.В.** Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19-24. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. – EDN RXPWMI.
33. **Климов, А.В.** Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса / А.В. Климов, А.В. Антонян // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 87-96. – DOI 10.17816/2074-0530-115233. – EDN DVWXHE.
34. **Климов, А.В.** Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колес в тяговом режиме работы // Труды НАМИ. 2023. № 3(294). С. 44-56. – DOI 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. – EDN XJXUWX.
35. **Климов, А.В.** Наблюдатель буксования ведущих колес с функцией подавления автоколебаний в тяговом режиме // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 17-29. – DOI 10.46960/2782-5477_2023_2_17. – EDN HRSZDR.
36. **Климов, А.В.** Подавление автоколебаний ведущих колес в тормозном режиме // Грузовик. – 2023. № 9. С. 6-14. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. – EDN PUCDXP.
37. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. Том 2 / А.В. Иванов-Смольский – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 532 с.
38. **Вольдек, А.И.** Электрические машины: учебник для студентов вузов. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
39. ГОСТ Р 54810-2011 Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Введ. 2012.09.01. – М.: Стандартинформ. 2012. – 23 с.

*Дата поступления
в редакцию: 23.11.2024*

*Дата принятия
к публикации: 15.02.2025*

УДК 630.377

EDN: RHNUEG

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВЫБОР ТИПА И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Е.Е. Клубничкин

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**В.Е. Клубничкин**

ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: vklubnichkin@bmstu.ru

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

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: naumovvn@bmstu.ru

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

Исследуются аналитические зависимости факторов, определяющих тип и грузоподъемность погрузочных и транспортных машин. Обсуждается почасовая производительность и стоимость трелевки этих транспортных средств, а также взаимосвязи между такими факторами, как скорость, время простоя, расстояние трелевки и использование грузоподъемности. Представлены графики и технические данные, подтверждающие анализ. Делается вывод о том, что средняя техническая скорость погрузочно-транспортных машин зависит от их типа, грузоподъемности и срока службы, и что различные типы транспортных средств имеют разную скорость в зависимости от их грузоподъемности. Приведены аналитические выражения для расчета средней технической скорости для различных типов погрузочно-транспортных средств. На основе анализа и расчетов рассмотрена возможность внедрения улучшений для повышения эффективности и продуктивности погрузочных и транспортных средств. В дальнейшем это может включать оптимизацию грузоподъемности, сокращение времени простоя или повышение скорости в зависимости от конкретных требований и ограничений.

Результаты работы имеют большое значение для повышения эффективности и продуктивности погрузочных и транспортных средств, позволяя профессионалам в области конструирования и исследования оптимизировать производительность и принимать обоснованные решения в вопросах конструкции лесных погрузочно-транспортных машин.

Ключевые слова: погрузочно-транспортная машина, скорость, время простоя, расстояние трелевки, использование грузоподъемности, почасовая производительность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Клубничкин Е.Е. Исследование факторов, определяющих выбор типа и грузоподъемности лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 87-103. EDN: RHNUEG

STUDY OF FACTORS DETERMINING THE CHOICE OF TYPE AND LOAD CAPACITY OF LOGGING LOADING AND TRANSPORT VEHICLES

E.E. Klubnichkin

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.E. KlubnichkinORCID: **0000-0002-1231-8185** e-mail: **vkclubnichkin@bmstu.ru**Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia**V.N. Naumov**ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **naumovvn@bmstu.ru**Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of analytical dependencies of factors determining the type and load capacity of loading and transport vehicles. The hourly productivity and cost of skidding of these vehicles are considered, as well as the relationships between factors such as speed, downtime, skidding distance and load capacity utilization. The presented graphs and technical data confirm the analysis. It is concluded that the average technical speed of loading and transport vehicles depends on their type, load capacity and service life, and that different types of vehicles have different speeds depending on their load capacity. Analytical expressions are given for calculating the average technical speed for various types of loading and transport vehicles. Based on the analysis and calculations, the possibility of introducing improvements to increase the efficiency and productivity of loading and transport vehicles is considered. In the future, this may include optimizing load capacity, reducing downtime or increasing speed, depending on specific requirements and constraints. This study provides valuable information to improve the efficiency and productivity of loading and transport vehicles. They enable design and research professionals to optimize productivity and make informed decisions about the design of logging loading and transport vehicles.

Key words: loading and transport vehicle, speed, downtime, skidding distance, load capacity utilization, hourly productivity.

FOR CITATION: E.E. Klubnichkin, V.E. Klubnichkin, V.N. Naumov. Study of factors determining the choice of type and load capacity of logging loading and transport vehicles. Transactions of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1.Pp. 87-103. EDN: RNHUEG

Введение

Лесозаготовительные погрузочно-транспортные машины (ПТМ) играют решающую роль в лесной промышленности, особенно при трелевке древесины. Для оптимизации производительности и снижения затрат важно понимать аналитические зависимости, которые определяют тип и грузоподъемность лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин. Цель настоящей статьи – проанализировать такие факторы, как скорость, время простоя, состояние по трелевочному волоку и грузоподъемность, а также их влияние на почасовую производительность и стоимость трелевки древесины. Представляя графики и технические данные, мы сделаем выводы о средней технической скорости лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин в зависимости от их типа, грузоподъемности и срока службы. Кроме того, будут предоставлены аналитические выражения для расчета средней технической скорости для различных типов лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин, предназначенные для специалистов лесной промышленности.

Проанализируем факторы, влияющие на первичный транспорт леса.

Скорость. Скорость лесозаготовительной погрузочно-транспортной машины существенно влияет на ее производительность. Более высокие скорости обеспечивают более быструю трелевку, сокращая общее время в пути и увеличивая количество ходок, совершаемых за определенный промежуток времени. Это, в свою очередь, повышает почасовую производительность и снижает стоимость трелевки древесины.

Время простоя. Время простоя относится ко времени, затрачиваемому на техническое обслуживание, ремонт и периоды отдыха лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин. Минимизация времени простоя имеет решающее значение для обеспечения оптимальной производительности. Такие факторы, как качество технического обслуживания и

доступность запасных частей, влияют на общее время простоя лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин.

Расстояние по трелевке. Расстояние между местом заготовки древесины и верхним складом значительно влияет на транспортные расходы. На большие расстояния требуется больше топлива, увеличивается износ лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин и, как следствие, повышается общая стоимость трелевки древесины.

Грузоподъемность. Грузоподъемность лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин определяет объем древесины, который можно перевезти за один рейс. Более высокая грузоподъемность обеспечивает более эффективную трелевку, что приводит к увеличению почасовой производительности и снижению транспортных расходов.

Для определения средней технической скорости лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин используются различные аналитические зависимости. Эти зависимости подчиняются таким факторам, как тип лесозаготовительной погрузочно-транспортной машины, грузоподъемность и срок службы. Анализируя обширные наборы данных и проводя статистический анализ, мы можем получить ценную информацию.

Аналитические зависимости факторов, определяющих тип и грузоподъемность погрузочно-транспортных машин

Ранее было установлено [1, 2, 5], что факторы, определяющие тип и грузоподъемность погрузочно-транспортных машин, одновременно характеризуют степень их использования – часовую производительность и себестоимость транспортной работы.

Часовая производительность погрузочно-транспортных машин на лесном первичном транспорте определяется следующей формулой:

$$W_1 = \frac{V_t q_n \gamma \beta}{l_{тр} + t_{пр} V_t \beta} l_{гр} \quad \text{т/час} \quad [1]$$

и

$$W_2 = \frac{V_t q_n \gamma \beta}{l_{тр} + t_{пр} V_t \beta} l_{гр} \quad \text{т. м}^3/\text{час} \quad [2]$$

где: W – производительность погрузочно-транспортных машин соответственно W_1 [т]. и W_2 [т. м³ / час];

V_t – средняя техническая скорость движения в [км/час];

q_n – номинальная грузоподъемность погрузочно-транспортных машин в [т];

γ – коэффициент использования грузоподъемности;

β – коэффициент использования расстояния трелевки;

$l_{тр}$ – среднее расстояние трелевки в [км];

$t_{пр}$ – время простоя погрузочно-транспортных машин во время погрузки и разгрузки в [час на одну трелевку].

Себестоимость единицы транспортной работы погрузочно-транспортных машин определяется как сумма затрат, приходящихся на один час работы, деленная на часовую производительность:

$$S = \frac{C_{30T}}{W_2} = \frac{C_{пост} + C_{пер} + C_{з.п.}}{W_2}; \quad [3]$$

где: S – себестоимость единицы транспортной работы в [руб.];

$C_{пост}$ – постоянные расходы, связанные с одним часом работы погрузочно-транспортных машин в [руб.];

$C_{пер}$ – переменные расходы, связанные с одним часом работы погрузочно-транспортных машин в [руб.];

$C_{з.п.}$ – заработная плата оператора за час работы в [руб.];

Анализируя формулы часовой производительности [6-11] и себестоимости транспортной работы [12-14], легко убедиться, что здесь взаимосвязаны все факторы (скорость движения, время простоя под погрузкой-разгрузкой, расстояние трелевки, коэффициент использо-

вания грузоподъемности), которые определяют выбор типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин. Однако, из ранее проведенного анализа использования погрузочно-транспортных машин [1-5], а также зависимостей 1 и 2 легко убедиться в том, что коэффициент использования расстояния трелевки и среднее расстояние трелевки сортиментов, хотя и оказывают существенное влияние на часовую производительность погрузочно-транспортных машин и себестоимость трелевки, но практически от него не зависят, поскольку их влияние ограничивают только условия трелевки сортиментов. В то же время средняя техническая скорость, время простоя под погрузкой разгрузкой, коэффициент использования грузоподъемности при прочих равных условиях зависят от типа и грузоподъемности ПТМ.

Эти обстоятельства позволяют использовать зависимости 1 и 2 для комплексной оценки транспортного процесса, а полученные по ним результаты – в качестве показателей его эффективности.

Подтверждением сказанного являются данные, представленные на графиках рис. 1-4 и технические данные погрузочно-транспортных машин отечественного и зарубежного [1, 2, 5, 15] производства. Как видно, они подтверждают определенную взаимосвязь между максимальной скоростью движения, временем простоя при погрузке и разгрузке, удельной емкостью конической площадки и номинальной грузоподъемностью погрузочно-транспортных машин, справедливую для определенного типа. Запишем ее в общем виде следующим образом; $V_t = f_1(q_n)$, $t_{np} = f_2(q_n)$, $\gamma = f_3(q_n)$ а затем исследуем в случаях: использования погрузочно-транспортных машин, колесных, гусеничных, оснащенных как прицепами, так и полуприцепами.

