

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 3 (126)

Нижний Новгород 2019

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. №3(126).
– 187 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

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

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

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

УЧРЕДИТЕЛЬ

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019

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

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

Published since 2010

№ 3 (126)

Nizhny Novgorod 2019

The journal is issued 4 times a year

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

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

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

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

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

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

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

Yalciner Akhmet

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	9
Бочков В.С., Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Каспаров И.В. Применение архитектуры глубокого обучения U-Net для решения задачи выделения высокотемпературных зон пожара на видео	9
Кумагина Е.А., Неймарк Е.А. Разработка гибридного алгоритма решения задачи упорядочения	17
Лобовиков П.В., Куркина О.Е., Куркин А.А. Трансформация внутренних бризеров в трехслойном океане с учетом вращения Земли	24
Логанов С.В. К вопросу о многообразии форм наследования	36
Мартынюк М.В. Адаптация генетического алгоритма для решения задач управления состоянием электрической сети	47
Ялозо А.В. Гибридный метод математического моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах	57
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	67
Крюков Л.Т., Ершова М.И. Контроль механических свойств материалов реакторного оборудования по параметрам микропластической деформации	67
Лоскутов А.Б., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А. Оценка энергетической эффективности применения напряжения 0,95 кВ в системе электроснабжения с распределенной нагрузкой	73
Мордвинцев В.М., Кодочигов Н.Г., Сухарев Ю.П. Экспериментальные исследования процессов ввода в шаровую засыпку ВТГР средств компенсации реактивности	80
Стрелков В.Ф., Дарьенков А.Б., Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Квазирезонансный преобразователь с широким диапазоном регулирования выходного напряжения для систем электроснабжения ограниченной мощности	91
Филимонов А.Ф., Полуничев В.И., Помысухина А.Е. Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации давления	101
Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Баринов А.А., Коновалов И.А., Чесноков А.А., Макаров М.А. Исследование гидродинамики стратифицированных турбулентных потоков для валидации расчетных подходов к моделированию тепловых процессов в оборудовании ЯЭУ	111
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	120
Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования	120
Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Падалкин Б.В., Стадухин А.А. Метод обеспечения подвижности разрабатываемых колесных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колес	135
Кравец В.Н., Мусарский Р.А., Тумасов А.В. Влияние параметров трансмиссии на показатели тягово-скоростных свойств грузового автомобиля	145
Малеев С.И., Огороднов С.М., Степанов Е.В., Пинчин А.В. Оптимизация кинематических характеристик поворотного устройства передних управляемых колес автомобиля Газель Next	154

Тесленко Д.С., Лянг В.Ф., Беляков В.В., Макаров В.С., Дралкин С.С., Мартынов Д.А., Зайцев К.И., Захаркина К.П. Метод выбора рациональной формы погруженных в снег элементов колесной машины с целью снижения сопротивления движению	162
Черевастов М.Г., Молев Ю.И. Получение переходной функции автомобиля, представленного линейной расчетной двухмассовой моделью	171
НАШИ АВТОРЫ	181

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	9
Bochkov V.S., Kataeva L.Yu., Maslennikov D.A., Kasparov I.V. Application of U-Net deep learning architecture for fire segmentation on video	9
Kumagina E.A., Neumark E.A. A hybrid algorithm for permutation flowshop scheduling	17
Lobovikov P.V., Kurkina O.E., Kurkin A.A. Transformation of internal breathers in a three-layered ocean with considering of earth rotation	24
Loganov S.V. On the variety of inheritance categories	36
Martynyuk M.V. Adaptation of the genetic algorithm for solving the problems of managing the condition of the electric network	47
Yalozo A.V. A hybrid mathematical simulation method for hydrodynamic flows in engineering hydraulic systems	57
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	67
Kryukov T.L., Ershova M.I. Control of mechanical properties of materials of reactor equipment on the parameters of microplastic deformation	67
Loskutov A.B., Fitasov A.N., Petritskiy S.A. The energy efficiency assessment of the application of 0.95 kv voltage in the power supply system with distributed load	73
Mordvintsev V.M., Kodochigov N.G., Sukharev Yu.P. Experimental researches of processes of input in htgr pebble bed means of reactivity compensation	80
Strelkov V.F., Dar'enkov A.B., Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A. Quasi-resonant converter with a wide range of output voltage regulation for limited power supply systems	91
Filimonov A.F., Polunichev V.I., Pomysukhina A.E. Gas emission and gas transfer in a first coolant loop equipment of the reactors with gas pressure compensation system	101
Khrobostov A.E., Legchanov M.A., Solntsev D.N., Barinov A.A., Konovalov I.A., Chesnokov A.A., Makarov M.A. Research of hydrodynamics of stratified turbulent flows for validation of designated approaches to modeling thermal processes in equipment of nuclear power plants	111
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	120
Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A. Characteristic determination method for electric drive of independently actuated caterpillar articulated vehicle	120
Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Padalkin B.V., Stadukhin A.A. The method of ensuring the mobility of wheeled and tracked vehicles with individual electric drive at the development stage	135
Kravets V.N., Musarsky R.A., Tumasov A.V. Influence of transmission parameters on the indicators of the traffic-speed properties of the truck car	145
Maleev S.I., Ogorodnov S.M., Stepanov E.V., Pinchin A.V. Optimization of kinematic characteristics of the rotary device of the front driven wheels of the car Gazelle Next	154

Teslenko D.S., Lyang V.F., Belyakov V.V., Makarov V.S., Dralkin S.S., Martynov D.A., Zaycev K.I., Zakharkina K.P. A method of selecting the rational shape of snow-immersed wheeled vehicle elements in order to reduce resistance to movement	162
Cherevastov M.G., Molev Yu.I. Obtaining the transition function of a car presented by a linear calculation two-mass model	171
AUTHORS	181

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 544.454; 536.46; 614.841.1

В.С. Бочков¹, Л.Ю. Катаева^{1,2}, Д.А. Масленников¹, И.В. Каспаров²

ПРИМЕНЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ U-NET ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН ПОЖАРА НА ВИДЕО

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Самарский государственный университет путей сообщения²

Представлены результаты применения методов глубокого обучения к задаче сегментации объектов пламени на видео. Приведено сравнение моделей различных U-Net архитектур, предложена модернизация исходной архитектуры путем анализа анимированных последовательностей распространения огня. Обоснована эффективность использования данной методологии для выявления конфигурации пламени на видео. Представленная базовая модель на основе использования 11-слойной архитектуры энкодера VGG11 может быть улучшена с применением более мощных образцов, например, SE-ResNet 101. Модель может быть использована на микрокомпьютерах с графическим чипом и применима в робототехнике, в частности, при создании роботизированных средств контроля и устранения очагов возгорания. Использование RGB-видеопотока открывает возможности экономически выгодных решений по сравнению со многими современными средствами зонального слежения за ситуацией.

Впервые решена задача точной сегментации пламени с видеопотока в режиме реального времени на основе метода UNet. Решена задача сегментации как одноклассовой сегментации пламени (есть пламя в пикселе/нет пламени в пикселе), так и трехклассовой, разделенной по цвету (красное/оранжевое/желтое пламя). Впервые использован подход к детекции объектов с использованием анимированных последовательностей изображений, который показал существенный прирост точности.

Ключевые слова: глубокое обучение, сегментация, Sorensen-Dice, Jaccard, U-Net, аугментации.

Введение

Пожары являются наиболее распространенным типом природных и техногенных катастроф, наносящих вред экономике и здоровью человека. Наиболее частой причиной возникновения лесных возгораний, наряду с неосторожным обращением с огнем, является несвоевременное обнаружение проблемы и запоздалое реагирование, что, в свою очередь, обусловлено отсутствием средств зонального слежения за ситуацией. В связи с этим остро стоит проблема создания роботизированных средств контроля и устранения очагов возгорания. Среди современных средств контроля за обстановкой можно выделить использование бесконтактных ИК-датчиков тепла или тепловизоров. Однако их цена достаточно высока для широкого внедрения технологии и обеспечения слежения за обстановкой в лесных массивах с использованием беспилотных летательных аппаратов.

В настоящей статье представлены результаты применения к задаче сегментации объектов пламени на видео методов глубокого обучения, которые ранее доказали свою эффективность в решении задач компьютерного зрения [1, 2]. Базируясь на природе нелинейных преобразований, представляемых в виде композиции нейронных слоев, модель может извлекать нетривиальные паттерны обучаемых явлений. Несмотря на то, что сверточные нейронные сети существуют достаточно долгое время, их применение в реальных задачах было ограничено

требованиями к гигантским размерам датасетов изображений, сборка которых является достаточно трудоемкой. Это обусловлено использованием полносвязных слоев нейронной сети в конце энкодера, кратно увеличивающих количество параметров сети, необходимых для тренировки. С введением аугментаций (преобразований) входных изображений их количество уменьшилось, но, тем не менее, осталось значительным. Поскольку полносвязные слои образуют основное количество всех параметров сети, было предложено создавать новые архитектуры нейросетей из базовых путем отсечения последних полносвязных слоев [3]. Такие архитектуры получили название полностью-сверточных сетей, где на выходе мы имеем малоразмерную матрицу сигнала присутствия объектов на изображении вместо вектора объектов, из которого находится наиболее подходящий в задаче классификации. Установлено, что данная маска может быть использована в задаче сегментации изображений с локализацией объектов на нем путем увеличения размера маски (upsampling). Первая архитектура для задачи сегментации называлась FPN8 [3], где матрицу последнего слоя отсекали по пороговым значениям и увеличивали кратно в 8 раз до размеров исходного изображения, получая маску сигнала на нем. Следующим методом за данной достаточно грубой аппроксимацией стал SegNet, суть которого заключалась не в однократном увеличении маски сигнала в 8 раз, а увеличением его в 4 раза, вдвое с последующим проходом сверточного слоя, составляя декодер модели [4]. Этот метод значительно улучшил аппроксимацию объектов на видео по сравнению с FPN8, но по-прежнему выдавал не лучшее маскирование, руководствуясь на проходе развертки только исходными данными последней маски энкодера. U-Net [5] является модернизацией модели SegNet, где особенностью является использование пропускных коннекторов между слоями одного размера (рис. 1). В рамках представленной вычислительной модели данной архитектуры слева продемонстрирован энкодер данных, осуществляющий их сжатие, по правую сторону происходит раскрытие слоев с использованием операций двукратного увеличения размера маски и конкатенации с результатом, полученным на энкодерном слое того же уровня. Данный проход называется декодированием.

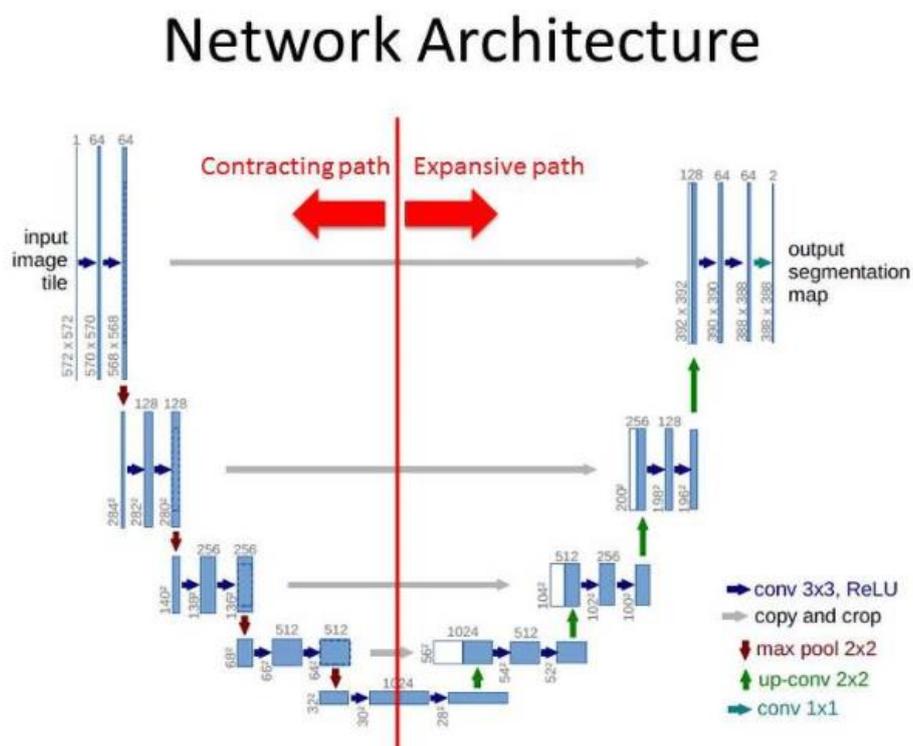


Рис. 1. U-Net архитектура нейронной сети

Обоснованием использования данного типа коннекторов является сохранение локации максимального сигнала обнаружения нужного объекта на определенном слое для уточнения его координат на выходе сети. В настоящей работе описано применение данного метода.