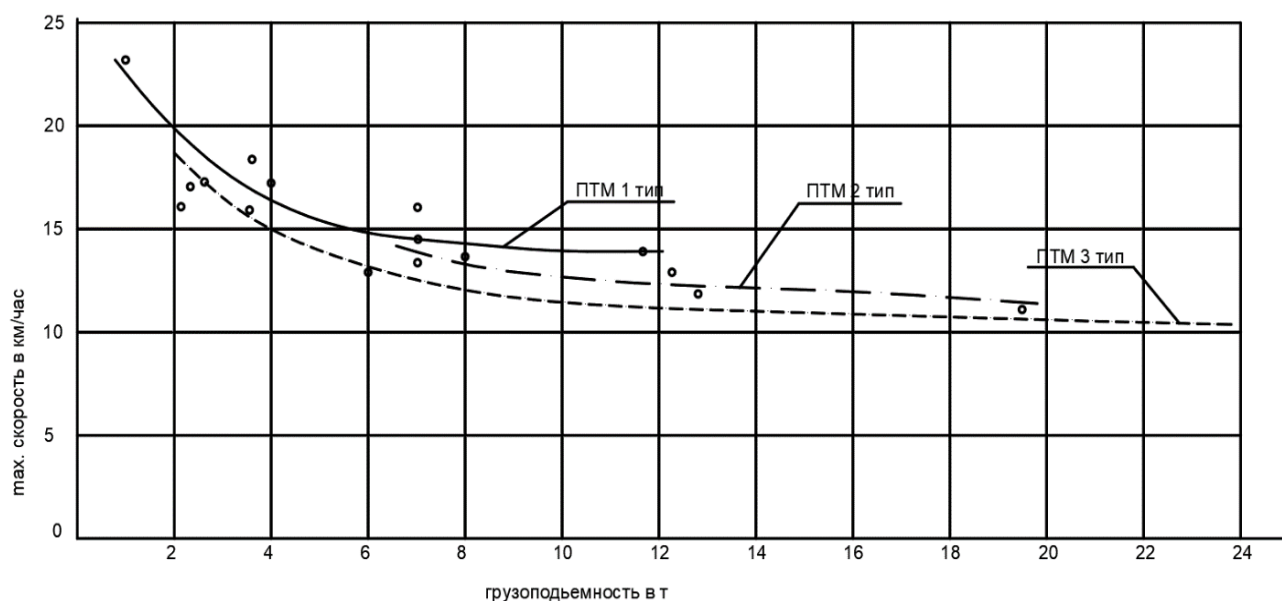


Рис. 1. График зависимости максимальной скорости движения отечественных погрузочно-транспортных машин от их грузоподъемности

Fig. 1. Dependence of the maximum speed of domestic loading and transport vehicles on their load capacity

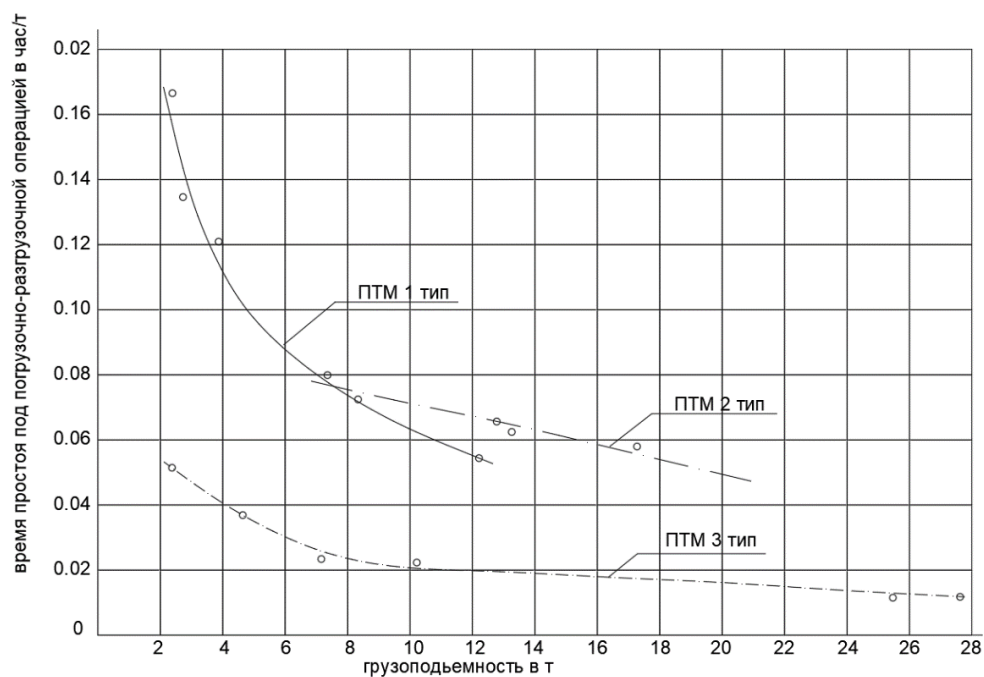


Рис. 2. График зависимости времени простоя погрузочно-транспортных машин под погрузочно-разгрузочными операциями от их грузоподъемности

Fig. 2. Dependence of the downtime of loading and transport vehicles under loading and unloading operations on their load capacity

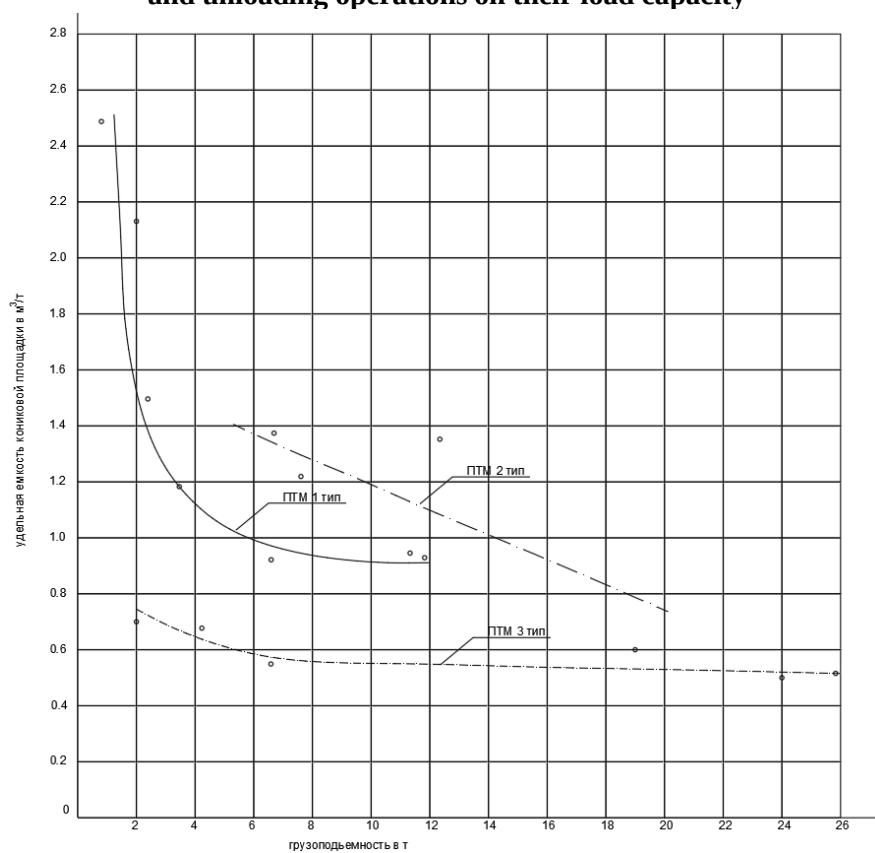


Рис. 3. График зависимости удельной емкости кониковой площадки погрузочно-транспортных машин от их грузоподъемности

Fig. 3. Dependence of the specific capacity of the conical platform of loading and transport vehicles on their load capacity

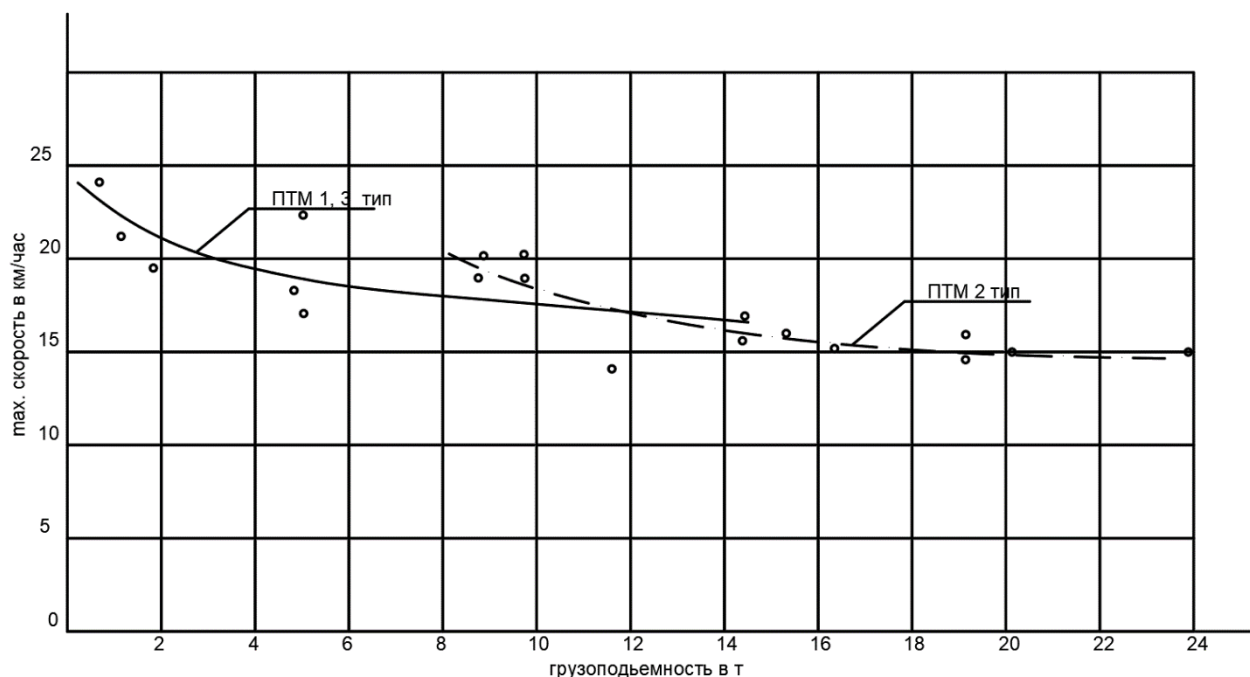


Рис. 4. График зависимости максимальной скорости движения зарубежных погрузочно-транспортных машин от их грузоподъемности

Fig. 4. Dependence of the maximum speed of foreign loading and transport vehicles on their load capacity

Исследование функции $V_t = f_1(q_n)$

Выразим функциональную зависимость $V_t = f_1(q_n)$ для указанных типов ПТМ графически (рис. 5), пользуясь данными максимальных скоростей движения, полученными при испытаниях [1, 4], а также исходя из технических характеристик ПТМ [5, 2, 15].

Исследуя представленные на рис. 5 графики $V_t = f_1(q_n)$, убеждаемся, что характер изменения максимальных скоростей движения одинаков для всех типов погрузочно-транспортных машин, тогда как их абсолютные значения различны. Наибольшие скорости движения наблюдаются у первого типа погрузочно-транспортных машин, несколько ниже у погрузочно-транспортных машин второго типа, оснащенных прицепами, и тягачей, оснащенных полуприцепами, и самые малые – у погрузочно-транспортных машин третьего типа. Однако диапазон отклонений максимальных и минимальных скоростей движения по мере увеличения грузоподъемности погрузочно-транспортных машин наибольший у погрузочно-транспортных машин третьего типа (с 10 до 20 км/час), а наименьший – у погрузочно-транспортных машин-тягачей, оснащенных полуприцепами и погрузочно-транспортных машин, оснащенных прицепами (5 до 15 км/час).

Аналогичная закономерность наблюдается и у погрузочно-транспортных машин зарубежного производства, однако стоит отметить, что тягово-динамические характеристики некоторых типов зарубежных ПТМ несколько выше по сравнению с отечественными.

Вместе с тем, проведенными ранее исследованиями д-ров техн. наук Е.Г. Хитрова [6, 11], Г.О. Котиева [1], данными зарубежных [13] и отечественных [3, 4] экспериментов, практически подтверждено, что дорожные условия (подъемы, спуски, пеньки, поваленные деревья, камни, интенсивность движения, ровность поверхности дороги и т.п.), а также техническое состояние погрузочно-транспортных машин оказывают существенное влияние на максимально возможную скорость движения ПТМ.

В связи с вышеизложенным, максимальная (конструктивная) скорость движения погрузочно-транспортных машин в обычных эксплуатационных условиях достигается лишь частично, а не полностью.