Данные исследования

Поскольку полностью-сверточные сети не нуждаются в громадном объеме данных, U-Net архитектуры могут быть применены для решения реальных коммерческих задач, и сбор данных обучения не занимает большого времени. Для сравнения: задачи классификации базируются на тренировке нескольких миллионов изображений (Mega-face датасет объемом ~ 1 млн изображений, ImageNet – ~ 14 млн), в то время как в решении задач сегментации медицинских изображений достаточно неплохие результаты были достигнуты уже при использовании 20-30 изображений [5]. Малое количество изображений обусловлено тем, что в решении используются различные аугментации (преобразования), в том числе, искажения исходных изображений (клеточная структура на изображении подвержена деформациям, поэтому использование данных видов аугментаций обосновано), которые не могут быть применимы в задаче обнаружения огня на реальных объектах. Однако разворот изображения по горизонтали позволяет увеличить размер датасета как минимум вдвое, и это минимальная аугментация, которая использовалась в начале исследований. В задаче сегментации пламени применялся датасет размером в 200 изображений аугментированных до 6 000 сэмплов.

Метрики точности и функции ошибки

Поскольку задача сегментации изображений отличается от классификации, для ее решения необходимо использовать метрики попиксельной точности и корректности модели, а также функции ошибки, градиенты которой указывали на изменение коэффициентов в сторону их минимизации. Первой идеей тренировки и валидации модели было использование стандартной категориальной кросс-энтропии на пиксельном уровне: в модели было N^2 классификаторов, функции ошибки которых суммировались, и находилось среднее значение, от которого вычислялся градиент для корректировки коэффициентов. В задачах сегментации используются две основные метрики. Первая – мягкий Jaccard index [6] (пересечение через объединение), описываемый следующей формулой (1):

$$J_s(c) = \frac{P_c \cap Y}{P_c \cup Y} = \frac{|P_c \cap Y|}{|P_c| + |Y| - |P_c \cap Y|} = \frac{\sum_i p_{c_i} y_i}{\sum_i p_{c_i} + \sum_i y_i - \sum_i p_{c_i} y_i} \quad (1)$$

Второй метрикой является мягкий Sorensen-Dice [7, 8] (2):

$$D_s(c) = \frac{2|P_c \cap Y|}{|P_c| + |Y|} = \frac{2 \sum_i p_{c_i} y_i}{\sum_i p_{c_i} + \sum_i y_i} \quad (2)$$

Здесь p_{c_i} – вероятность предсказания моделью нахождения объекта c в пикселе, i , y_i – бинарные значения актуального объекта в пикселе. Для осуществления сегментации изображений выходная матрица должна быть преобразована по сигмоиде (3):

$$s(n) = \frac{1}{1 + e^{-pn}}, \quad (3)$$

где n – номер класса; а также дискретизирована по порогу (4):

$$S = \begin{cases} n, & \max_{n \in N} (s_i(n)) \geq thr \\ 0, & \max_{n \in N} (s_i(n)) < thr \end{cases} \quad (4)$$

где N – количество классов в задаче сегментации.

Для валидации модели в процессе поиска наилучшего порога обнаружения используют метрики Dice и Jaccard, в которые на вход приходят бинаризованные по порогу вероятности нахождения пикселей. В данной работе поиск лучшего порога производится путем полного

перебора точек отрезка $[-6, +6]$ с шагом $1e-3$, в котором определена функция сигмойды. Установлено, что наилучшие результаты обнаружения получаются при использовании порога в области от нуля до единицы, что показано на рис. 2.

На оси абсцисс отображено значение порога обнаружения, на оси ординат – показатель точности модели при использовании данного порога. Отображены значения порога, при котором достигаются максимальные показатели.

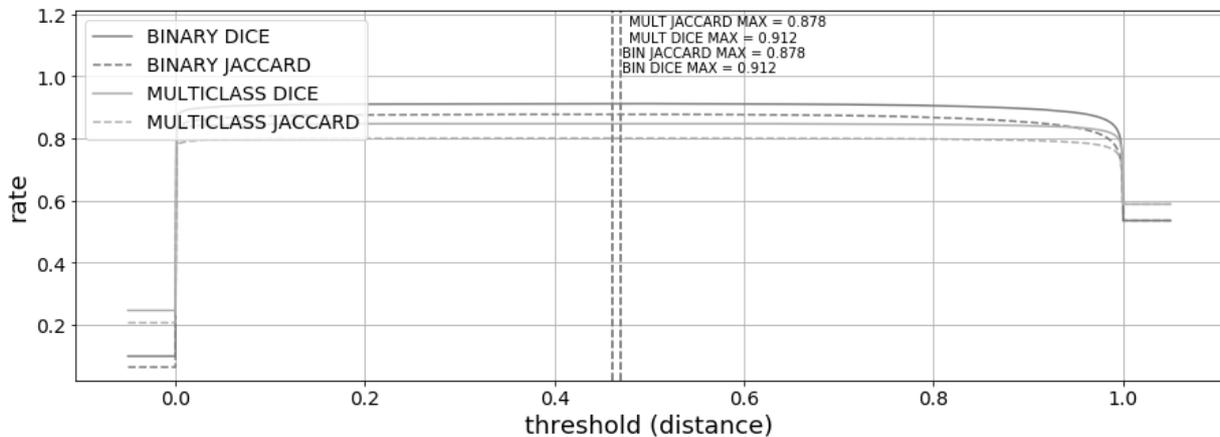


Рис. 2. График распределения точности обнаружения огня относительно выбора порога обнаружения

В работе используется функция ошибки, полученная в результате логарифмирования функции мягких метрик Dice & Jaccard и ее композиции с функцией бинарной кроссэнтропии (5):

$$\begin{aligned}
 BCE &= -\frac{1}{N} \sum_n y s(n) + (1 - y) \ln(1 - s(n)), \\
 L &= \frac{BCE - \ln(J_s)}{2}, \\
 L &= \frac{BCE - \ln(D_s)}{2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Бинарная и многоклассовая сегментация пламени для выявления зон

Бинарная сегментация представляет собой извлечение всех пикселей пламени без их разделимости. Многоклассовая сегментация подразумевает разделение пламени на пламя красного, оранжевого и желтого цвета на видео. Поскольку цвет пламени напрямую зависит от его температуры и материала горения [9], имеет смысл извлекать данную дополнительную информацию для последующего анализа уязвимых точек пламени. Результаты тренировки бинарных задач сегментации, в основе которых лежат функции мягкого Dice и Jaccard-коэффициентов, показаны на рис. 3. В приведенном графике ступенчато обозначены показатели точности бинарного Dice и Jaccard-коэффициентов в среднем. Тонкими вертикальными линиями отмечены показатели среднеквадратичного отклонения метрик на множестве тестовых данных. Данные показатели остаются достаточно большими, что сигнализирует о склонности модели к переобучению на тренировочном датасете, и отсутствием генерализации на другие данные. Показатели, улучшенные на 10 % точности, представлены для модели, натренированной на основе мягкого Jaccard-индекса. Результаты мультিকлассовой сегментации показаны на рис. 4.

В данном случае мы наблюдаем показатели 4 метрик точности. Бинарные показатели хуже, чем у бинарных моделей, однако разница между ними уменьшается с введением аугментаций данных в тренировочный датасет. Как и в случае с бинарными моделями, многоклассовые, натренированные на мягком Jaccard индексе, показывают лучшие результаты.

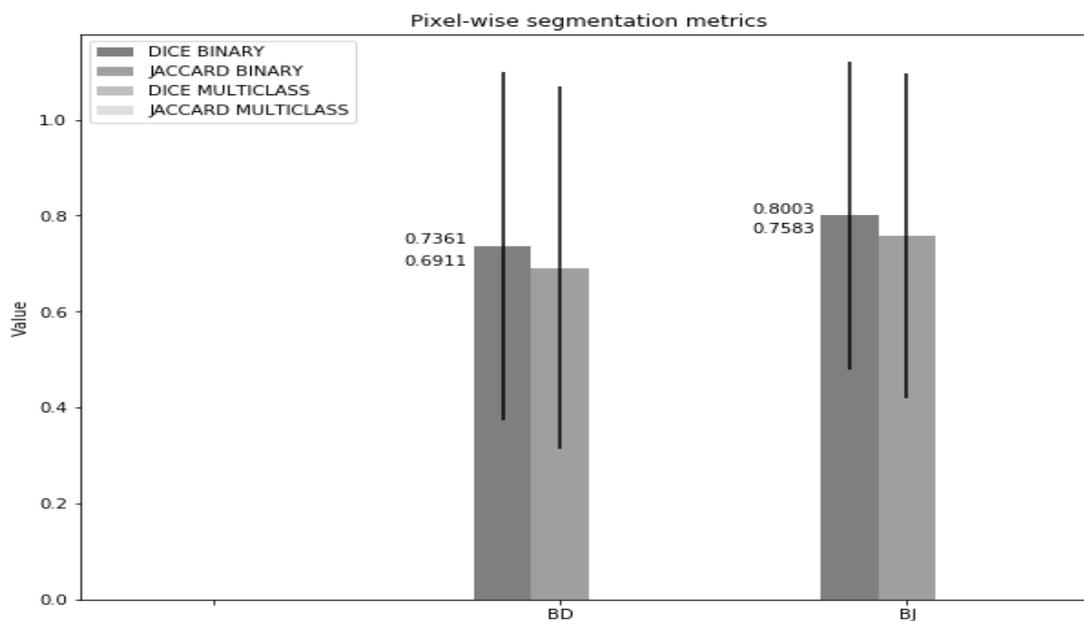


Рис. 3. Графики точности бинарных моделей сегментации

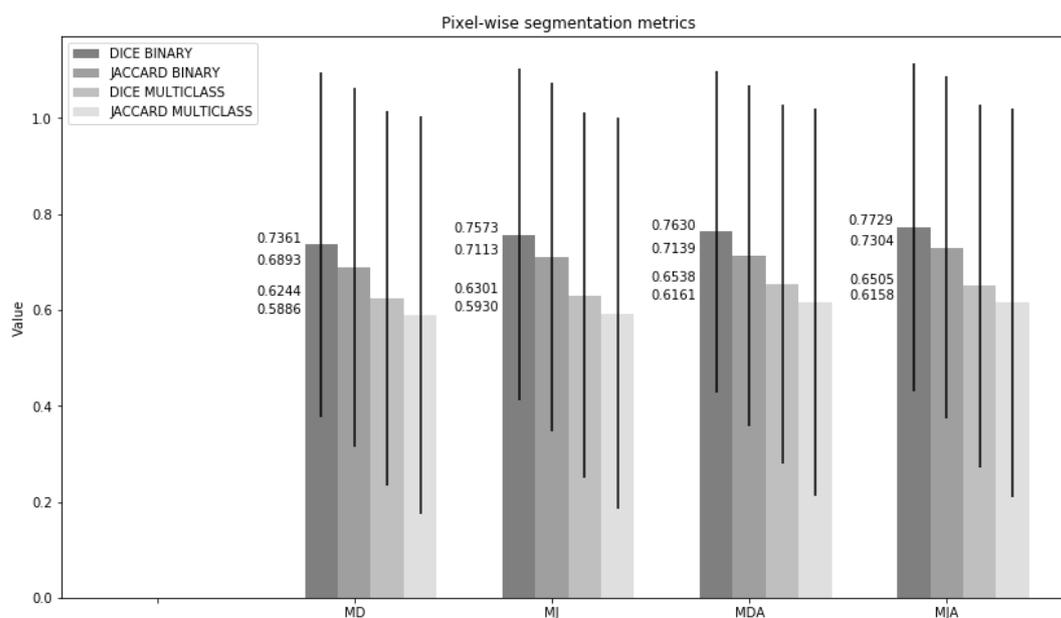


Рис. 4. Показатели точности моделей мультиклассовой сегментации

При визуальном анализе видеофайлов горения покадрово установлено, что пламя является достаточно динамичным объектом. Учитывая этот фактор, целесообразно проводить анализ объектов, используя непрерывные анимированные данные, предшествующие последнему кадру, на котором осуществляется маскирование пламени. Как показано на рис. 5, использование анимаций в качестве входных данных существенно увеличивает точность обнаружения и уменьшает среднеквадратичное отклонение. Одним из важных факторов улучшения показателей является, в частности, использование во время тренировки реверсивных анимаций горения, что позволяет увеличить размер датасета в два раза.

Результат распознавания четырехкадровой модели представлен на рис. 6, 7. Для четкой визуализации в непомеченных пламенем участках произведена перемена местами красного и синего канала изображения.

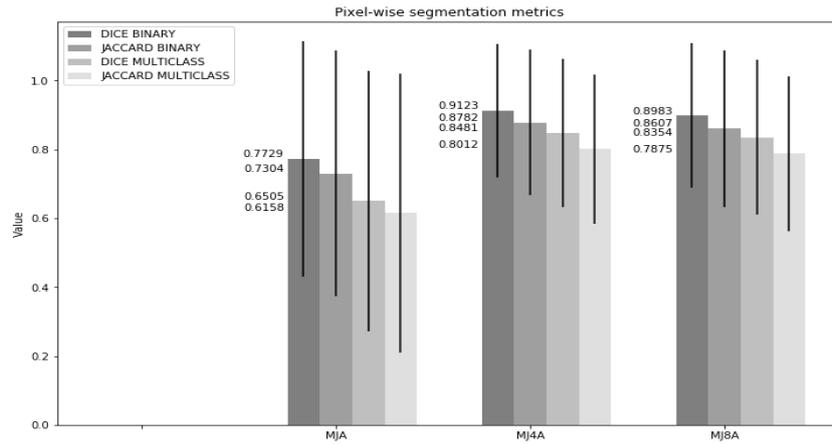


Рис. 5. Графики точности четырех- и восьмикладровых анимированных моделей в сравнении с однокадровой моделью



Рис. 6. Результат обнаружения пламени высокотемпературных зон пожара моделью, базирующейся на четырехкадровом анализе



Рис. 7. Результат обнаружения пламени высокотемпературных зон пожара моделью, базирующейся на четырехкадровом анализе

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования методов глубокого обучения для выявления конфигурации пламени на видео. Точность 90 % достигнута благодаря анализу анимированных фрагментов. Модель является базовой, на основе использования 11-слойной архитектуры энкодера VGG11, и может быть улучшена с применением более мощных моделей, например, SE-ResNet 101. Продемонстрированы отличные показатели генерализации, однако для промышленного внедрения данных моделей необходимо набирать большее количество данных и проводить дополнительные итерации тренировки, поскольку на момент анализа различных видео с квадрокоптеров, либо с экшн-камеры сотрудников МЧС, возникают различного рода ошибки ложного распознавания. Они могут быть нивелированы путем выявления таких участков видео и внедрением их в множество тренировочных данных. Модель в режиме тестирования расходует 2 Гб видеопамати и исполняется за 1 мс, поэтому может быть использована на микрокомпьютерах с графическим чипом, например, Nvidia Jetson Nano, применяемых в робототехнике.

Библиографический список

1. **Krizhevsky, A.** Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton // NIPS. – 2012. – P. 1106-1114.
2. **LeCun, Y.** Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. Le Cun, B. Boser, J.S. Denker, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard, L.D. Jackel // Neural Computation. – 1989. – № 1(4). – P. 541–551.
3. **Long, J.** Fully convolutional networks for semantic segmentation / J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell // arXiv:1411.4038 [cs.CV]. – 2014.
4. **Badrinarayanan, V.** SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Robust Semantic Pixel-Wise Labelling / V. Badrinarayanan, A. Handa, R. Cipolla // arXiv:1505.07293 [cs.CV]. – 2015.
5. **Ronneberger, O.** U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // arXiv:1505.04597 [cs.CV]. – 2015.
6. **Jaccard, P.** 'Etude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura / P. Jaccard // Bulletin de la Soci' et'e Vaudoise des Sciences Naturelles. – 37:547–579. – 1901.
7. **Sørensen, T.** A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons / T. Sørensen // Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. – 1948. – № 5 (4).
8. **Dice, Lee R.** Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species / Lee R. Dice // Ecology. – 1945. – № 26 (3): 297–302. doi:10.2307/1932409. JSTOR 1932409.
9. **Бочков, В.С.** Алгоритм поиска уязвимых зон пожара с применением анализа видеопотока / В.С. Бочков, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников // Сборник тезисов XXIX международной научно-практической конференции, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – 2017. – С. 395-400.

*Дата поступления
в редакцию: 10.06.2019*

V.S. Bochkov¹, L.Yu. Kataeva^{1,2}, D.A. Maslennikov¹, I.V. Kasparov²

**APPLICATION OF U-NET DEEP LEARNING ARCHITECTURE
FOR FIRE SEGMENTATION ON VIDEO**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
Samara state university of railway transport²

Purpose: multiclass image segmentation of fires.

Methodology: we use U-Net deep learning architecture over one-image and multi-image animations.

Value: the represented in paper result of fire-segmentation over animation is robust. Got big accuracy values with little mean square error. It can be applied to further segmentation of best plases to suppress the fire.

Research implications: the approach of using U-Net architecture over animation data can be implemented in big variety of human-assistance devices and automated water-cannons.

Keywords: deep-learning, segmentation, Sorensen-Dice, Jaccard, U-Net, augmentations.

УДК 519.16

Е.А. Кумагина, Е.А. Неймарк

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПОРЯДОЧЕНИЯНациональный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассмотрена NP -трудная задача построения оптимального по быстродействию расписания выполнения работ в системе конвейерного типа. Представлены точный, эвристический и гибридный подходы к ее решению. Подход к решению задачи оптимизации работы в системе конвейерного типа основан на методе ветвления и связывания с целью уменьшения затрат на вычислительные потери без потери оптимального решения. Рассмотрен гибридный подход, основанный на методе ветвей и границ, а также использующий генетический алгоритм для формирования начального решения и получения верхней оценки.

В ходе вычислительного эксперимента оценивается сокращение числа рассматриваемых вершин в дереве решений метода ветвей и границ. Показано, что гибридные подходы уменьшают количество вершин дерева решений метода ветвей и границ. Приведены результаты, показывающие высокую точность приближенных решений и эффективность предложенного гибридного алгоритма.

Ключевые слова: метод ветвей и границ, эволюционно-генетический алгоритм, гибридный алгоритм, задача упорядочения.

Введение

В теории расписаний основной фокус исследования сосредоточен на вопросах оптимального распределения и упорядочения конечного числа требований, которые обслуживаются детерминированными (входные параметры известны заранее) или стохастическими (значения параметров носят вероятностный характер) системами с одним или несколькими приборами. Задачи теории расписания конвейерного типа относятся к классу задач упорядочения множества работ на множестве станков, которые имеют не только большую теоретическую ценность, но и широкое практическое применение во многих инженерных и управленческих задачах. Ресурсы конвейерной системы состоят из набора обслуживающих станков (машин, процессоров, приборов). В зависимости от особенностей задачи они являются либо идентичными, либо одинаковыми только по функциональным возможностям, но разными по быстродействию, либо различными как по возможностям, так и по быстродействию. Для решения задачи конвейерного типа необходимо найти последовательность выполнения работ, при которой значение критерия будет оптимальным. Число допустимых решений этой задачи n . Конвейерная задача может формулироваться как задача минимизации общего времени выполнения всех работ на всех станках.

Использование эвристических алгоритмов для решения таких трудоемких задач зарекомендовало себя достаточно хорошо: при помощи эвристик (в частности, эволюционно-генетического алгоритма) можно получить решения приемлемого качества при незначительных вычислительных и временных затратах [1-3]. При работе с задачей упорядочения эволюционно-генетический алгоритм (ЭГА) может использоваться как самостоятельный алгоритм для улучшения ранее полученных решений (например, при помощи жадных алгоритмов), для поиска улучшенных начальных точек ветвления или для оценки верхней границы в методе ветвей и границ. При этом необходимо принимать во внимание, что применение эвристик не гарантирует получения оптимальных решений. В данной работе дающий точное решение эволюционно-генетический алгоритм применяется для ускорения работы метода ветвей и границ.

Содержательная постановка задачи

Рассмотрим одну из задач теории расписаний – задачу упорядочения работ в системе конвейерного типа. Она формулируется следующим образом: работы множества $N=\{1,2,\dots,n\}$ подлежат выполнению. Для выполнения работ предоставляются станки множества $M=\{1,2,\dots,m\}$. Работа считается выполненной, если она прошла выполнение последовательно на m -станках, начиная с первого. Для каждой работы известно время ее выполнения на каждой машине. Технологические условия выполнения работ состоят в следующем:

- на одной машине одновременно может выполняться только одна работа;
- процесс выполнения работы протекает непрерывно;
- выполнение работы на следующем станке может начаться не раньше, чем завершится ее выполнение на предыдущем станке;
- все работы доступны сразу;
- порядок выполнения работ на станках одинаковый.

Требуется построить оптимальное (минимальное) по быстродействию расписание.

Математическая модель

Исходные параметры.

$N=\{1, 2, \dots, n\}$ – множество работ;

$M=\{1, 2, \dots, m\}$ – множество станков;

$T= \|t_{ij}\|_{m \times n}$, – матрица времен выполнения работ на станках, где t_{ij} – время выполнения работы j на станке i , $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n}$.

Варьируемые параметры модели.

Обозначим через $\pi=(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ последовательность выполнения работ, где π_j – номер по порядку выполнения работы j , $j=\overline{1,n}$.

Обозначим через $Y= \|y_{ij}\|_{m \times n}$ матрицу времен окончания выполнения, где y_{ij} – время окончания выполнения j -ой работы на станке i , $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n}$.

Ограничения математической модели.

Выполнение работы на станке может начаться не раньше, чем завершится выполнение любой работы, выполняющейся раньше ее на этом станке (1):

$$y_{ij} \geq y_{ik} + t_{ik}, \quad (1)$$

если $\pi_k < \pi_j$, $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n}$, $k=\overline{1,n}$.

Выполнение работы на очередном (в порядке обслуживания) станке начинается после завершения ее выполнения на предыдущем станке (2):

$$y_{ij} \geq y_{i-1,j} + t_{i-1,j}, \quad (2)$$

если $i=\overline{2,m}$, $j=\overline{1,n}$.

Естественные ограничения на введенные переменные (3):

$$\pi_j \neq \pi_k, \quad j \neq k, \quad j=\overline{1,n}, \quad k=\overline{1,n}, \quad \pi_j \in \{1,2,\dots,n\}, \quad y_{ij} \geq 0, \quad i=\overline{1,m}, \quad j=\overline{1,n} \quad (3)$$

Постановка оптимизационной задачи

Обозначим через $F(Y, \pi)$ момент окончания выполнения последней работы на последнем станке.

Задача нахождения оптимального по быстродействию расписания будет заключаться в определении среди множества допустимых решений (Y и π удовлетворяют ограничениям (1)-(3)) такого, которое доставляет минимальное значение функционалу F (4):

$$F(Y, \pi) = \max_{mj} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для конвейерных систем вообще получено много результатов [1-6], расписания для них составляются гораздо легче, чем для систем произвольной структуры. Однако эта простота относительна и заключает в себе много проблематичных аспектов. NP -трудность конвейерной задачи показана в [7]. Поскольку она относится к классу NP -трудных задач, поиск точного решения возможен только для задач небольшой размерности, и разработка эвристических методов является актуальной.

Процедуры метода ветвей и границ для конвейерной задачи

Для решения поставленной задачи предлагается методология ветвей и границ. Чтобы сконструировать такой метод решения задачи, необходимо разработать его индивидуальные и универсальные процедуры. К индивидуальным методам, зависящим от конкретной задачи, относятся процедуры получения верхних и нижних оценок, а также процедуры ветвления. К универсальным процедурам относятся процедура отсева неперспективных направлений и процедура остановки.

При построении дерева решений будем именовать вершины следующим образом: $v = (v_1, v_2, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_n)$, где k – уровень дерева, $v_k \in N$, $v_k \neq v_i$ $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, n}$. При этом для первых k -работ порядок выполнения фиксируется и определяется путем в вершину, а для работ, начиная с номера $k+1$ порядок выполнения не зафиксирован. На первую роль претендуют n -работы. Это n -ветвей, выходящих из корня. Для каждой ветви рассматривается вторая работа из оставшихся при фиксированной первой, и т.д.

Стратегия ветвления.

Для выбора очередной вершины для ветвления выбирается вершина с наименьшей нижней оценкой.

Верхняя оценка.

В качестве верхней оценки выбирается значение критерия на перестановке $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \pi_{k+1}, \dots, \pi_n)$, где работы $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$ определены путем в вершину (фиксированы), а оставшиеся π_{k+1}, \dots, π_n выполняются в лексикографическом порядке.

Нижняя оценка.

В качестве нижней оценки для фиксированных работ $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$ строится расписание, находится момент окончания выполнения работы π_k , и к этому результату добавляется сумма времён на последнем станке для оставшихся (нефиксированных) работ π_{k+1}, \dots, π_n .

Отсев.