Так, по данным д-ров техн. наук Е.Г. Хитрова [6, 11] и Г.О. Котиева [1] фактическая среднетехническая скорость погрузочно-транспортных машин в лесу на лесосеке составляет 0,3-0,35 от расчетной, а более поздними исследованиями подтверждают, что наиболее экономичными, по расходу топлива, для всех погрузочно-транспортных машин, будут скорости 15-25 км/час при движении без груза и 10-15 км/час – с грузом. При этом в расчет приняты также данные исследований д-ра техн. наук В.С. Макарова [4], на основе которых установлено, что средние скорости движения погрузочно-транспортной машины с грузом и без него различаются незначительно, хотя плавность хода машины значительно зависит от нагрузки. Это можно объяснить тем, что при движении без груза динамические характеристики машины способствуют увеличению скорости.

Кроме того, энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления неровностям дороги, практически не зависит от полной массы погрузочно-транспортной машины.

Если учесть изложенное, а также и то, что 90 % парка первичного лесного транспорта [5] составляют базовые модели погрузочно-транспортных машин, у которых $V_{max} = 15$ км/час, а коэффициент использования пройденного пути для средних условий эксплуатации не превышает 0,515 [1, 2, 5-11], в общем случае для всего парка погрузочно-транспортных машин в России средняя техническая скорость составит около 10 км/ч, что соответствует $V_t = 0,45 V_{max}$.

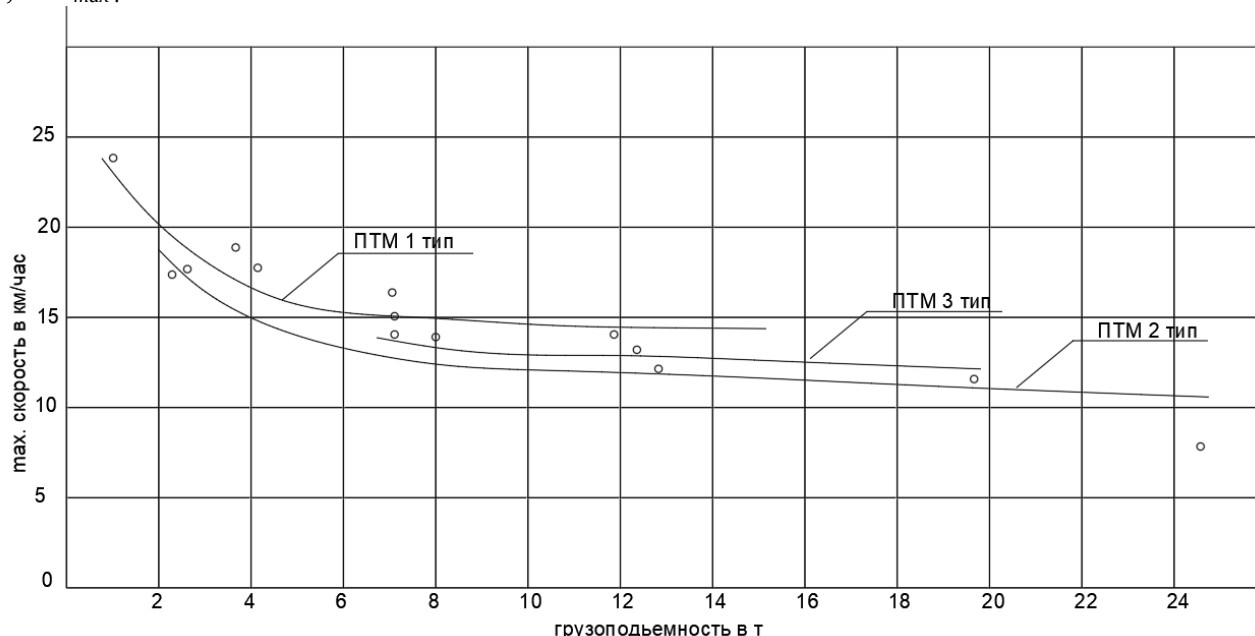


Рис. 5. Функциональная зависимость $V_t = f_1(q_n)$

Fig. 5. Functional dependence $V_t = f_1(q_n)$

Полученные величины средних технических скоростей заложены нами во всех дальнейших расчетах.

Методом наименьших квадратов устанавливаем аналитическое выражение функции $V_t = f_1(q_n)$, которое в конечном виде может быть записано следующим образом:

а) для одиночных погрузочно-транспортных машин типа 1:

$$V_t = 24,2(1,465 l^{-0,368 q_n} + 1) \quad (4)$$

б) для одиночных погрузочно-транспортных машин типа 2:

$$V_t = 20,4(0,0088 l^{0,0088(q_n-24,5)^2} + 1) \quad (5)$$

в) для одиночных погрузочно-транспортных машин типа 3:

$$V_t = 28,73(1 - 0,0127 q_n) \quad (6)$$

Максимальная относительная погрешность при определении по аналитическим зависимостям (4,5 и 6) находится в пределах 0,5-1,1 %, что позволяет использовать указанные выражения для практических расчетов.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

а) в равнозначных дорожных условиях средняя техническая скорость погрузочно-транспортных машин определяется ее типом, грузоподъемностью, сроком службы;

б) средняя техническая скорость для различного типажа погрузочно-транспортных машин, в зависимости от ее грузоподъемности, при прочих равных условиях, имеет одинаковый характер изменения, но по абсолютной величине она у ПТМ типа 3 на 15-20 % ниже, чем ПТМ типа 1 погрузочно-транспортных машин и на 5-10 % ниже, чем у ПТМ с полуприцепами и с прицепами;

в) наиболее существенное изменение средней технической скорости (1 км/час на 1 т) наблюдается у погрузочно-транспортных машин малой и средней грузоподъемности (до 6-7 т), тогда как при дальнейшем повышении грузоподъемности (с 7 до 27 т средняя техническая скорость изменяется весьма незначительно (0,25 км/час на 1 т).

Исследование функции $t_{пр} = f_2(q_n)$

Пользуясь нормативным временем простоя погрузочно-транспортной машины под погрузочно-разгрузочными операциями [1, 2, 5-12], в зависимости от типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин, а также способа работ, построим график $t_{пр} = f_2(q_n)$, для наиболее типичных сортиментов (рис. 6).

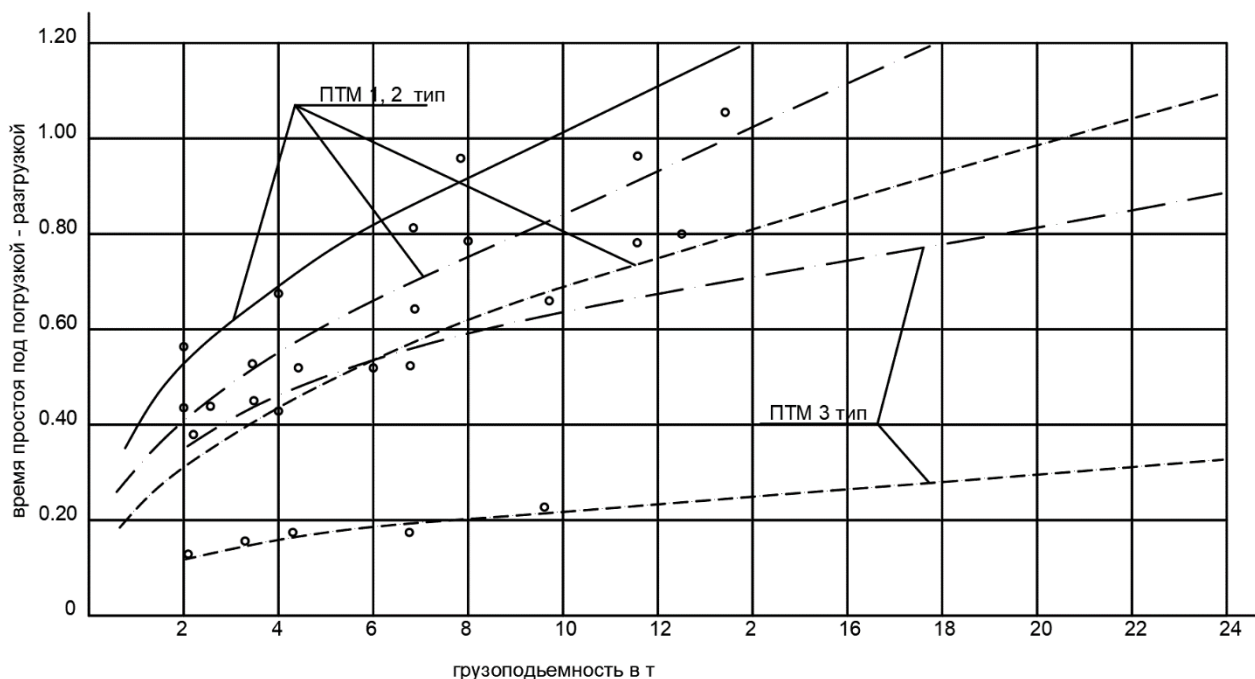


Рис. 6. Функциональная зависимость $t_{пр} = f_2(q_n)$
 способы погрузки-разгрузки зависят от типа используемого оборудования:
 — полумеханизированная; - механизированная

Fig. 6. Functional dependence $t_{пр} = f_2(q_n)$
 loading and unloading methods depend on the type of equipment used:
 — semi-mechanized; - mechanized

Аналитическая зависимость $t_{пр} = f_2(q_n)$ определена и представлена следующим выражением:

$$t_{\text{пр}}^6 = 0.520 + 0.057q_{\text{н}} \quad (7)$$

$$t_{\text{пр}}^c = 0.1 + 0.13q_{\text{н}} \quad (8)$$

Анализируя зависимость (7 и 8) и характер изменения кривых ($t_{\text{пр}}$), представленных на рис. 6, для погрузочно-транспортных машин, тягачей оснащенных полуприцепами и погрузочно-транспортных машин оснащенных прицепами можно сделать следующие выводы.

1. Время простоя погрузочно-транспортных машин во время погрузки и разгрузки увеличивается с ростом их грузоподъемности, причем это увеличение более выражено у машин с малой грузоподъемностью (до 6-7 т) и менее заметно при грузоподъемности свыше 6-7 т. Нормативное время простоя $t_{\text{пр}}$ у погрузочно-транспортных машин третьего типа, при прочих равных условиях, в 2-2,5 раза меньше, чем у машин-тягачей, оснащенных седельными полуприцепами и погрузочно-транспортных машин оснащенных прицепами.

2. Форма изменения кривой $t_{\text{пр}} = f_2(q_{\text{н}})$ напоминает зеркальное отражение функции $V_t = f_1(q_{\text{н}})$, что указывает на то, что $t_{\text{пр}}$ влияет на производительность погрузочно-транспортных машин противоположным образом по сравнению с V_t .

Поскольку средние нормативы $t_{\text{пр}}$ могут значительно отличаться от реальных условий эксплуатации погрузочно-транспортной машины, важно определить, насколько велика эта разница и повлияет ли она на вышеуказанные выводы. С этой целью проведен хронометраж времени простоя погрузочно-транспортных машин различного типа и грузоподъемности под погрузочно-разгрузочными операциями при сплошных рубках леса с верхних, нижних складов и других объектов.

Данные хронометража, полученные по фактическому времени простоя ПТМ под погрузочно-разгрузочными операциями и обработанные в соответствии с «Методикой статистической обработки эмпирических данных» (ГОСТ-РТМ 44-62), подчиняются нормальному закону распределения Гауса [18-24]. Сопоставив нормативные и хронометражные данные времени простоя под погрузочно-разгрузочными операциями (рис. 7), убеждаемся, что в отдельных случаях имеются небольшие отклонения, но относительная погрешность полученных результатов не превышает 9 %, т.е. находится в допустимых пределах.

Таким образом, ранее установленные закономерности $t_{\text{пр}} = f_2(q_{\text{н}})$ справедливы также и для реальных условий трелевки сортиментов, следовательно, те выводы, которые сделаны для нормативного $t_{\text{пр}}$, справедливы и закономерны для фактического времени простоя погрузочно-транспортных машин под погрузочно-разгрузочными операциями. Нормируемое время простоя погрузочно-транспортных машин во время погрузки и разгрузки измеряется в часах на одну ходку.

Анализ функции $\gamma = f_3(q_{\text{н}})$

Практически установлено, что эффективность использования грузоподъемности погрузочно-транспортных машин зависит от характера трелеваемого груза, геометрических параметров конической площадки и номинальной грузоподъемности этих машин [1, 2, 5].

На основе статистических данных о трелевке сортиментов первичны транспортом [15-17] для построения функциональной зависимости $\gamma = f_3(q_{\text{н}})$ ограничимся крайними условиями, когда объемный вес перевозимых сортиментов находится в пределах 0,8; 1,0 и 1,8 т/м³, т.е.: больше, меньше и равен единице.

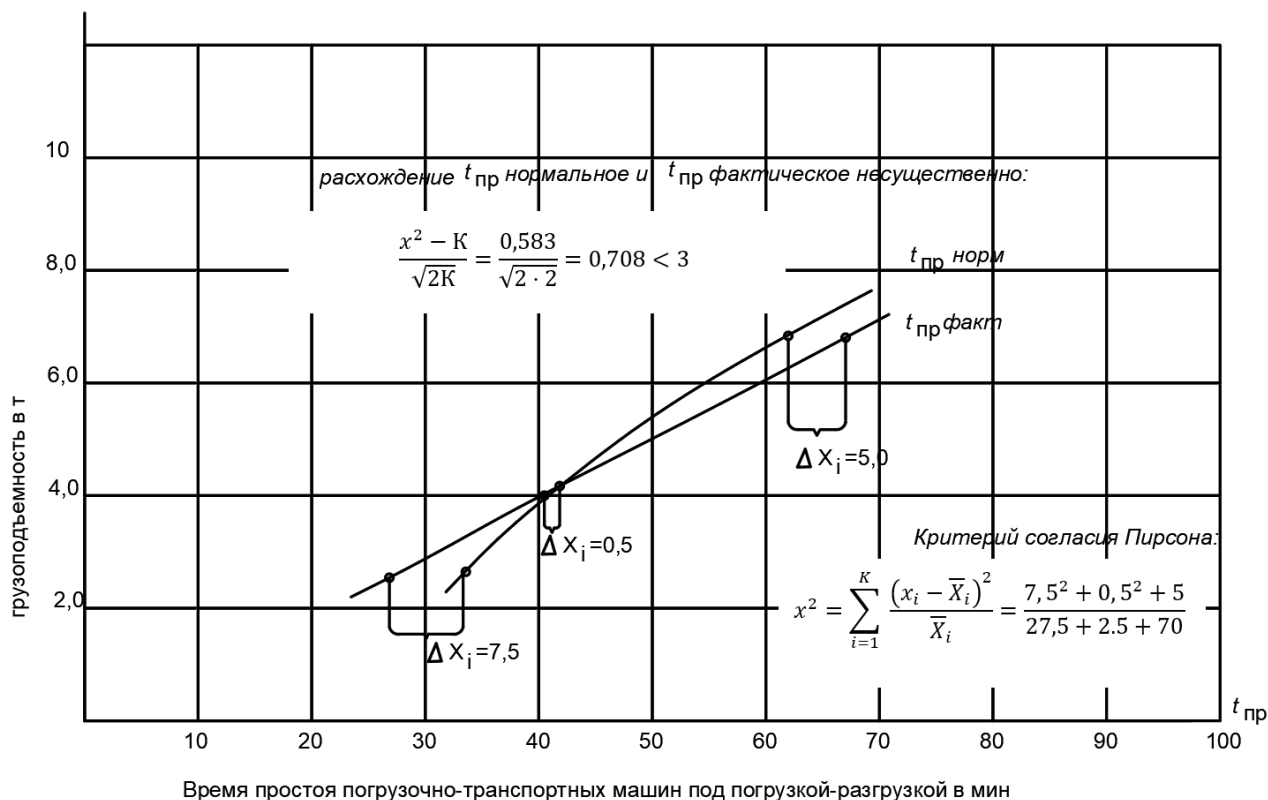


Рис. 7. Сравнение $t_{пр}$ норм. и $t_{пр}$ факт.

Расхождение $t_{пр}$ норм. и $t_{пр}$ факт.

$$\frac{x^2 - K}{\sqrt{2K}} = \frac{0,583}{\sqrt{2 \cdot 2}} = 0,708 < 3$$

Критерий согласия Пирсона:

$$x^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(x_i - \bar{X}_i)^2}{\bar{X}_i} = \frac{7,5^2 + 0,5^2 + 5}{27,5 + 2,5 + 70}$$

Fig. 7. Comparison of $t_{пр}$ norms. and $t_{пр}$ is a fact.
The discrepancy between $t_{пр}$ norms. and $t_{пр}$ is a fact.

$$\frac{x^2 - K}{\sqrt{2K}} = \frac{0,583}{\sqrt{2 \cdot 2}} = 0,708 < 3$$

Pearson's criterion of consent:

$$x^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(x_i - \bar{X}_i)^2}{\bar{X}_i} = \frac{7,5^2 + 0,5^2 + 5}{27,5 + 2,5 + 70}$$

Коэффициент использования грузоподъемности определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{q_{\phi}}{q_n} = \frac{dV_k}{q_n} \dots \quad (9)$$

где: q_{ϕ} – фактический вес трелюемого груза в т;

d – объемный вес груза в т/м³;

V_k – емкость кониковой площадки в м³.

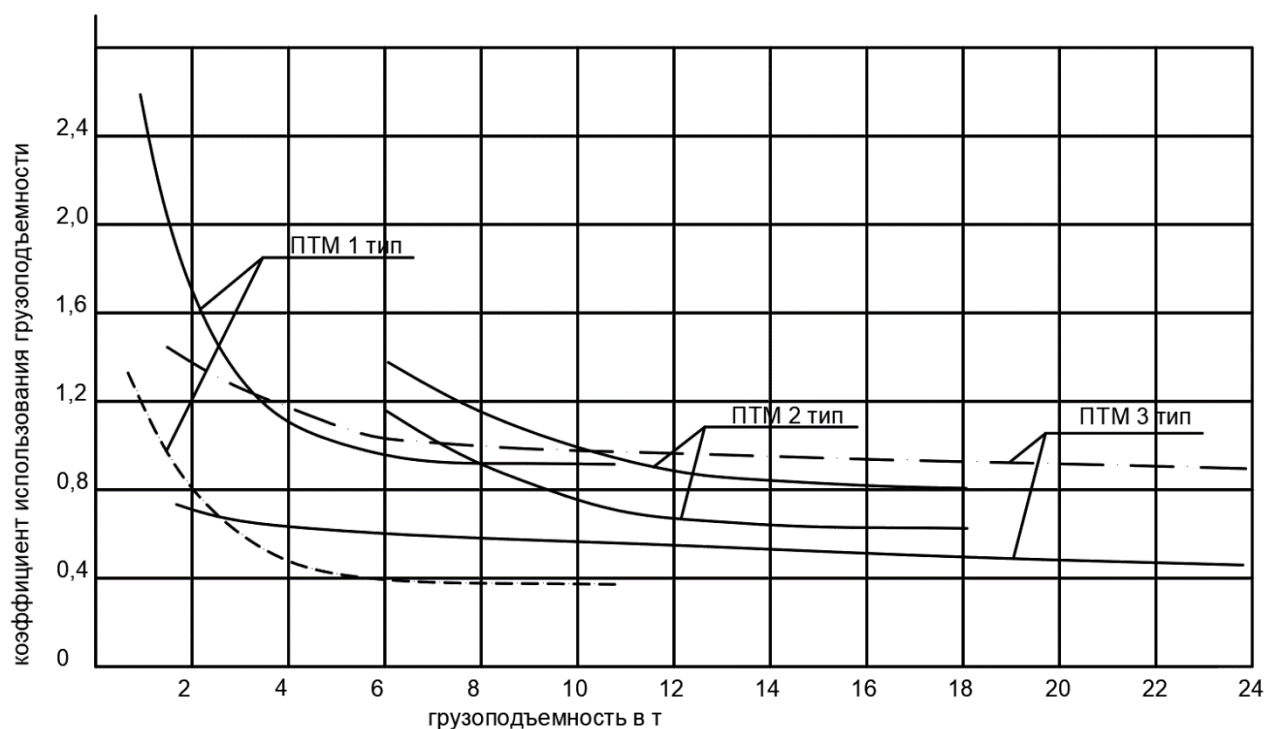


Рис. 8. Функциональная зависимость $\gamma = f_3(q_n)$
 — объемный вес груза $d = 1,8 \text{ т/м}^3$; $d = 1,0 \text{ т/м}^3$; -.-.-.- $d = 0,8 \text{ т/м}^3$

Fig. 8. Functional dependence $\gamma = f_3(q_n)$
 — volumetric weight of the cargo $d = 1,8 \text{ t/m}^3$; $d = 1,0 \text{ t/m}^3$; -.-.-.- $d = 0.8 \text{ t/m}^3$

Результаты расчетов коэффициента использования грузоподъемности представлены на графиках (рис. 8) для погрузочно-транспортных машин, погрузочно-транспортных машин – тягачей с полуприцепами и погрузочно-транспортных машин, оснащенных прицепами.

Анализируя указанные зависимости, можно заключить, что на коэффициент использования грузоподъемности погрузочно-транспортных машин наиболее значительное влияние оказывает характер и физические свойства трелеваемого груза (порода древесины). Это влияние тем больше, чем меньше грузоподъемность погрузочно-транспортной машины, используемой для трелевки сортиментов. Исключением являются погрузочно-транспортные машины, для которых коэффициент использования грузоподъемности в значительной степени зависит от физических свойств груза, и с увеличением грузоподъемности этих машин данный коэффициент изменяется весьма незначительно.

Следовательно, коэффициент использования грузоподъемности надлежит учитывать в тех случаях, когда объемный вес груза практически ниже единицы, но так как удельный вес этих сортиментов, к общему числу трелевки менее 10 %, то в дальнейшем для наших расчетов, принимаем $\gamma = 0,85-1,0$ в зависимости от типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин.

Таким образом мы определили функциональные зависимости $V_t = f_1(q_n)$, $t_{np} = f_2(q_n)$, $\gamma = f_3(q_n)$, исследовали закономерности их изменения в зависимости от типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин и перейдем дальше к комплексным исследованиям влияния типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на ее производительности и себестоимость транспортной работы, т.е. на эффективность транспортного процесса в целом.

Исследование влияния типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на ее производительность и себестоимость транспортной работы

Для определения комплексного влияния типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на ее производительность и себестоимость транспортной работы, в зависимости от факторов их определяющих, воспользуемся теоретическими предпосылками разложения фактора на его составляющие [1, 2, 5-12]. С этой целью построим графически функцию $W = f_4(q_n)$, поставив в выражение производительности 1 и 2 ранее полученные нами результаты V_t , t_{np} и γ для типичных условий трелевки сортиментов.

Упрощая расчеты, допускаем, что коэффициент использования расстояния трелевки $\beta = 0,5$, и расстояние трелевки сортиментов принимаем в диапазоне 100, 200, 300, 400 и 500 м.

Полученные результаты расчета производительности погрузочно-транспортных машин, для заданных условий трелевки сортиментов, представлены на графиках выборочными данными, (рис. 9, 10 и 11 – тип 1, 2 и 3 ПТМ соответственно).