На каждом шаге метода происходит удаление вершин, нижняя оценка которых больше, чем самая меньшая найденная верхняя граница (рекорд).

Остановка.

Остановка метода происходит, когда в дереве решений останется одна вершина, у которой совпадают верхняя и нижняя оценки.

В ходе расчетов сохраняется рекорд: перестановка, на которой достигается минимальная верхняя оценка.

Использование метода ветвей и границ для решения задачи упорядочения работ в конвейерной системе позволяет найти точное решение, однако этот процесс требует больших вычислительных и временных затрат. При данном подходе к решению задачи одной из наиболее критичных операций является получение значения верхней границы, поскольку уменьшение верхней оценки позволит сократить размер дерева решений. Для поиска верхней оценки предлагается использовать эволюционно-генетический алгоритм.

Процедуры генетического алгоритма для конвейерной задачи

Для разработки эволюционно-генетического алгоритма решения конкретной задачи необходимо определить кодировку решений, сопоставить критерий и функцию приспособ-

ленности, определить процедуры мутации, скрещивания и отбора [8]. Работая одновременно с несколькими допустимыми решениями, ЭГА позволяет найти удовлетворительное решение аналитически неразрешимых проблем, зачастую довольно близкое к оптимальному. Алгоритм в ходе работы моделирует процессы популяционной генетики (мутация, скрещивание, отбор и выживание сильнейших). Настройка его эффективности осуществляется за счет последовательного подбора и комбинирования параметров алгоритма [9].

Кодирование решений.

Одним из важных этапов формирования среды для работы ЭГА является выбор способа кодирования решений. Решением конвейерной задачи является перестановка n элементов, соответствующих номерам работ, поэтому целесообразно использовать n -арное кодирование [8]. Каждая позиция в кодирующей строке может принимать одно из значений в пределах от 1 до n . Помимо кодировки, для представления особи необходимо задать ее приспособленность.

Функция приспособленности.

Функция приспособленности в ЭГА играет роль целевой функции, она должна давать оценку кодировки особи для выяснения ее пригодности (полезности). В данной работе функция приспособленности вычисляет по перестановке(кодировке) общее время, требуемое для отработки этой перестановки на всех станках. В классической постановке ЭГА решается задача на максимум, то есть ищется особь, обладающая наибольшей приспособленностью. В рассматриваемом случае нас интересует особь с наименьшей приспособленностью, т.е., решается задача на минимум.

Формирование начальной популяции.

Одним из параметров ЭГА является размер популяции, который не меняется в ходе работы всего алгоритма. В данной работе численность популяции совпадает с количеством работ и равно n . Вторым важным вопросом, связанным с популяцией, является проблема генерации начальной популяции [9]. Основным требованием к начальной популяции является разнообразие базовых особей. В данной работе применяется следующий способ создания начальной популяции. Первая базовая особь – это лексикографическое упорядочение всех номеров работ. Каждая следующая особь получается путем проведения $n-1$ транспозиции соседних элементов. Таким образом, будет построено n перестановок, наиболее удаленных друг от друга в метрике, предложенной в [2].

Основной цикл ЭГА.

Основной цикл ЭГА состоит в последовательном применении операторов кроссовера, мутации и селекции. В качестве кроссовера применяется оператор РМХ [9]. Данный вид кроссовера требует выбора двух родительских особей, которые выбираются из популяции случайно (панмиксия). Оператор *мутации* производит с указанной вероятностью обмен местами двух случайных генов (элементов) кодировки (перестановки). В качестве оператора селекции используется Бета-турнир. Оператор селекции производит отбор особей из текущей популяции. Для этого из всех полученных в данной популяции особей выбирается случайно β особей (где β – параметр алгоритма), лучшая по приспособленности особь копируется в следующее поколение, отбор и копирование происходит в цикле. Количество циклов совпадает с численностью популяции. Остановка производится по окончании указанного количества поколений, что также является параметром алгоритма.

Гибридный алгоритм

Метод ветвей и границ позволяет получить точное решение, но процесс его нахождения требует весьма больших затрат памяти и времени. ЭГА позволяет найти приближенное решение, но качество алгоритма надо доказывать экспериментально. Целесообразно сочетать сильные стороны обоих подходов. Предполагается, что гибридный подход поможет увеличить эффективность поиска оптимального решения в методе верей и границ за счет умень-

шения времени и количества вычислений. Применение ЭГА возможно, как на этапе формирования начального решения для метода ветвей и границ, так и для вычисления верхней оценки.

В приведенном выше описании метода ветвей и границ в качестве верхней оценки выбиралось значение критерия на перестановке $\pi=(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \pi_{k+1}, \dots, \pi_n)$, где порядок выполнения первых k работ определялся путем в вершину, а оставшиеся работы выполнялись в лексикографическом порядке. Для сужения области перебора требуется сделать верхнюю оценку в вершинах как можно меньшей. Предлагается использовать «ускоренную» версию ЭГА для поиска решения для незафиксированных работ. В этом случае количество работ у нас сокращено до $k < n$, тем самым сокращается длина кодировки и размер популяции, что повлияет на общее быстроедействие алгоритма.

Вычислительный эксперимент

Для выяснения эффективности разработанного гибридного подхода был проведен вычислительный эксперимент. Был программно реализован генератор задач, задающий данные для конвейерных задач с заданным числом станков в диапазоне [5, 20] и числом работ в диапазоне [10, 50] со случайными целочисленными значениями времен выполнения из диапазона [0, 100]. Каждая задача решалась последовательно всеми разработанными алгоритмами:

- 1) методом ветвей и границ с лексикографически упорядоченной начальной перестановкой;
- 2) эволюционно-генетическим алгоритмом;
- 3) гибридным алгоритмом № 1 (с применением ЭГА для формирования начального решения для метода ветвей и границ);
- 4) гибридным алгоритмом № 2 (с применением ЭГА для вычисления верхних оценок в методе ветвей и границ и лексикографическим начальным упорядочением);
- 5) гибридным алгоритмом № 3 (с применением ЭГА для формирования начального решения и верхних оценок метода ветвей и границ).

Решения, полученные методом ветвей и границ с лексикографически упорядоченной начальной перестановкой, принимались в качестве контрольных. Число вершин ветвления, оцениваемых в дереве решения при работе метода ветвей и границ, использовалось для оценки сокращения числа просмотренных вершин при работе гибридных алгоритмов. Для каждого запуска ЭГА высчитывалось относительное отклонение от оптимума, полученного методом ветвей и границ:

$$\text{относительное отклонение от оптимума} = \frac{F_{\text{opt}} - F_{\text{ЭГА}}}{F_{\text{opt}}} \cdot 100\% .$$

Настройки ЭГА:

- шагов 100;
- размер популяции n ;
- бета-турнир на 3 особи;
- вероятность мутации 1 %.

В результате применения ЭГА среднее относительное отклонение приближенных решений, составило 2,86 %. Процент запусков, в которых получено точное решение составил 95 %. Для гибридных алгоритмов высчитывалось среднее сокращение числа вершин дерева решений.

В табл. 1 приведены результаты вычислительного эксперимента.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

Гибридный алгоритм	Сокращение числа вершин дерева решений, %
№ 1	15,1
№ 2	7,3
№ 3	22,7

По результатам вычислительного эксперимента видно, что разработанный ЭГА дает в среднем высокую точность решений, и при этом точное решение получено в 95 % запусков. Поскольку получаемое при помощи ЭГА начальное решение близко к точному, применение этого решения в качестве начального в методе ветвей и границ позволило сократить число вершин в дереве решений на 15,1 %. Применение ЭГА для подсчета верхней оценки в методе ветвей и границ при лексикографическом начальном упорядочении дает незначительное сокращение дерева решений. Гибридный алгоритм, в котором ЭГА применяется как для генерации начального решения, так и для получения верхних оценок, оказался самым эффективным по используемой в ходе решения памяти, но вместе с тем – и самым затратным по времени.

Заключение

В работе рассмотрена *NP*-трудная задача построения оптимального по быстродействию расписания выполнения работ в системе конвейерного типа. Представлены точный, эвристический и гибридный подходы к ее решению. Приведены результаты вычислительного эксперимента, показавшие высокую точность приближенных решений и эффективность предложенного гибридного алгоритма.

Библиографический список

1. Прилуцкий, М.Х. Задача упорядочения работ как задача о назначениях / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 1999. – № 2. – С. 270-275.
2. Кумагина, Е.А. Метаэвристический алгоритм решения задач упорядочения / Е.А. Кумагина, Д.В. Буяков // Интеллектуальные информационные системы: труды Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет. – 2017. – Ч.2. – С. 40-44.
3. Неймарк, Е.А. Задача определения оптимального порядка выполнения операций технического контроля для микроэлектронного производства / Е.А. Неймарк, Д.В. Седаков // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 59. – № 1. – С. 100-104.
4. Танаев, В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы / В.С. Танаев, Ю.Н. Сотсков, В.А. Струсевич. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
5. Прилуцкий, М.Х. Построение оптимальных по быстродействию расписаний в канонических системах «конвейер-сеть» / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов // Информационные технологии. – 2011. – № 3. – С. 26-31.
6. Прилуцкий, М.Х. Метод ветвей и границ решения задачи многоресурсного сетевого планирования / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – №2(56). – С. 48-51.
7. Гэри, Н. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / Н. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1992.
8. Неймарк, Е.А. Решение нестационарной задачи о ранце при помощи генетического алгоритма // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2006. – № 3. – С. 133-138.
9. Неймарк, Е.А. Улучшение качества начальной популяции эволюционно-генетического алгоритма для задачи коммивояжера // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. – № 50. – С. 69-73.

Дата поступления
в редакцию: 25.06.2019

Е.А. Kumagina, Е.А. Neumark

A HYBRID ALGORITHM FOR PERMUTATION FLOWSHOP SCHEDULING

Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod

Purpose: the article discusses an approach to solving the task of streamlining work in a conveyor-type system based on the branch and bound method in order to reduce computational cost without losing the optimal solution.

Approach: the article presents a hybrid approach of solving the tasks of streamlining work in a conveyor-type system based on the branch and bound method and using a genetic algorithm to form initial permutations and obtain upper estimates.

Findings: during the computational experiment the reduction of the number of vertices of decision tree of the branch and bound method is evaluated. It is shown: hybrid approaches reduce the number of vertices of decision tree of the branch and bound method.

Originality/value: all results are new.

Keywords: branch and bound method, genetic algorithm, hybrid algorithm, permutation problem.

УДК 004.942

П.В. Лобовиков, О.Е. Куркина, А.А. Куркин

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ВНУТРЕННИХ БРИЗЕРОВ В ТРЕХСЛОЙНОМ ОКЕАНЕ
С УЧЕТОМ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Моделируется процесс распространения и трансформации под действием вращения Земли вдоль трассы в горизонтально-однородной стратифицированной по плотности жидкой среде локализованных возмущений в рамках уравнения мКдВ-Островского. Условие в начальной точке трассы задается в соответствии с точным решением уравнения мКдВ из семейства неизлучающих волновых пакетов-бризеров. Распределение плотности жидкости по вертикали задавалось таким образом, чтобы обеспечить условия существования указанных решений (положительный знак коэффициента кубической нелинейности). При этом был выбран наиболее простой профиль с двумя равными слегка сглаженными скачками плотности на одинаковом расстоянии от дна и поверхности. Влияние вращения Земли на долговременную эволюцию бризеров исследовано для решений различной формы и с различной шириной спектра в частотной области. Показано, что наиболее сильная трансформация волнового поля под действием вращения Земли наблюдается в бризерах с широким спектром, при этом спектр сдвигается в область низких частот. Отмечается также явление квази-рекуррентности бризеров, ранее известное для уединенных внутренних волн во вращающейся жидкости.

Ключевые слова: нелинейный волновой пакет, внутренние волны, стратификация, неоднородная среда, модифицированное уравнение Кортевега-де-Вриза.

Введение

Длинным нелинейным внутренним уединенным волнам уделялось много внимания в течение последних нескольких десятилетий: получены многочисленные доказательства их распространенности в прибрежных и окраинных морях и достигнуты большие успехи в понимании динамики этих волн. Качественные их особенности хорошо описываются классом теоретических моделей на основе КдВ-иерархии (хотя количественные характеристики не всегда воспроизводятся точно) [1, 2]. Интересным явлением среди квазистационарных волн являются так называемые бризеры. Они представляют собой волновые пакеты со стационарной (или медленно меняющейся в горизонтально-неоднородной среде) огибающей. Прототипами таких структур являются точные локализованные решения некоторых уравнений слабонелинейной теории, включая модифицированное уравнение Кортевега-де-Вриза и уравнение Гарднера [3], которые хорошо описывают динамику внутренних волн в стратифицированных средах. Бризеры могут иметь различные формы, как типичные для солитонов огибающей (которые являются общими решениями нелинейного уравнения Шредингера), так и в виде пары солитонов противоположных полярностей, которые «изменяют фазу» через определенные промежутки времени [4-7]. Численное моделирование демонстрирует, что такие структуры могут сохраняться как долгоживущие внутренние волны также в полнелинейных уравнениях Эйлера [8, 9]. Подобные структуры иногда наблюдались в океане, например, у берегов Южной Кореи [10], Нью-Джерси [11], в Андаманском море [12], в Кельтском море [13, 14].

Систематические исследования отдельных аспектов динамики внутренних бризеров начались только недавно [9, 15-18], и по-прежнему существуют серьезные недостатки в понимании потенциальных механизмов их генерации и возможной роли этих структур в динамике морей и океанов. Естественно, что многие факторы, такие как горизонтальная неоднородность стратифицированных вод в морях и океанах, учет реалистичной формы дна и/или вращения Земли, могут существенно повлиять на поле таких нелинейных объектов. Здесь мы

рассмотрим задачу о трансформации бризера внутренних волн в трехслойном океане с учетом вращения Земли.

Вращение Земли является одним из важных факторов при теоретическом описании внутренних волн в океане. Этот фактор можно игнорировать, когда волны, длинные по сравнению с глубиной океана, являются короткими по сравнению с внутренним радиусом деформации (Россби), так что $\gamma = L / L_R \ll 1$. Здесь L – характерная длина волны, $L_R = c_0 / f_{in}$ – радиус деформации, c_0 – фазовая скорость длинных линейных внутренних волн, а $f_{in} = 2 \times \Omega_E \sin \varphi$ – инерционная частота (параметр Кориолиса), Ω_E – частота вращения Земли, φ – географическая широта акватории, где распространяются волны. Однако эти слабые эффекты, связанные с вращением, могут быть сопоставимы с нелинейными и негидростатическими (дисперсионными) эффектами при достаточно больших длинах волн, в высоких широтах и при большой длине трассы распространения волны (время распространения составляет несколько инерционных периодов).

При распространении волн в одном направлении в области, неограниченной в поперечном направлении, эволюцию смещения изопикнических поверхностей определяет уравнение КдВ с вращением, называемое еще уравнением Островского [19, 20]. Уединенные внутренние волны при распространении во вращающейся среде затухают и распадаются, излучая более длинные инерционно-гравитационные волны, и затем трансформируются в локализованные волновые пакеты, распространяющиеся с максимальной групповой скоростью, соответствующей дисперсионному соотношению для линейной версии уравнения Островского [21]. Они состоят из длинноволновой огибающей и более коротких, более быстрых волн несущей. Излучение при этом очень слабое, что приводит к формированию устойчивых структур, которые могут содержать до 50 % энергии в исходной уединенной волне [22]. Взаимодействующие пакеты могут либо проходить друг через друга, либо сливаться в более длинный пакет. Связанные уравнения Островского, описывающие взаимодействие двух различных вертикальных мод внутренних волн, имеющих близкие скорости, получены в работе [23]. При взаимодействии уединенных импульсов различных мод наблюдался тот же эффект генерации локализованных пакетов.

Здесь мы рассмотрим процесс трансформации внутренних бризеров в горизонтально-однородной среде под влиянием вращения в рамках уравнения мКдВ-Островского. Тестовой моделью жидкости является симметричная по вертикали трехслойная жидкость, где фоновые условия могут обеспечить условия, необходимые для существования бризеров в рамках уравнения мКдВ (положительный знак коэффициента кубической нелинейности).

Основные уравнения и фоновые условия

1. Модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза (мКдВ).

В случаях, когда квадратичная нелинейность обращается в ноль, например, при симметричных относительно половинной глубины профилях плотности и течения, в эволюционном уравнении, описывающем распространение внутренних волн одной моды, удерживают кубический нелинейный член, опуская другие члены второго порядка. Получаемое при этом уравнение называют модифицированным уравнением Кортевега-де Вриза (1):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha_1 \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

где x – горизонтальная координата, вдоль которой происходит распространение волны, t – время, $\eta(x, t)$ – смещение изопикнической поверхности в точке максимума линейной моды. Скорость распространения длинных линейных внутренних волн, c , и структура (мода) волны $\Phi(z)$ по вертикальной координате z , направленной вверх, определяются решением следующей задачи Штурма-Лиувилля (2):

$$L\Phi = 0, \quad (2)$$

с граничными условиями $\Phi = 0$ на дне ($z = -H$) и на поверхности ($z = 0$) жидкости (приближение твердой крышки). Здесь L – самосопряженный линейный оператор (3):

$$L \equiv \frac{d^2}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2}, \quad (3)$$

а $N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0}{dz}$ – частота Брента–Вайсяля, $\rho_0(z)$ – плотность жидкости в невозмущенном состоянии, g – ускорение свободного падения.

Коэффициент линейной высокочастотной дисперсии β в уравнении (1) определяется формулой (4):

$$\beta = \frac{3c^2}{2I} \int_{-H}^0 \Phi^2 dz, \quad I = 2c \int_{-H}^0 (d\Phi / dz)^2 dz, \quad (4)$$

где H – полная глубина жидкости, а для нахождения коэффициента кубической нелинейности α_1 (5):

$$\alpha_1 = \frac{3c^2}{I} \int_{-H}^0 dz \left[3(dT_n / dz) - 2(d\Phi / dz)^2 \right] (d\Phi / dz)^2, \quad (5)$$

необходимо предварительно решить неоднородную краевую задачу (6):

$$LT_n = \frac{3}{2} \frac{d}{dz} \left\{ \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right\}, \quad T_n = 0 \text{ при } z = 0 \text{ и } z = -H. \quad (6)$$

Уравнение (1) является интегрируемым и решается методом обратной задачи рассеяния [24]. Его решение в виде уединенной волны (на нулевом пьедестале) существует лишь при $\alpha_1 > 0$ и имеет вид (7):

$$\eta(x, t) = a \operatorname{sech} \left(\sqrt{\frac{\alpha_1 a^2}{6\beta}} (x - Vt) \right), \quad V = c + \frac{\alpha_1 a^2}{6}, \quad (7)$$

где a – произвольная по величине и знаку амплитуда волны. Полярность солитона может быть любой и не зависит от параметров уравнения. При $\alpha_1 < 0$ солитонные решения существуют только на ненулевом пьедестале, но существуют стационарные решения в виде бездиссипативных ударных волн [25]. Известны также другие элементарные возмущения в рамках модифицированного уравнения Кортевега-де Вриза (1) при $\alpha_1 > 0$ – бризеры, или «осциллирующие пульсирующие солитоны» [26] (8):

$$\eta(x, t) = -4qasech\theta \left[\frac{\cos \phi - (q/p) \sin \phi \cdot \operatorname{th} \theta}{1 + (q/p)^2 \sin^2 \phi \cdot \operatorname{sech}^2 \theta} \right], \quad (8)$$

где фазы «несущей», ϕ , и «оггибающей», θ , задаются так (9):

$$\phi = 2p \frac{x}{L} + 8p(p^2 - 3q^2) \frac{t}{T} + \phi_0, \quad \theta = 2q \frac{x}{L} + 8q(3p^2 - q^2) \frac{t}{T} + \theta_0. \quad (9)$$

Здесь q и p – спектральные параметры в ассоциированной АКНС-схеме [26], которые характеризуют амплитуду (высоту) бризера и количество индивидуальных волн в бризере. ϕ_0 и θ_0 – начальные фазы, а пространственный и временной масштабы определяются амплитудой бризера, a , и коэффициентами уравнения мКдВ (1), определяемыми средой распространения волн (10):

$$L = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}, \quad T = \frac{6}{\alpha_1 a^3} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}. \quad (10)$$

«Групповая» скорость бризера (скорость распространения его как локализованного возмущения) в системе отсчета, движущейся с линейной скоростью c , имеет вид (11):

$$V_{gr} = \frac{2}{3} \alpha_1 H^2 (q^2 - 3p^2). \quad (11)$$

При больших значениях параметра p бризер состоит из множества отдельных волн и представляет собой солитон огибающей с амплитудой $4qa$, распространяющейся влево. При малых значениях p бризер состоит из пары импульсов противоположных полярностей. Его максимальное (и минимальное) значение изменяется во времени с абсолютным максимумом (или минимумом), равным $4qa$. Он распространяется медленнее линейных волн, если $p > \frac{q}{\sqrt{3}}$, и быстрее их, если $p < \frac{q}{\sqrt{3}}$. В предельном случае $p \rightarrow 0$ скорость бризера стремится к скорости солитона с амплитудой около $2qa$.

Спектральная амплитуда бризера (3) в фиксированной точке x , рассчитываемая с помощью преобразования Фурье (12):

$$S_j = \frac{2}{N} \left| \sum_{k=1}^N \eta(x_k, t=0) w_N^{(k-1)(j-1)} \right|, \quad w_N = \exp\left(\frac{-2\pi i}{N}\right) \quad (12)$$

имеет качественный вид, показанный на рис. 1. Спектр имеет единственный максимум величиной S_{max} , соответствующий частоте f_{max} , а также характеризуется шириной Δf , взятой, например, по уровню S_{max}/e .

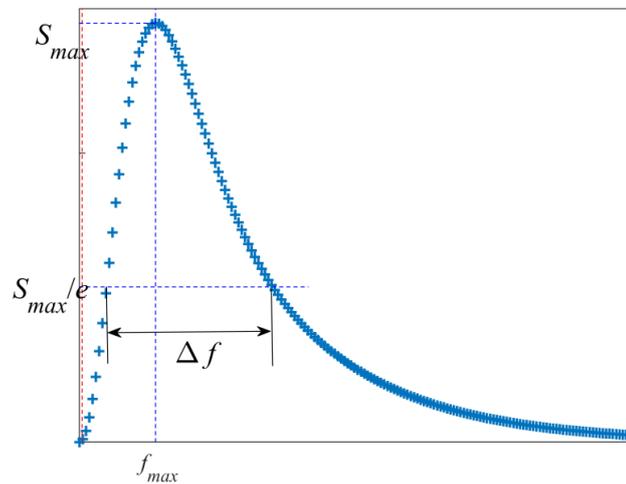


Рис. 1. Схематическое изображение амплитудного спектра (12) бризера (8) уравнения мКдВ (1)

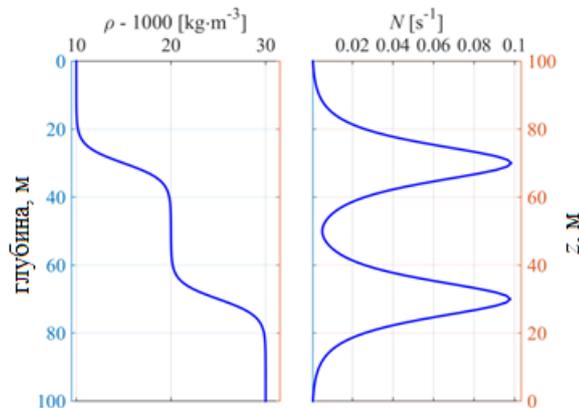


Рис. 2. Слева: модельный вертикальный профиль плотности в квази-трехслойной жидкости; справа: частота Брента-Вайсяля

Начальная задача для уравнения (1) с положительной кубической нелинейностью изучена в работе [27], где обсуждаются условия трансформации исходного волнового поля в солитоны или бризеры.

2. Фоновые условия (трехслойная стратификация).

Чтобы проиллюстрировать общую теорию, описанную выше, рассмотрим простой пример со слегка сглаженной трехслойной симметричной стратификацией. Для простоты примем в расчетах $u = 0$. Вертикальные профили плотности и частоты Брента – Вайсяля для этого случая показаны на рис. 2, вертикальная структура первой моды и поправка к ней – на рис. 3. Коэффициенты уравнения мКдВ (1) для такой стратификации принимают следующие значения: $c = 1.63$ м/с, $\beta = 786$ м³/с, $\alpha_1 = 0.0018$ 1/(м·с).