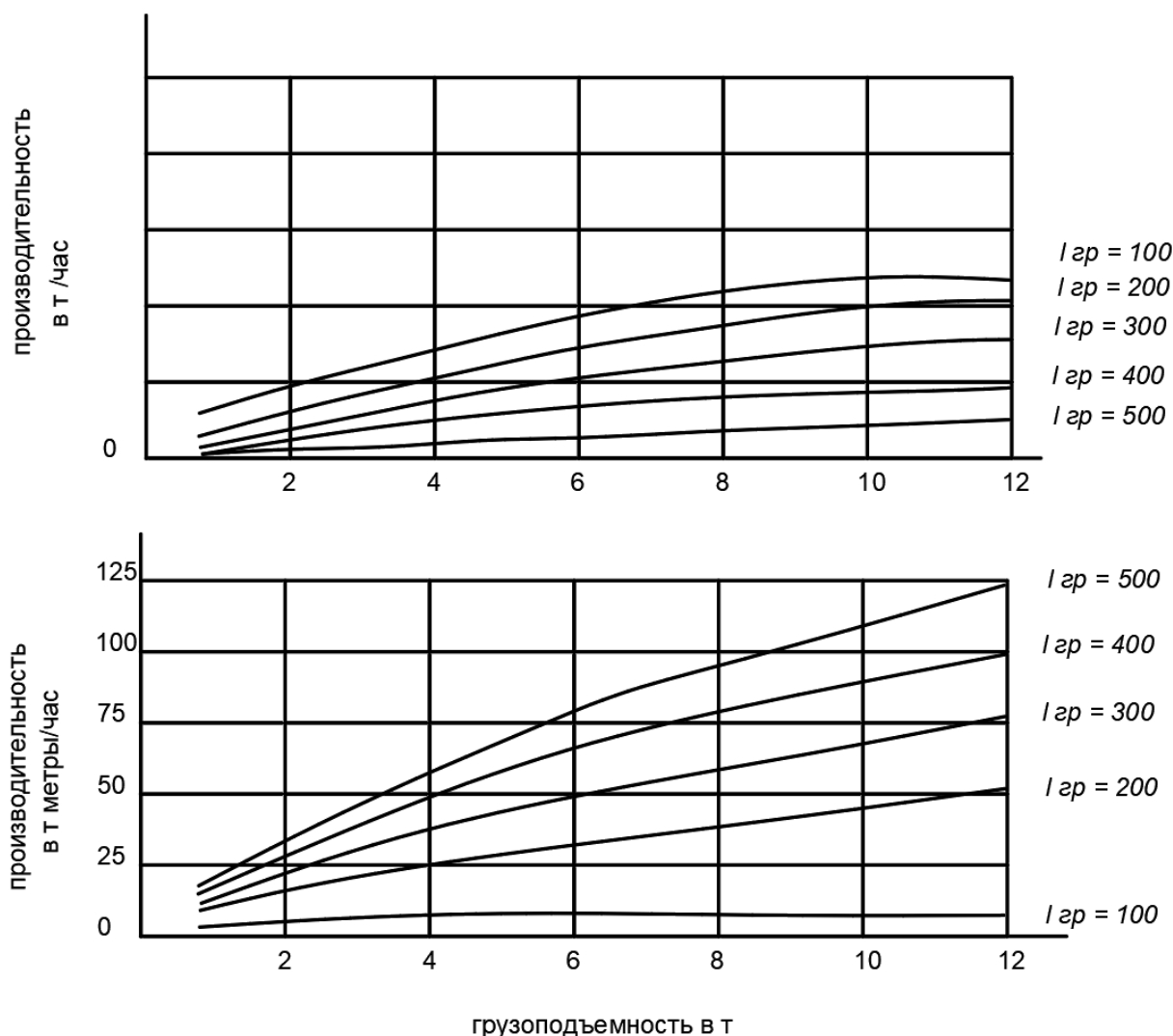
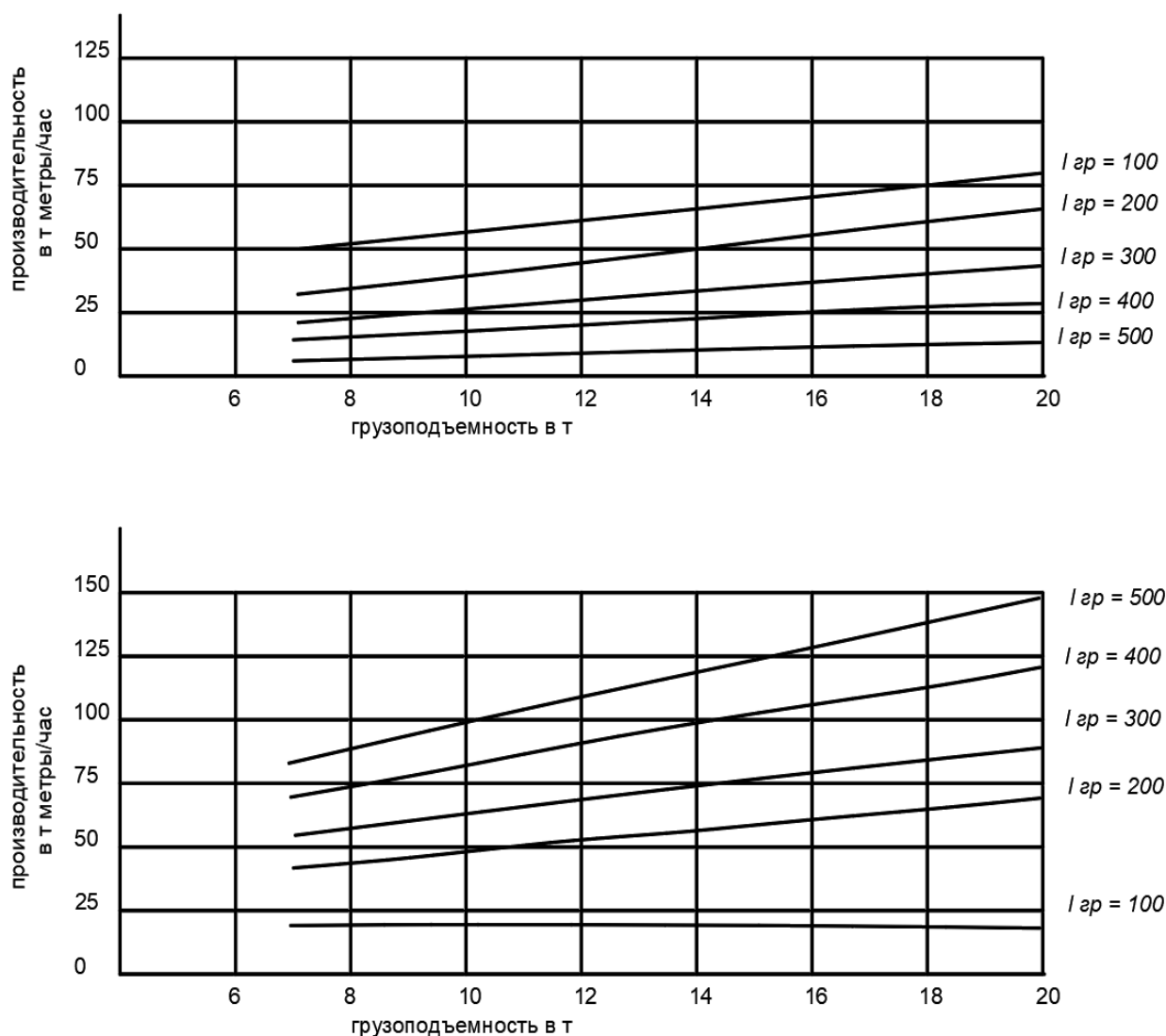


Рис. 9. Функциональная зависимость $W = f_4(q_n)$ ПТМ 1 тип

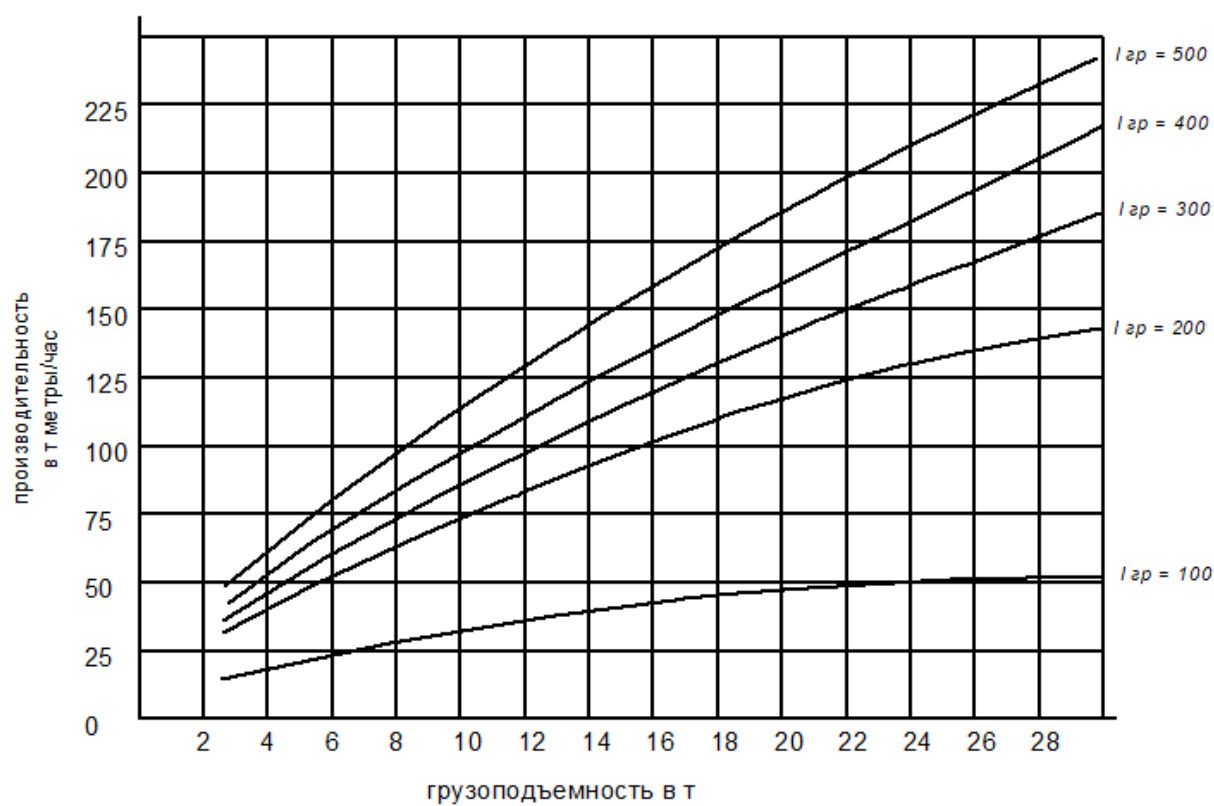
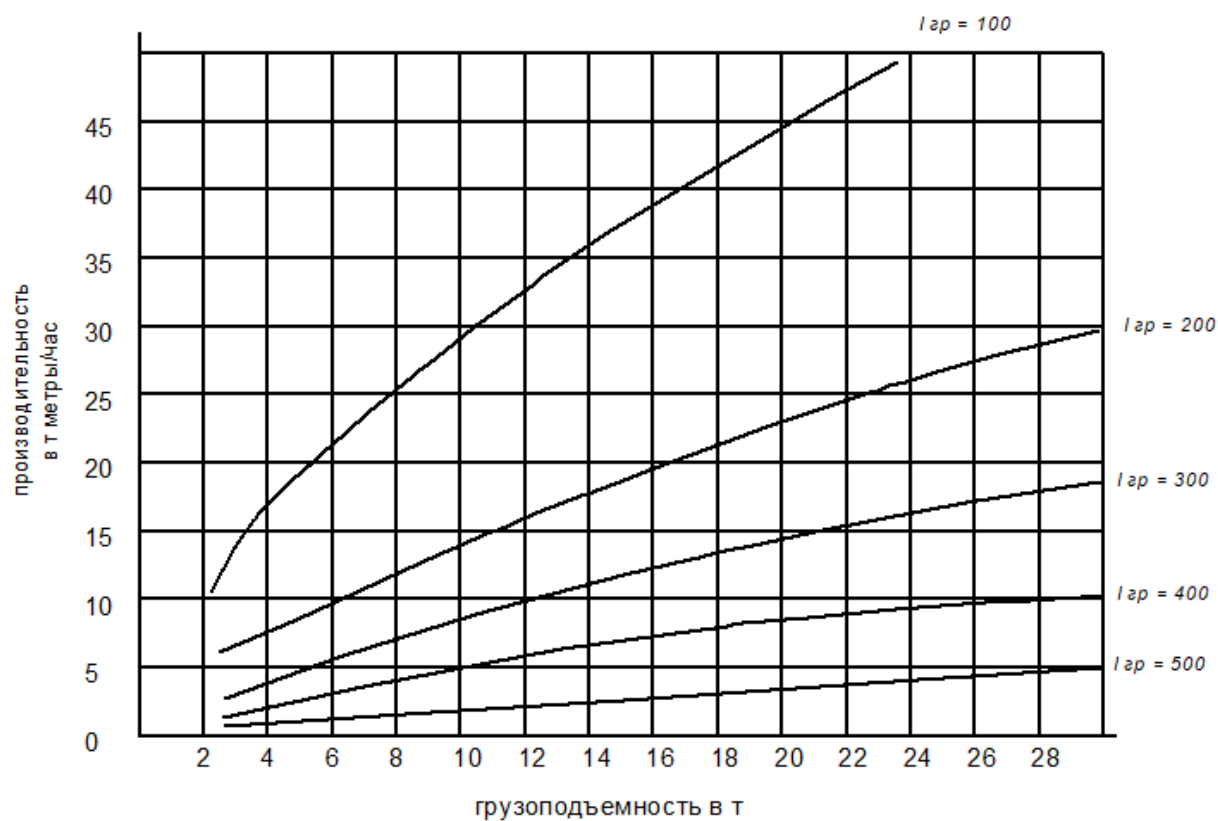
Fig. 9. Functional dependence $W = f_4(q_n)$ PTM type 1