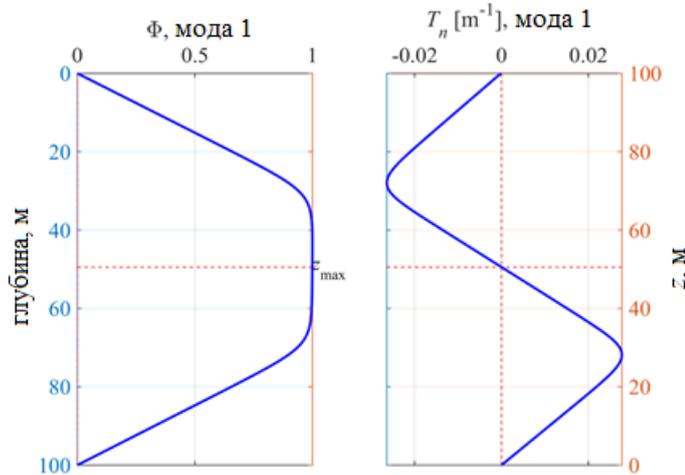


Рис. 3. Слева: типичная форма первой линейной моды для внутренних волн в симметричной трехслойной жидкости; справа: нелинейная поправка к ней

3. Уравнение мКдВ-Островского

Как уже упоминалось, эффект вращения обычно приводит к затуханию уединенной волны под действием излучения инерционно-гравитационных волн [2] и исследования [21, 29]. На практике временной масштаб этого затухания составляет несколько, как правило, один-два инерционных периода. Многие работы [19, 29-32] посвящены теоретическим моделям, которые включают вращательные эффекты на том же уровне малости, что и эффекты нелинейности и дисперсии. Расширением модели мКдВ (1), которая учитывает воздействие силы Кориолиса из-за вращения Земли, является уравнение мКдВ-Островского (13):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha_1 \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = \frac{f_{in}^2}{2c} \int \eta dx, \quad (13)$$

где f_{in} – параметр Кориолиса, зависящий от периода вращения Земли $T_e = 24$ ч и географической широты φ (14):

$$f_{in} = \frac{4\pi}{T_e} \sin \varphi. \quad (14)$$

При этом в рамках линейной теории точное дисперсионное соотношение для внутренних волн определяется из задачи на собственные значения (15):

$$\frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f_{in}^2} k^2 \Phi = 0 \quad (15)$$

с нулевыми граничными условиями на поверхности и дне моря. Здесь ω – частота волны, а k – горизонтальное волновое число. Мы рассматриваем только длинные волны. В этом пределе $\omega \ll N$, и уравнение (15) можно упростить следующим образом (16-17):

$$\frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2} \Phi = 0, \quad (16)$$

$$c^2 = \frac{\omega^2 - f_{in}^2}{k^2}. \quad (17)$$

Очевидно, что в этом пределе задача на собственные значения (16) не зависит от параметра Кориолиса и совпадает с задачей на собственные значения (2), (3). В рамках задачи (16) линейная фазовая скорость длинных волн c может быть рассчитана численно для произвольной стратификации. Однако дисперсионное соотношение будет более сложным при учете вращения Земли (18):

$$\omega^2 = c^2 k^2 + f_{in}^2. \quad (18)$$

Таким образом, для вращающейся и невращающейся сред задачи на собственные значения и сами значения идентичны, но дисперсионные соотношения различны. Разложение частоты ω , выраженной из (18), в ряд Тейлора при малых значениях f_{in} дает нам приближенное дисперсионное соотношение (19):

$$\omega = ck + \frac{f_{in}^2}{2ck}, \quad (19)$$

соответствующее уравнению (13) в пределе очень длинных линейных волн.

Рассмотрим теперь линеаризованную версию уравнения (13) в уравнении (20):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \right) = \frac{f_{in}^2}{2c} \xi. \quad (20)$$

Подставляя решение в виде монохроматической волны (21)

$$\eta = a \exp[i(\omega t - kx)], \quad (21)$$

в уравнение (20), получаем дисперсионное соотношение вида (22)

$$\omega = ck - \beta k^3 + \frac{f_{in}^2}{2ck}. \quad (22)$$

Хотя дополнительный член в правой части уравнения (13) представляет собой линейное длинноволновое возмущение уравнения мКдВ (1), его учет приводит к устранению спектрального промежутка, в которой существуют уединенные волны уравнения мКдВ. Действительно, линейное дисперсионное соотношение (22) уравнения мКдВ-Островского (13) приводит к следующим выражениям для фазовой скорости c_p и групповой скорости c_g как функциям волнового числа k (23):

$$c_p = \frac{\omega}{k} = c - \beta k^2 + \frac{f_{in}^2}{2ck^2}, \quad c_g = \frac{d\omega}{dk} = c - 3\beta k^2 - \frac{f_{in}^2}{2ck^2}. \quad (23)$$

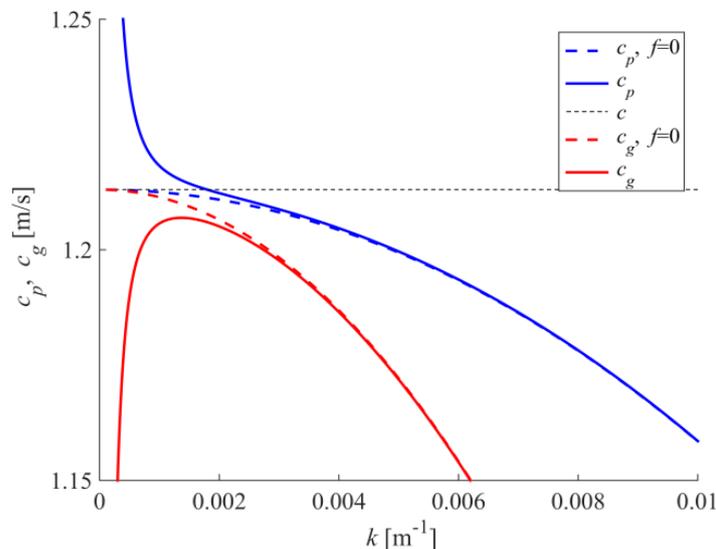


Рис. 4. Зависимости фазовой и групповой скорости от волнового числа в рамках моделей мКдВ ($f = 0$) и мКдВ-Островского

Для уравнения мКдВ (1) ($f_{in} = 0$) в спектре имеется промежуток $c_p > c$, где могут существовать солитоны. Но для уравнения мКдВ – Островского (13) такого промежутка нет, и поэтому солитоны не могут существовать, поскольку $\beta f_{in} > 0$ в контексте внутренних волн. Типичные дисперсионные кривые (23) уравнения мКдВ-Островского (13) показаны на рис. 4; они построены на основании значений параметров, полученных из примера симметричной трехслойной жидкости, рассмотренного выше. Эти кривые демонстрируют отсутствие спектральной щели и наличие экстремума кривой $c_g(k)$.

Уравнение мКдВ-Островского (13) решается численно с использованием псевдоспектрального (ПС) метода в периодической области. ПС-метод является альтернативой методам конечных разностей и конечных элементов и используется для решения многих нелинейных эволюционных уравнений и систем, в том числе уравнения Островского [21, 23].

Результаты расчетов

Значения коэффициентов уравнения (13) для проведения расчетов даны в п. 2. Для моделирования была выбрана широта 54° (что соответствует, например, Балтийскому и Охотскому морям), инерционный период при этом составляет 14,83 часа. Будет рассматриваться граничная задача, для этого уравнение (13) переписывается в эквивалентном виде (24):

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\alpha_1}{c^2} \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\beta}{c^4} \frac{\partial^3 \eta}{\partial s^3} = \frac{f_{in}^2}{2c} \int \eta ds, \quad (24)$$

в системе отсчета, движущейся с линейной скоростью длинных волн c (25):

$$s = \frac{x}{c} - t. \quad (25)$$

Длина трассы распространения волн выбирается равной 225 км, что соответствует по времени распространению в течение не менее трех инерционных периодов. В начальной точке трассы задается граничное условие $\eta(x=0, s) = \eta_0(s)$, соответствующее бризеру (8) уравнения мКдВ (1). Параметры начальных бризеров, для которых проводились расчеты, приведены в табл. 1. Форма бризеров показана на рис. 5, а их спектры Фурье – на рис. 6. Наибольшей шириной Δf обладает спектр для возмущения с параметрами «б» в табл. 1, наименьшей – для случая «а». На рис. 7 приведены спектры Фурье волны в начальной и в конечной точке трассы, а на рис. 8 – изменение спектров вдоль всей трассы. Видно, что при распространении бризера с наименьшей шириной спектра (случай «а») изменений в спектре не происходит, бризер распространяется, пульсируя без изменений огибающей (рис. 9 а). В случае «б» ширина спектра начального возмущения максимальна (так как само возмущение узкое, большой амплитуды), и здесь наблюдается наиболее сильная трансформация волнового поля (рис. 9 б) под действием вращения Земли. Происходит генерация низкочастотных волн, спектр сдвигается влево. Однако в этом случае на рис. 8 б хорошо видно явление квази-рекурренции (это явление раньше отмечалось в литературе при изучении распространения уединенных волн в рамках уравнения Островского).

По прошествии трех инерционных периодов в спектре появляется дополнительный пик (рис. 7 б) на низкой частоте, близкой к f_{in} . Похожая, но менее ярко выраженная ситуация наблюдается для случая «в» (рис. 7 в, рис. 8 в, и рис. 9 в). Для случая «г» ширина спектра практически не отличается от ситуации «в», но здесь весь спектр наиболее сдвинут влево, в область низких частот (рис. 6). Изменения происходят наиболее медленно, и практически незаметны на рис. 9 г, демонстрирующем трансформацию волнового поля вдоль трассы.

Таблица 1

Параметры начальных условий для численных экспериментов

Маркер численного эксперимента	q, p	a , м	Высота начальной волны, м	f_{max}/f_{in}
а	0.2, 0.9	6	8.7	94
б	0.9, 0.05	4	17	55
в	0.9, 0.99	2	10	43
г	0.9, 0.05	2	8.7	27

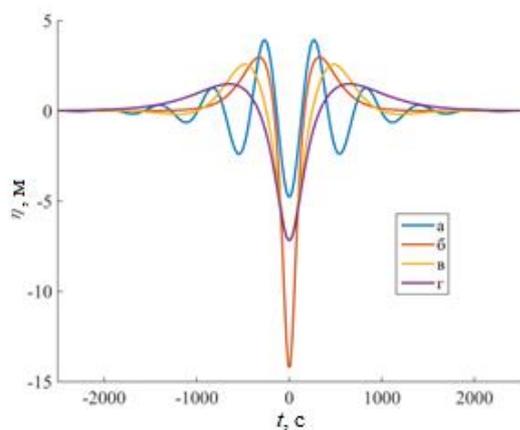


Рис. 5. Форма начальных условий-бризеров

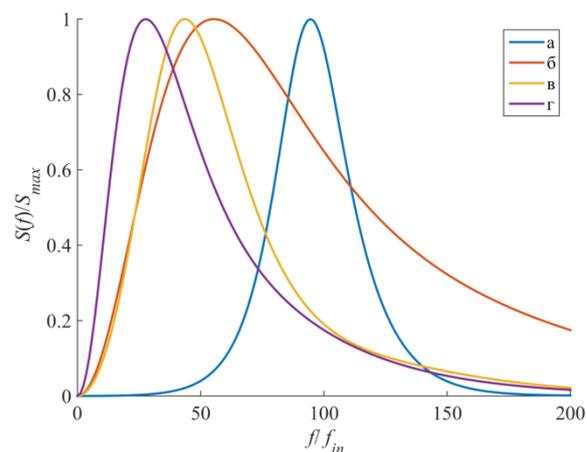
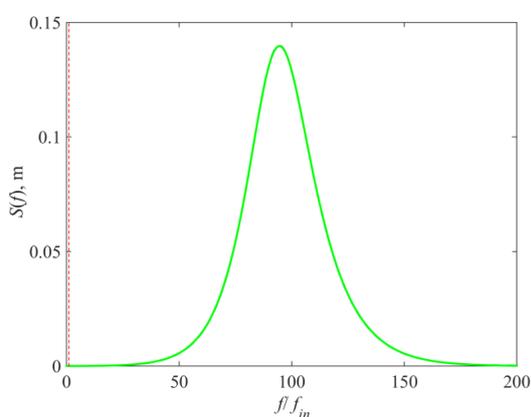
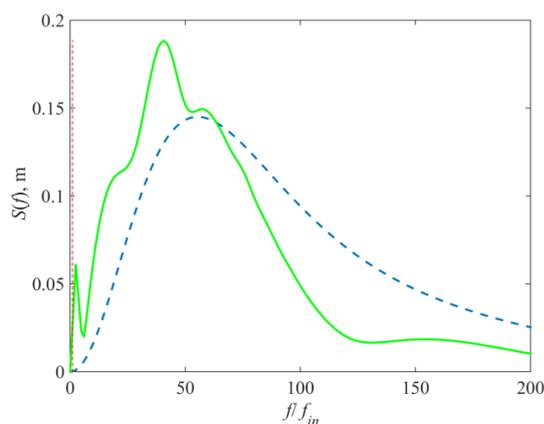