Рис. 10. Функциональная зависимость $W = f_4(q_n)$ ПТМ 2 типFig. 10. Functional dependence $W = f_4(q_n)$ PM type 2

Анализируя представленные на графиках зависимости $W = f_4(q_n)$ и выборочные данные, устанавливаем следующее.

Производительность погрузочно-транспортных машин возрастает по мере увеличения грузоподъемности, до 6-7 т – по закону гиперболы, а далее – по закону прямой линии. Наиболее интенсивный рост производительности отмечается у погрузочно-транспортных машин третьего типа, затем ПТМ второго типа, а самый малый – у одиночных ПТМ первого типа.

По мере увеличения расстояния трелевки сортиментов производительность у всех типов погрузочно-транспортных машин в т·м³ увеличивается, а в т – снижается. Однако прямой зависимости между производительностью и грузоподъемностью ПТМ даже одного и того же типажа не наблюдается.

Рис. 11. Функциональная зависимость $W = f_4(q_n)$ ПТМ 3 типFig. 11. Functional dependence $W = f_4(q_n)$ PM type 3

При выборе типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин ключевыми факторами, влияющими на их производительность и стоимость транспортных работ, являются: средняя техническая скорость и время простоя во время погрузки и выгрузки. С увеличением грузоподъемности погрузочно-транспортных машин их производительность возрастает для всех типов, однако это не происходит в прямой пропорции, так как определяющие факторы имеют нелинейную зависимость. Достичь прямой пропорциональности между грузоподъемностью и производительностью погрузочно-транспортных машин возможно только при условии, что отношения средней технической скорости и времени простоя под погрузочно-разгрузочными операциями останутся постоянными относительно их грузоподъемности. Повышение производительности погрузочно-транспортных машин с одно временным снижением себестоимости трелевки сортиментов справедливо, по мере повышения его грузоподъемности лишь до 6-7 т, а с превышенным последний, для каждого типа погрузочно-транспортных машин, существуют свои определенные условия, которые определяют оптимум грузоподъемности по себестоимости трелевки, в большинстве случаев, не совпадающий с оптимумом по производительности.

Поэтому при выборе типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин в заданных условиях эксплуатации следует руководствоваться следующими общими принципами:

- а) первоначально выбирается тип погрузочно-транспортных машин, последовательно;
- б) как правило, погрузочно-транспортные машины большей грузоподъемности всегда более производительный, если они не уступает по скорости движения и времени простоя под погрузкой-разгрузкой своим предшественникам;
- в) при малых расстояниях трелевки сортиментов (до 100-150 м) более производительно использовать погрузочно-транспортные машины требующий сравнительно небольшого времени простоя под погрузкой-разгрузкой, даже если они уступает по скорости движения другим сравниваемым типам, при расстояниях трелевки более 200-300 м целесообразно использовать погрузочно-транспортные машины обладающий высокими скоростными качествами;
- г) в случае выбора погрузочно-транспортных машин грузоподъемностью более 16-17 т следует кроме их производительности также учитывать и себестоимость трелевки для конкретно заданных условий.

Выводы

Анализ аналитических зависимостей, определяющих тип и грузоподъемность лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин, имеет критически важное значение для оптимизации производительности и снижения затрат в лесопромышленном комплексе. Принимая во внимание такие факторы, как скорость, время простоя, расстояние по трелевочному волоку и грузоподъемность, специалисты лесной промышленности могут принимать обоснованные решения относительно выбора и использования лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин. Представленные графики, технические данные и аналитические выражения дают ценную информацию о средней технической скорости лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин, позволяя профессионалам отрасли максимизировать эффективность и рентабельность операций по транспортировке древесины.

Устанавливаются функциональные зависимости и исследуется влияние типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных средств на производительность и стоимость транспортных работ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер груза, физические свойства и грузоподъемность машин играют решающую роль в определении производительности и результативности транспортного процесса.

Библиографический список

1. **Kotiev, G.O.** A method to improve forwarders' energy performance and environmental compatibility / G.O. Kotiev, E.E. Klubnichkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nizhny Novgorod State Technical University. 2021. С. 012004.
2. **Клубничкин, Е.Е.** Выбор и обоснование конструкции грузового отсека погрузочно-транспортной машины / Е.Е. Клубничкин, Г.О. Котиев, М.В. Федотов, И.О. Наказной, Д.И. Рогачев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 163. С. 74-90.
3. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.
4. **Макаров, В.С.** Исследование деформационных свойств дорожно-грунтовых оснований типа микст / В.С. Макаров, А.М. Беляев, А.И. Марковнина, В.В. Беляков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. – СПб, 2021. С. 430-434.
5. **Клубничкин, В.Е.** Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130). С. 93-102.
6. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров / В.Е. Божбов, Д.А. Ильюшенко, Е.Г. Хитров. – СПб.: СПбГЛТУ, 2015. – 119 с.
7. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: специальность 05.21.01 «Технологи и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: дисс. ... ученой степени кандидата технических наук / Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. Божбов Владимир Евгеньевич. – Архангельск, 2015 – 165 с.
8. **Сивков, Е.Н.** Корреляционная зависимость времени трелевки от интервалов времени на погрузочно-выбровочные операции форвардера // Научные чтения. Сборник материалов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2008 г. – Сыктывкар: Сыктывкарский лесной институт, 2009. С. 527-531.
9. **Суханов, Ю.В.** Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация / Ю.В. Суханов, А.А. Селиверстов, А.П. Соколов, С.Н. Перский // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9. № 1. С. 58-61.
10. **Ширнин, А.Ю.** Машина для комбинированной трелевки древесины на базе форвардера и анализ ее производительности / А.Ю. Ширнин, И.В. Зверев // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2014. № 2. С. 218-223.
11. **Хитров, Е.Г.** Изучение производительности трелевки форвардером / Е.Г. Хитров, Р.С. Беспалов, Д.О. Диваков, А.Ф. Эйвазов, К.А. Козловская // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 г. – СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 78-83.
12. **Эйхлер, Л.В.** Теоретическое осмысление интеграционных процессов на транспорте (на примере автомобильного транспорта) // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 125-132.
13. **Shtepa, A.A.** Application of selection criteria in management decision forecasting models at road transport enterprises / A.A. Shtepa, A.V. Ivanova // Перспективы развития и основные вопросы в науке. Материалы Национальной научно-практической конференции. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. С. 68-75.
14. **Епишкин, В.Е.** Совершенствование методики расчета предприятий автомобильного транспорта // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. С. 169-175.
15. **Клоков, Д.В.** Обоснование параметров и оценка динамических показателей лесной колесной погрузочно-транспортной машины: 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: автореферат дисс. ... ученой степени кандидата технических наук / Белорусский государственный технологический университет. Минск, 2001. – 23 с.

16. **Клоков, Д.В.** Оценка энергетических параметров лесной погрузочно-транспортной машины / Д.В. Клоков, А.А. Ермалицкий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 12. С. 138-142.
17. **Войнаш, С.А.** Обоснование параметров малогабаритной погрузочно-транспортной машины / С.А. Войнаш, А.С. Войнаш // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 3 (13). С. 138-141.
18. **Шор, Н.З.** Применение метода градиентного спуска для решения сетевой транспортной задачи // Материалы науч. семинара по теорет. и прикл. вопр. кибернетики и исследования операций: Науч. совет по кибернетике АН УССР. – Киев, 1962. Вып. 1. С. 9-17.
19. **Шор, Н.З.** Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения / Н.З. Шор. – Киев: Наукова думка, 1979. – 199 с.
20. Методы сплайн-функций. Российская конференция, посвященная 80-летию со дня рождения Ю.С. Завьялова (Новосибирск, 31 января – 2 февраля 2011 г.): Тез. докладов. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 2011. – 113 с.
21. **Соколинская, И.М.** Синтез симплекс-метода и метода линейной коррекции в задачах линейной оптимизации с неформализованными ограничениями // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. № 1. С. 226-238.
22. **Свалов, Д.В.** Сравнительный анализ эффективности симплекс-метода и метода минимальных путей на примере решения многопродуктовой транспортной задачи / Д.В. Свалов, С.И. Файнштейн // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. Т. 2. № 69. С. 79-81.
23. **Карташов, Б.А.** Среда динамического моделирования технических систем SIMINTECH / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров // Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 426 с.
24. **Хабаров, С.П.** Основы моделирования технических систем. Среда SIMINTECH. Учебное пособие для СПО / С.П. Хабаров, М.Л. Шилкина. – СПб.: Лань, 2019. – 120 с.

*Дата поступления
в редакцию: 06.11.2024*

*Дата принятия
к публикации: 24.01.2025*

УДК 629.33

EDN: CWINBO

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ СТАБИЛИЗАТОРА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

М.Х. Мавлонов

ORCID: 0009-0005-9193-4996 e-mail: mirzoodil.mavlonov@mail.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

М.В. Четвериков

ORCID: 0000-0003-3723-1171 e-mail: mihchet@gmail.com

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Предметом исследования являются методы расчета жесткостей податливых элементов систем поддрессирования колесных машин. В Инновационном центре «КАМАЗ» разработан новый метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости с учетом его геометрической формы, позволяющий достичь достаточную точность расчета с погрешностью в пределах 5 %. Представлена расчетная схема стабилизатора поперечной устойчивости. Сравнительная оценка производится на основании результатов серии расчетов моделей стабилизаторов поперечной устойчивости численным методом в программе конечно-элементного анализа.

Предлагаемый метод позволяет уточнять расчеты динамики транспортных средств за счет получения величины жесткости стабилизатора поперечной устойчивости, близкой к реальной, для корректного определения угла крена поддрессированной массы колесной машины, что является важным критерием безопасности движения транспортного средства.

Ключевые слова: транспортное средство, колесная машина, система поддрессирования, стабилизатор поперечной устойчивости, крен, жесткость, изгиб, кручение, аналитический расчет жесткости, метод конечных элементов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мавлонов, М.Х. Метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы / М.Х. Мавлонов, М.В. Четвериков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 104-110. EDN: CWINBO

METHOD FOR DETERMINING THE STIFFNESS OF ARBITRARY-SHAPED ANTI-ROLL BAR

M.K. Mavlonov

ORCID: 0009-0005-9193-4996 e-mail: mirzoodil.mavlonov@mail.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

M.V. Chetverikov

ORCID: 0000-0003-3723-1171 e-mail: mihchet@gmail.com

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

Abstract. The article studies methods for stiffness calculation of wheeled vehicle suspension systems spring elements. The KAMAZ Innovation Center has developed a new method for antiroll-bar stiffness calculation is developed, taking into account its geometric shape. This method allows to achieve a high accuracy of calculation with an error within 5 %. The design scheme of the antiroll-bar is presented. The comparative assessment is made on the basis of the results of a series of anti-roll bar models calculations using a numerical method in a finite element analysis program.

The proposed method allows to clarify the calculations of vehicle dynamics by obtaining the stiffness value of the transverse stability stabilizer close to the real one for correct determination of the roll angle of the wheeled vehicle's sprung mass, which is an important criterion of vehicle motion safety.

Key words: vehicle, wheeled vehicle, suspension system, antiroll-bar, roll, stiffness, bending, torsion, stiffness analytical calculation, finite element method.

FOR CITATION: M.K. Mavlonov, M.V. Chetverikov. Method for determining the stiffness of arbitrary-shaped anti-roll bar. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 104-110. EDN: CWINBO

Введение

Система поддрессирования – одна из самых значимых систем транспортного средства (ТС), для оценки работоспособности которой необходимо иметь точную динамическую модель автомобиля, в рамках которой будут учитываться упругие элементы. Существуют различные способы задания упругих тел в твердотельные динамические модели транспортных средств, наиболее известными являются:

- 1) внедрение редуцированной конечно-элементной модели модальным методом Крейга-Бэмптона [1-3];
- 2) разделение единого твердого тела на несколько частей и соединение их шарниром с заданной жесткостью [4, 5].

Стабилизатор поперечной устойчивости является одним из податливых элементов, присутствующих в системе поддрессирования. Он предназначен для уменьшения углов поперечного крена поддрессированной массы ТС. При прямолинейном движении автомобиля все участки устройства поворачиваются на один и тот же угол, и стабилизатор не скручивается, а в момент поворота появляется крен ТС и две половины стабилизатора поворачиваются на разные углы, за счет чего появляется упругий момент, создающий сопротивление крену автомобиля.

При создании динамической модели ТС возникает проблема корректного определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости. Современные методики предполагают рассмотрение данного узла как упругого стержня, работающего на кручение [6]. При этом если геометрия стабилизатора представляет собой сложную форму возникают трудности с применением данных методик ввиду большого расхождения результатов аналитических расчетов с экспериментальными данными. Исходя из этого возникает необходимость в разработке нового метода определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы.

Целью работы является разработка метода расчета жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы.

Задачи исследования:

- 1) анализ геометрии стабилизатора поперечной устойчивости;
- 2) оценка типа нагружения участков стабилизатора;
- 3) приведение жесткостей участков к общей жесткости устройства;
- 4) проверка корректности подхода методом конечных элементов (МКЭ).

Метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости

Стабилизатор представляет из себя профиль круглого сечения с направляющей произвольной формы, одни части которого работают на кручение, а другие – на изгиб (рис. 1) [7].

На основе расчетной схемы (рис. 1) построен метод определения его жесткости, состоящий из следующих этапов.

1. Стабилизатор разбивается на несколько простых участков.
2. Определяются участки работающие на изгиб (s_1, s_3, s_5, s_7) и на кручение (l_2, l_4, l_6).

3. Рассчитываются жесткости участков стабилизатора в соответствии с типами их нагружения.

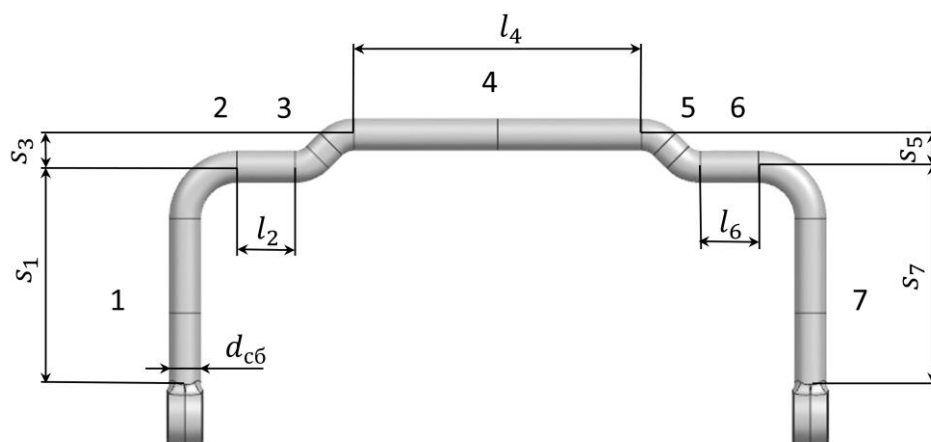


Рис. 1. Геометрические параметры стабилизатора поперечной устойчивости сложной формы

Fig. 1. Geometrical parameters of an anti-roll bar of complex shape

Жесткости участков стабилизатора, работающих на изгиб, определяются по формуле (1):

$$c_i = \frac{EI_x}{s_i}, \quad (1)$$

где $i = 1, 3, 5, 7$ – номера участков стабилизатора, работающих на изгиб; E – модуль упругости первого рода для материала стабилизатора, Па; I_x – центральный момент инерции сечения при изгибе, м^4 ; s_i – длины участков стабилизатора, работающих на изгиб, м.

Жесткости участков стабилизатора, работающих на кручение, определяются по формуле (2):

$$C_j = \frac{GI_p}{l_j}, \quad (2)$$

где $j = 2, 4, 6$ – номера участков стабилизатора, работающих на кручение; G – модуль упругости второго рода для материала стабилизатора, Па; I_p – полярный момент инерции сечения, м^4 ; l_j – длина участка стабилизатора, работающего на кручение, м.

4. Определяется суммарная жесткость стабилизатора поперечной устойчивости.

Так как все участки стабилизатора между собой соединены последовательно, суммарная жесткость определяется по формуле (3):

$$\frac{1}{c_{сб}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} + \frac{1}{c_4} + \frac{1}{c_5} + \frac{1}{c_6} + \frac{1}{c_7}, \quad (3)$$

где c_1, c_3, c_5, c_7 – жесткости участков стабилизатора, работающих на изгиб, $\text{Н}\cdot\text{м}/^\circ$; c_2, c_4, c_6 – жесткости участков стабилизатора, работающих на кручение, $\text{Н}\cdot\text{м}/^\circ$.

Проверка работоспособности аналитического метода

Объектом исследования являются стабилизаторы поперечной устойчивости простой и сложной геометрических форм с диаметрами прутка $d_{сб} = 36$ мм и 45 мм соответственно.

На рис. 2 представлен стабилизатор простой геометрической формы, состоящий из трех простых участков.

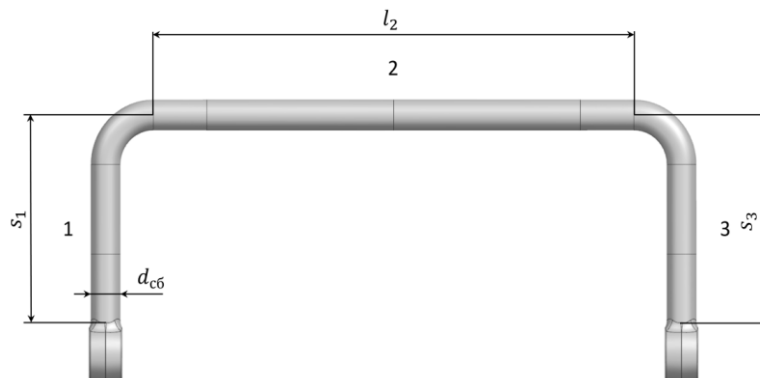


Рис. 2. Геометрические параметры стабилизатора поперечной устойчивости простой формы

Fig. 2. Geometrical parameters of an anti-roll bar of simple shape

Участки с длинами s_1, s_3 — работают на изгиб, а участок с длиной l_2 — на кручение. Момент инерции круга при изгибе вычисляется по формуле (4) [8]:

$$I_x = \frac{\pi d_{сб}^4}{64}, \quad (4)$$

где $d_{сб}$ — диаметр стабилизатора.

Полярный момент инерции круга вычисляется по формуле (5) [8]:

$$I_p = \frac{\pi d_{сб}^4}{32}. \quad (5)$$

Жесткости этих участков рассчитываются по формулам (1) и (2) соответственно.

Учитывая симметричную форму стабилизатора и подставляя (1), (2), (4) и (5) в основную формулу (3), получим следующее выражение (6):

$$\frac{1}{c_{сб}} = \frac{2 \cdot 64 \cdot s_1}{E \cdot \pi \cdot d_{сб}^4} + \frac{32 \cdot l_2}{G \cdot \pi \cdot d_{сб}^4}. \quad (6)$$

Далее необходимо рассмотреть стабилизатор поперечной устойчивости сложной геометрической формы (рис. 1). Стабилизатор состоит из семи простых участков. Участки с длинами s_1, s_3, s_5, s_7 работают на изгиб, а l_2, l_4, l_6 — на кручение. Жесткости этих участков рассчитывается по формулам (1) и (2) с учетом формул (4) и (5). Учитывая симметрию стабилизатора и подставляя (1), (2), (4) и (5) в основную формулу (3), получим выражение (7) для определения жесткости стабилизатора сложной геометрической формы:

$$\frac{1}{c_{сб}} = \frac{2 \cdot 64 \cdot s_1}{E \cdot \pi \cdot d_{сб}^4} + \frac{2 \cdot 32 \cdot l_2}{G \cdot \pi \cdot d_{сб}^4} + \frac{2 \cdot 64 \cdot s_3}{E \cdot \pi \cdot d_{сб}^4} + \frac{32 \cdot l_4}{G \cdot \pi \cdot d_{сб}^4} \quad (7)$$

Для подтверждения корректности метода аналитического расчета жесткости стабилизатора поперечной устойчивости, необходимо воспользоваться расчетами МКЭ [9-11].

Граничные условия для стабилизатора поперечной устойчивости во всех четырех расчетных случаях выбраны в соответствии с закреплениями в конструкции подвески натурального транспортного средства (рис. 3).