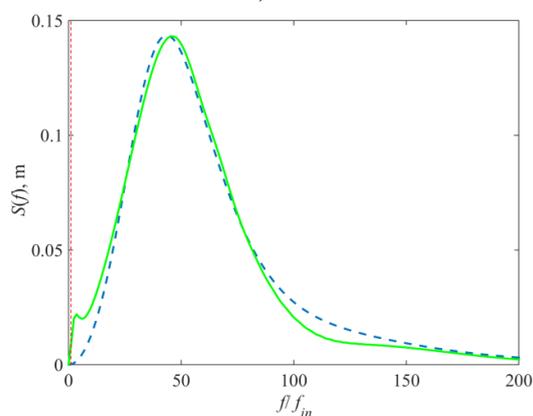
Рис. 6. Нормализованные спектры Фурье начальных бризеров



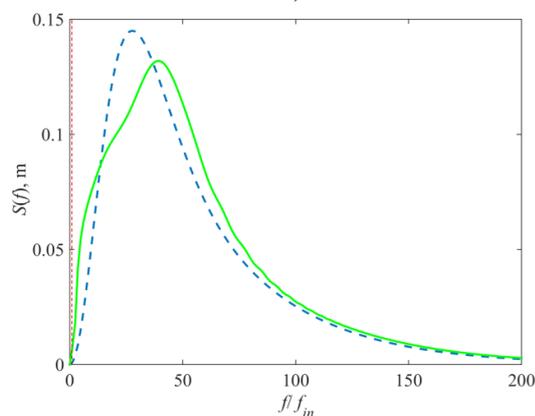
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Спектры Фурье волны в начальной (пунктир) и в конечной (сплошная линия) точке трассы: а – случай «а» (табл.1); б – случай «б» (табл. 1);

в – случай «в» (табл.1); **г** - случай «г» (табл. 1)

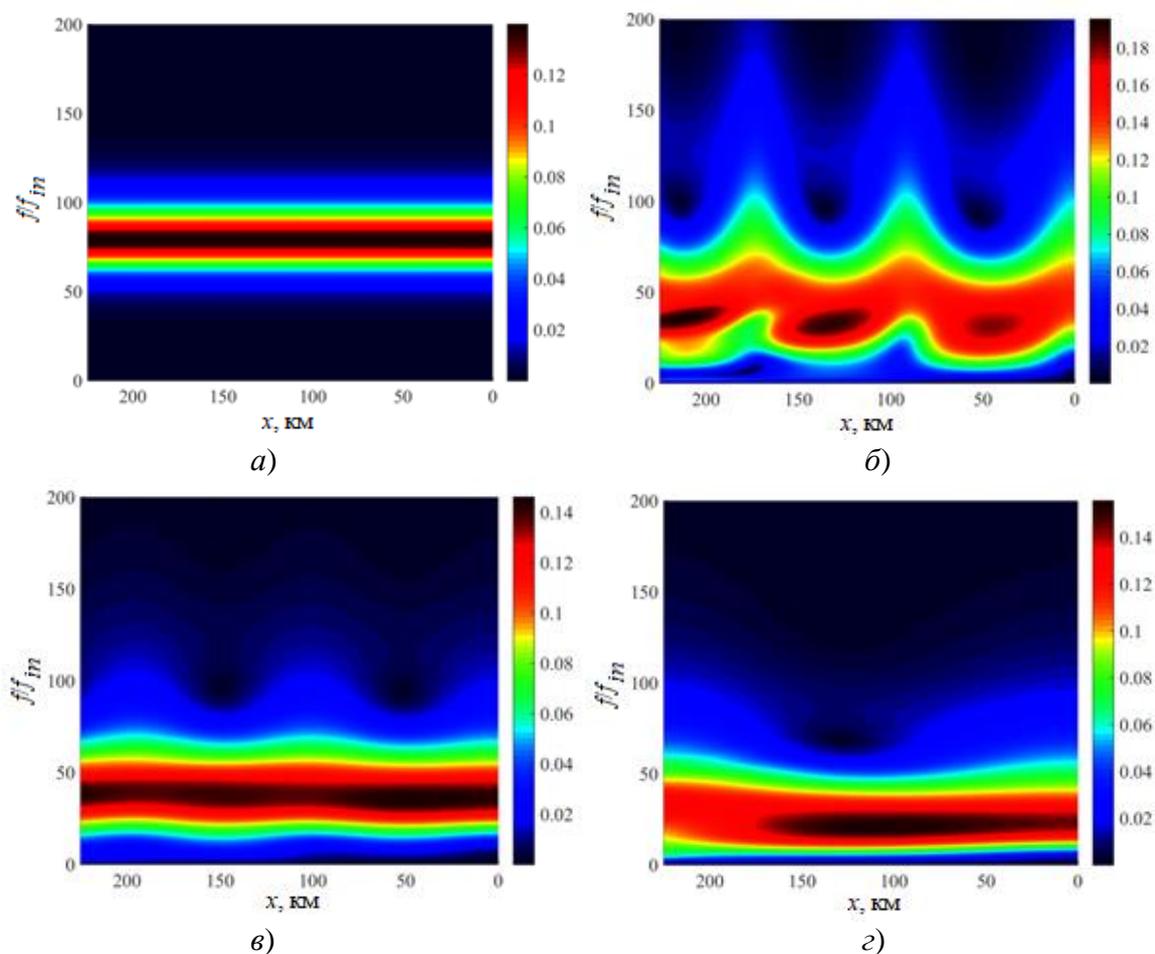


Рис. 8. Спектры Фурье волнового поля вдоль трассы распространения (цветом показана спектральная амплитуда в м): **а** – случай «а» (табл. 1); **б** – случай «б» (табл. 1); **в** – случай «в» (табл. 1); **г** - случай «г» (табл. 1)

Заключение

В статье представлены результаты моделирования трансформации бризеров внутренних волн в трехслойном симметричном океане с учетом вращения Земли в рамках уравнения мКдВ-Островского. В качестве примера мы оценили коэффициенты в этом уравнении для случая трехслойной стратификации. Продемонстрировано влияние фонового потока в среднем слое на форму солитонов и бризеров уравнения мКдВ. Рассмотрены дисперсионные характеристики уравнения мКдВ-Островского. Выбраны начальные условия в виде бризеров уравнения мКдВ с различными спектрами. Наиболее сильным изменениям подвержены начальные возмущения с широким спектром. В процессе трансформации происходит генерация низкочастотных волн с частотами, близкими к инерционной частоте, а также выделяются нелинейные волновые пакеты, связанные с экстремумами на кривой групповой скорости.

Этот общий результат был известен ранее для трансформации локализованных начальных возмущений в рамках уравнения Островского [21, 33], однако при использовании начальных условий в виде волновых пакетов, их выделение происходит быстрее, по крайней мере, в рамках рассмотренной нами трехслойной модели, и можно предполагать, что выделение из бризера близкого волнового пакета на фоне длинной волны является типичным исходом для ситуаций, близких к реальным океаническим условиям.

Уравнение мКдВ-Островского относится к классу универсальных математических моделей теории нелинейных волн, и изучение поведения их решений важно для различных приложений, включая океанологические (внутренние волны).

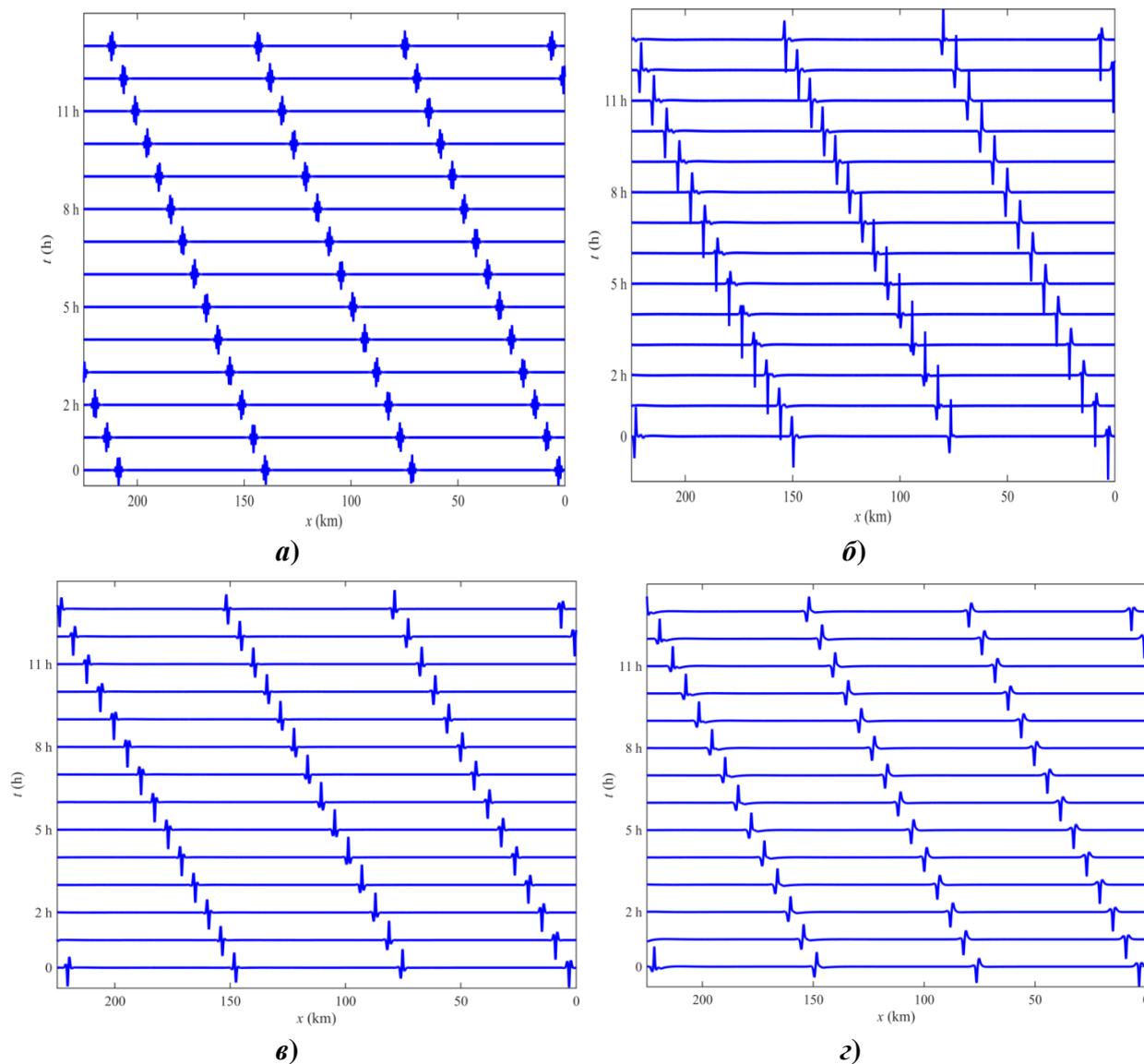


Рис. 9. Смещение [м] изопикн на горизонте максимума первой вертикальной линейной моды (вертикальный сдвиг между последовательными кривыми составляет 10 м): *a* – случай «а» (табл. 1); *б* – случай «б» (табл. 1); *в* – случай «в» (табл. 1); *г* – случай «г» (табл. 1)

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (Задания № 5.4568.2017/6.7 и № 5.1246.2017/4.6) и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5.

Библиографический список

1. **Ostrovsky, L.** Do internal solitons exist in the ocean? / L. Ostrovsky, Y. Stepanyants // *Reviews of Geophysics*. – 1989. – V. 27. – P. 293-310.
2. **Helfrich, K.R.** Long nonlinear internal waves / K.R. Helfrich, W.K. Melville // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2006. – V. 38. – P. 395-425.