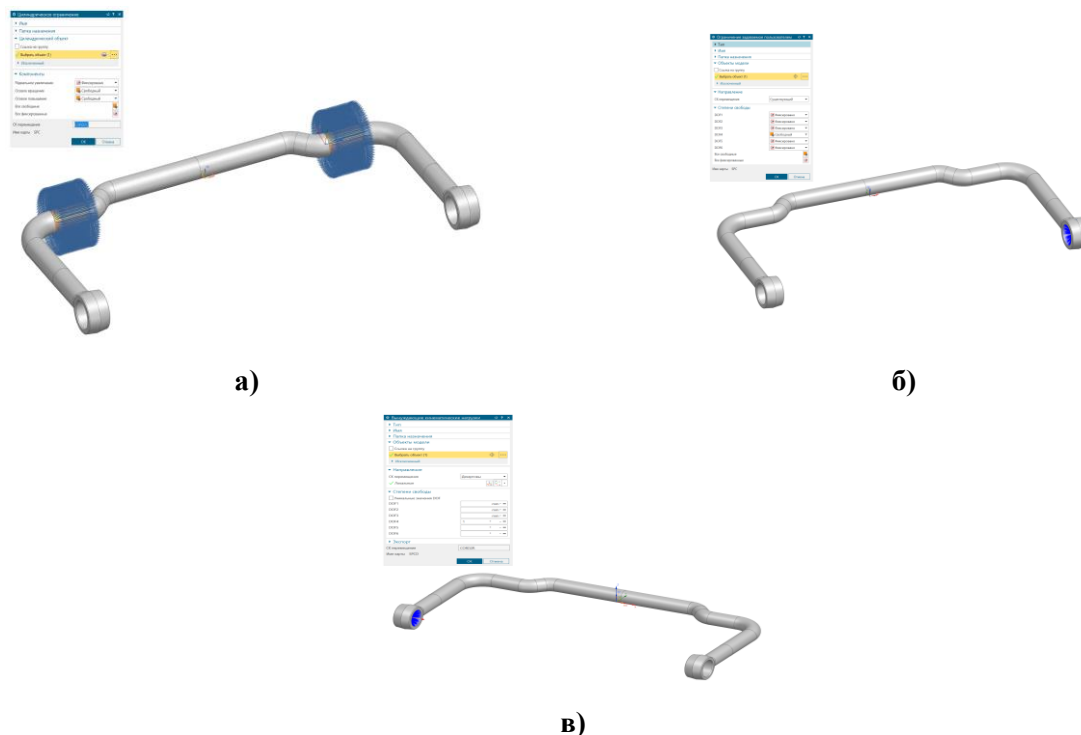


Рис. 3. Граничные условия:

а) резинометаллический шарнир; б) ограничение по всем степеням свободы, кроме вращения вокруг оси X; в) вращательное кинематическое воздействие относительно оси X на 1°

Fig. 3. Boundary conditions:

a) rubber-metal hinge; b) restriction on all degrees of freedom except rotation around the X-axis; c) rotational kinematic action relative to the X-axis by 1°

Результаты расчетов жесткостей стабилизатора поперечной устойчивости при помощи МКЭ для всех расчетных случаев представлены на рис. 4 и 5.

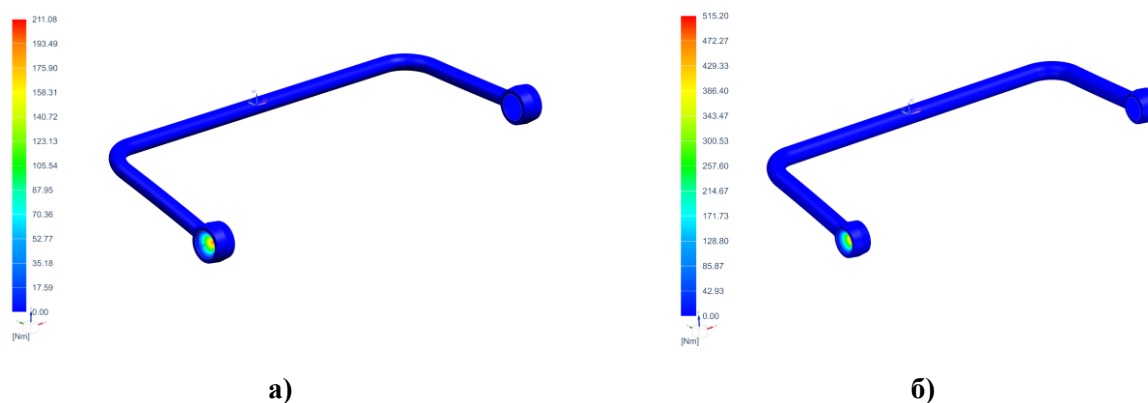


Рис. 4. Распределение моментов реакций для стабилизатора поперечной устойчивости простой геометрической формы:

а) стабилизатор $d_{c6} = 36$ мм; б) стабилизатор $d_{c6} = 45$ мм

Fig. 4. Distribution of reaction moments for the anti-roll bar of simple geometric shape:

a) anti-roll bar $d_{c6} = 36$ mm; b) anti-roll bar $d_{c6} = 45$ mm

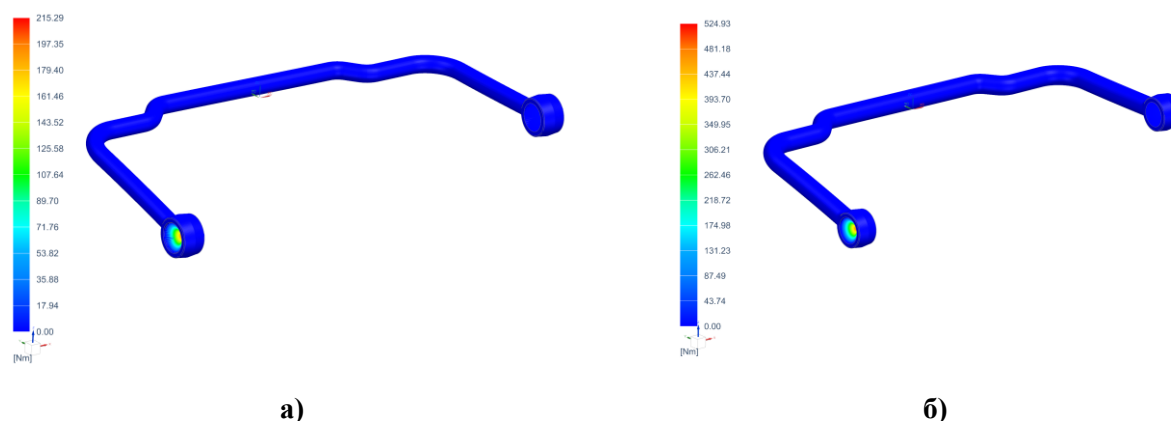


Рис. 5. Распределение моментов реакций для стабилизатора поперечной устойчивости сложной геометрической формы:

а) стабилизатор $d_{c6} = 36$ мм; б) стабилизатор $d_{c6} = 45$ мм

Fig. 5. Distribution of reaction moments for the anti-roll bar of complex geometric shape:

a) anti-roll bar $d_{c6} = 36$ mm; b) anti-roll bar $d_{c6} = 45$ mm

Численные значения результатов расчетов жесткостей стабилизаторов поперечной устойчивости аналитическим методом и МКЭ представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчетов жесткостей стабилизаторов поперечной устойчивости

Table 1.

Results of stiffness calculations of anti-roll bars

	Аналитический расчет		МКЭ	
	36	45	36	45
Диаметр стабилизатора d_{c6} , мм	36	45	36	45
Жесткость стабилизатора простой геометрии C_{c6} , Н · м/°	203	496	211	515
Жесткость стабилизатора сложной геометрии C_{c6} , Н · м/°	220	538	215	525

Из табл. 1 видно, что отклонения результатов аналитических расчетов от результатов расчета численным методом составляют менее 5 %, что свидетельствует о корректности проведенных расчетов и работоспособности разработанного метода определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости.

Заключение

Разработан аналитический метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной геометрической формы. Проведен анализ геометрии и оценка типа нагружения участков стабилизатора. Определена общая жесткость устройства. Отклонения результатов, полученных при помощи нового метода, от результатов численного расчета составляют не более 5 %, что подтверждает корректность метода определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы.

Библиографический список

1. **Рубанов, П.С.** Оценка влияния учета податливости рамы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел / П.С. Рубанов, Р.Б. Гончаров, Г. И. Скотников и др. // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 4. С. 401-409. – DOI 10.17816/2074-0530-472077. – EDN ZYUKEM.

2. **Vdovin, D.** Prediction of fatigue life of suspension parts of the semi-trailer in the early stages of design / D. Vdovin, Y. Levenkov, I. Chichekin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 г. Vol. 820. – М.: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012002. – DOI 10.1088/1757-899X/820/1/012002. – EDN HNLDC E.
3. **Горелов, В.А.** Анализ нагрузок рамы грузового автомобиля методом динамики систем тел с использованием конечно-элементной модели / В.А. Горелов, А.И. Комиссаров, Д.С. Вдовин, О. И. Чудаков // Транспортные системы. 2020. № 4(18). С. 4-14. – EDN GLXUZD.
4. **Максимов, Р.О.** Виртуальный стенд для определения нагрузок в пневматической подвеске задней тележки грузового автомобиля на ранних стадиях проектирования / Р.О. Максимов, И.В. Чичекин // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. №3 (49). С. 76 – 86. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-76-86.
5. **Левенков, Я.Ю.** Определение параметров модели рессоры для анализа нагрузок и оценки прочности элементов подвески в системе расчета динамики твердых тел / Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин // Инженерный вестник. 2016. № 12. С. 4. – EDN XICZAL.
6. **Афанасьев, Б.А.** Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.
7. **Тягунов, А.Е.** Расчет и обоснование конструктивных параметров автомобильных механических стабилизаторов поперечной устойчивости с регулируемой жесткостью / А.Е. Тягунов, А.Б. Карташов // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. Т. 11. №2. С. 64-71. – DOI: 10.17816/2074-0530-66918.
8. **Феодосьев, В.И.** Сопротивление материалов: учебник для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.
9. **Рубанов, П.С.** Совершенствование конструкции несущей системы полуприцепа на стадии проектирования путем параметрической оптимизации / П.С. Рубанов, Р.Б. Гончаров, А.О. Поляков, И.О. Хренов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2024. – № 3(146). – С. 108-119.
10. **Petyukov A.V., Goncharov R.B., Gonsales Astua A.V.** Numerical simulation of airbag module operating features. AIP Conf. Proc. 6 October 2023; 2833 (1): 020043. <https://doi.org/10.1063/5.0151985>
11. **Рубанов, П.С.** Методика синтеза геометрии продольного профиля и конструктивных параметров листовой рессоры с применением метода конечных элементов / П.С. Рубанов, Р.О. Максимов, М.В. Четвериков // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91. № 3. С. 331-340.

*Дата поступления
в редакцию: 30.07.2024*

*Дата принятия
к публикации: 24.01.2025*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Афраймович Лев Григорьевич – профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, д-р физ.-мат. наук

Ван Сюэчунь – аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ»

Елисеев Владимир Леонидович – доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», канд. техн. наук

Киященко Виктория Владимировна – младший научный сотрудник Самарского государственного технического университета

Куликов Михаил Сергеевич – старший научный сотрудник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук;

Кумагина Елена Александровна – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского; канд. техн. наук

Прилуцкий Михаил Хаимович – профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского; д-р техн. наук

Старостин Николай Владимирович – профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского; д-р техн. наук

Чернышов Андрей Владимирович – доцент Дзержинского политехнического института (филиала Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева), канд. техн. наук

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Курдюмов Александр Сергеевич – младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Лобанов Павел Дмитриевич – старший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе, д-р техн. наук;

Прибатурин Николай Алексеевич – директор Новосибирского филиала Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, член Национального комитета по тепло-массообмену

Светоносков Александр Игоревич – инженер Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Чинак Александр Владимирович – научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Бережнов Максим Константинович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Бузунов Николай Викторович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Жилейкин Михаил Михайлович – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Климов Александр Владимирович – руководитель службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр КАМАЗ», канд. техн. наук

Клубничкин Владислав Евгеньевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Клубничкин Евгений Евгеньевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Мавлонов Мирзоодил Хикматович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана

Муравьев Александр Сергеевич – начальник отдела «Разработка и интеграция ПО» НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»;

Наумов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана, д-р техн. наук

Пирожков Роман Дмитриевич – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана

Четвериков Михаил Викторович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
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. 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, отражающем их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала и паспорту специальности ВАК.** 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

Юрий Игоревич Молев: **rsl@nntu.ru**

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 1 (148)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 14.03.2025 Дата выхода в свет 24.03.2025. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ .

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

Адрес университета и типографии:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24