3. **Pelinovsky, D.** Structural transformation of eigenvalues for a perturbed algebraic soliton potential / D. Pelinovsky, R. Grimshaw // *Phys. Lett. A.* – 1997. – V. 229. – P. 165-172.
4. **Clarke, S.** On the generation of solitons and breathers in the Modified Korteweg - de Vries Equation / S. Clarke, R. Grimshaw, P. Miller, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Chaos.* – 2000. – V. 10. – P. 383-392.
5. **Grimshaw, R.** Wave group dynamics in weakly nonlinear long-wave models / R. Grimshaw, D. Pelinovsky, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Physica D.* – 2001. – V. 159. – P. 35-57.
6. **Slyunyaev, A.V.** Dynamics of localized waves with large amplitude in a weakly dispersive medium with a quadratic and positive cubic nonlinearity / A.V. Slyunyaev // *JETP.* – 2001. – V. 92. – P. 529-534.
7. **Grimshaw, R.** Short-living large-amplitude pulses in the nonlinear long-wave models described by the modified Korteweg-de Vries equation / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, M. Ruderman, R. Erdely // *Stud. Appl. Math.* – 2005. – V. 114. – P. 189-210.
8. **Lamb, K.** Breather generation in the fully nonlinear models of a stratified fluid / K. Lamb, O. Polukhina, T. Talipova, E. Pelinovsky, W. Xiao, A. Kurkin // *Phys. Rev. E.* – 2007. – V. 75. – P. 046306.
9. **Rouvinskaya, E.** Transformation of internal breathers in the idealised shelf sea conditions / E. Rouvinskaya, T. Talipova, O. Kurkina, T. Soomere, D. Tyugin // *Continental Shelf Research.* – 2015. – V. 110. – P. 60-71.
10. **Lee, J.H.** Episodes of nonlinear internal waves in the northern East China Sea / J.H. Lee, I. Lozovatsky, S.T. Jang, C.J. Jang, C.S. Hong, H.J.S. Fernando // *Geophysical research letters.* – 2006. – V. 33(18). – DOI: 10.1029/2006GL027136.
11. **Shroyer, E.L.** Mode 2 waves on the continental shelf: Ephemeral components of the nonlinear internal wave field / E.L. Shroyer, J.N. Moum, J.D. Nash // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2010. – V. 115(C7). – DOI: 10.1029/2009JC005605.
12. **Osborne, A.R.** Internal waves and solitons / A.R. Osborne // *Internat. Geophys.* – 2010. – V. 97(C). – P. 597-622.
13. **Vlasenko, V.** Tidal energy conversion in a global hotspot: on the 3D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break / V. Vlasenko, N. Stashchuk, M. Inall, J. Hopkins // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2014. – V. 119(6). – P. 3249-3265.
14. **Vlasenko, V.** Internal tides near the Celtic Sea shelf break: A new look at a well-known problem / V. Vlasenko, N. Stashchuk // *Deep-Sea Research I.* – 2015. – V. 103. – P. 24-36.
15. **Grimshaw, R.** Damping of large-amplitude solitary waves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Wave Motion.* – 2003. – V. 3. – P. 351-364.
16. **Nakoulima, O.** Analytical and numerical studies of the variable-coefficient Gardner equation / O. Nakoulima, N. Zahibo, E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Slunyaev, A. Kurkin // *Appl. Math. Comput.* – 2004. – V. 152. – P. 449-471.
17. **Brovchenko, I.A.** Features of long internal solitary wave transformation in horizontally inhomogeneous basin / I.A. Brovchenko, V.S. Maderich, E.N. Pelinovsky, T.G. Talipova, E.V. Terletska // In: *Proceedings of XII All-Russian conference Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics. 2014, Saint Petersburg Center of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg.* – 2014. – P. 196-198.
18. **Терлецкая, Е.** Взаимодействие внутренних уединённых волн второй моды с подводной ступенькой / Е. Терлецкая // *Прикладная гидромеханика.* – 2014. – Т. 10. – № 83. – С. 1-6.
19. **Островский, Л.А.** Нелинейные внутренние волны во вращающемся океане / Л.А. Островский // *Океанология.* – 1978. – Т. 18. – № 2. – С. 181-191.
20. **Grimshaw, R.H.J.** Evolution equations for weakly nonlinear, long internal waves in a rotating fluid / **R.H.J. Grimshaw** // *Stud. Appl. Math.* – 1985. – V. 73. – P. 1-33.
21. **Grimshaw, R.** Long-time solutions of the Ostrovsky equation / R. Grimshaw, K. Helfrich // *Stud. Appl. Math.* – 2008. – V. 121. – P. 71-88.
22. **Helfrich, K.R.** Decay and return of internal solitary waves with rotation / K.R. Helfrich // *Physics of fluids.* – 2007. – V. 19(2). – P. 026601.
23. **Alias, A.** On strongly interacting internal waves in a rotating ocean and coupled Ostrovsky equations / A. Alias, R.H.J. Grimshaw, K.R. Khusnutdinova // *Chaos.* – 2013. – V. 23(2). – P. 023121.
24. **Ablowitz, M.J.** Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering / M.J. Ablowitz, P.A. Clarkson. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. – 516 p.
25. **Grimshaw, R.** The modified Korteweg-de Vries equation in the theory of the large-amplitude internal waves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Nonlinear Processes in Geophysics.* – 1997. – V. 4. – P. 237-250.

26. **Lamb, J.L.** Elements of soliton theory / J.L. Lamb. – New York: John Wiley & Sons, 1980. – 289 p.
27. **Clarke, S.** On the generation of solitons and breathers in the modified Korteweg-de Vries equation / S. Clarke, R. Grimshaw, P. Miller, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Chaos*. – 2000. – V. 10. – №. 2. – P. 383-392.
28. **Sánchez-Garrido, J.C.** Long-term evolution of strongly nonlinear internal solitary waves in a rotating channel / J.C. Sánchez-Garrido, V. Vlasenko // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2009. – V. 16. – P. 587-598.
29. **Holloway, P.E.** A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West shelf / P.E. Holloway, E.N. Pelinovsky, T.G. Talipova, B. Barnes // *J. Phys. Oceanogr.* – 1997. – V. 27. – № 6. – P. 871-896.
30. **Holloway, P.** A Generalized Korteweg-de Vries model of internal tide transformation in the coastal zone / P. Holloway, E. Pelinovsky, T. Talipova // *J. Geophys. Res.* – 1999. – V. 104. – №. C8. – P. 18333-18350.
31. **Holloway, P.** Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves / P. Holloway, E. Pelinovsky, T. Talipova // In: *Environmental Stratified Flows*, edited by: Grimshaw R.H.J., Kluwer, Boston, 2001. – P. 29-60.
32. **Talipova, T.** Cubic nonlinearity effects in the propagation of intense internal waves / T. Talipova, E. Pelinovsky, K. Lamb, R. Grimshaw, P. Holloway // *Doklady Earth Sciences*. – 1999. – V. 365. – P. 241-244.
33. **Grimshaw, R.** The effect of rotation on internal solitary waves / R. Grimshaw, K. Helfrich // *The IMA Journal of Applied Mathematics*. – 2012. – V. 77(3). – P. 326-339.

*Дата поступления
в редакцию: 31.07.2019*

P.V. Lobovikov, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin

TRANSFORMATION OF INTERNAL BREATHERS IN A THREE-LAYERED OCEAN WITH CONSIDERING OF EARTH ROTATION

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

Purpose: In the paper the problem is solved of the influence of the rotation of the basin on the long-term evolution of internal breathers with different spectral width.

Design/methodology/approach: The simulations are carried out within the mKdV-Ostrovsky equation for internal waves, which is solved numerically with the use of pseudospectral algorithm.

Results: It is shown that a stronger transformation of the wave field under the influence of Earth's rotation is observed for breathers with a wide spectrum; eventually the spectrum is shifted to the low-frequency region. The phenomenon of quasi-recurrence of breathers is also noted, previously known for solitary internal waves in a rotating fluid.

Area of applicability: The obtained results may be useful for the detailed description of baroclinic wavefields in the ocean and energy cascades within their spectra, as well as for the estimations of dynamical effects from internal waves.

Keywords: nonlinear wave packet, internal waves, stratification, inhomogeneous medium, modified Korteweg-de Vries equation.

УДК 004.045

С.В. Логанов

К ВОПРОСУ О МНОГООБРАЗИИ ФОРМ НАСЛЕДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируются возможные формы наследования и правомерность обоснования их применения в статически типизированных объектно-ориентированных языках. Приводится концепция целей построения иерархий классов наследования. Установлено, что правомерное использование наследования заключается в построении правильных абстракций для обобщения или специализации некоторого поведения, востребованного соответствующими клиентами. Применение наследования просто для повторного использования приводит к построению противоречивых иерархий, которые затруднены или невозможны для повторного использования. Предложена классификация форм наследования, обеспечивающих его адекватное применение в статически типизированных языках Java и C#.

Ключевые слова: объектно-ориентированное программирование, наследование, иерархия классов, повторное использование, принцип LSP, обобщение/специализация.

Описание наследования в объектно-ориентированном программировании в современных авторитетных работах [1,2] включает детализацию всех возможных форм его применения. Приводятся следующие формы применения наследования [1]:

- порождение подклассов для специализации;
- порождение подкласса для спецификации;
- порождение подкласса для расширения;
- порождение подкласса с целью конструирования;
- порождение подкласса для обобщения;
- порождение подкласса для ограничения;
- порождение подкласса для варьирования;
- порождение подкласса для комбинирования.

При порождении подклассов для специализации имеет значение то, что порожденный класс является специализированной версией родительского класса и «удовлетворяет спецификациям родителя во всех существенных моментах» [1]. Таким образом, для этой формы полностью выполняется принцип подстановки Liskov (LSP) и, по мнению автора, «вместе со следующей категорией (наследование для спецификации) специализация является наиболее идеальной формой наследования, к которой должна стремиться хорошая программа» [1]. При порождении подкласса для спецификации родительский класс описывает поведение, отложенное для реализации дочерним классом. Родительский класс для этой формы является абстрактным или даже интерфейсом, а дочерний реализует заданное поведение и, следовательно, также должен удовлетворять принципу LSP. Порождение подкласса для расширения характеризуется тем, что дочерний класс добавляет новые функциональные возможности к родительскому классу, но не меняет наследуемое поведение. В данном случае у дочернего класса появляются собственные клиенты, которые пользуются его расширенным поведением, и он также удовлетворяет принципу LSP, поскольку не изменяет наследуемое поведение.

Порождение подкласса с целью конструирования предполагает, что дочерний класс использует методы, предоставляемые родительским классом, но не является подтипом родительского класса, т.е., реализация методов нарушает принцип LSP. В данном случае даже сам автор делает оговорку, что «дочерний класс не является более специализированной формой родительского класса, так как у нас и в мыслях не будет подставлять представителей дочернего класса туда, где используются представители родительского класса» [1] и что «в языках со

статическими типами данных косо смотрят на порождение подклассов для конструирования» [1]. Такое отступление говорит о том, что обеспечение отсутствия подстановки лишь дженгельменское соглашение, следование которому не в силах обеспечить ни один объектно-ориентированный язык, если в нем отсутствует закрытое наследование. Применение закрытого наследования решает данную проблему, но такое наследование более логично отнести к специализированному виду клиентского отношения, при котором времена жизни обоих объектов данных классов совпадают и не считается классическим наследованием.

При порождении подкласса для обобщения подкласс расширяет родительский класс для создания объекта более общего типа. «Например, в систему графического отображения, в которой был определен класс окон Window для черно-белого фона необходимо добавить тип цветных графических окон ColoredWindow. Цвет фона будет отличаться от белого за счет добавления нового поля, содержащего цвет. Необходимо также переопределить наследуемую процедуру изображения окна, в которой происходит фоновая заливка» [1]. Тем не менее, в данном случае класс ColoredWindow должен следовать принципу LSP. В противном случае, если, например, ColoredWindow забудет восстановить цвет фоновой кисти, то все последующие объекты класса Window изменят свой цвет. Такое новое поведение явно будет считаться ошибочным. Поэтому такое поведение подкласса следует считать специализацией, поскольку «нарисовать цветное окно» является специальным случаем просто «нарисовать окно». Кроме этого, признается: «Как правило, следует избегать порождения подкласса для обобщения, пользуясь перевернутой иерархией типов и порождением для специализации. Однако это не всегда возможно» [1]. Единственной причиной является отсутствие исходного кода классов, а, следовательно, расположение этого кода в другом компоненте. Наследование класса из другого компонента приводит к сильной зависимости этих компонентов. А если компоненты различны, то и причины изменений этих компонентов различны. Лучшим решением в данном случае является изоляция этих компонентов с помощью принципа инверсии зависимостей (DIP) [3]. Таким образом, нельзя считать хорошей практикой наследование класса из другого компонента.

Порождение подкласса для ограничения происходит, когда возможности подкласса более ограничены, чем в родительском классе. «Так же, как и при обобщении, порождение для ограничения чаще всего возникает, когда программист строит класс на основе существующей иерархии, которая не должна или не может быть изменена» [1]. Тогда возникает закономерный вопрос: зачем вообще нарушать стройность существующей иерархии добавлением такого нового класса?

Попадание экземпляров такого нового класса в качестве абстракции, существующей иерархии, для использования соответствующим клиентом приведет к появлению неожиданных сюрпризов в его поведении. Помимо этого, и сам автор признает, что данную форму наследования следует по возможности избегать. Такая возможность всегда существует в виде использования клиентского отношения и отсутствия необходимости наличия отношения заменяемости. «Порождение подкласса для варьирования применяется, когда два класса имеют сходную реализацию, но не имеют никакой видимой иерархической связи между абстрактными понятиями, ими представляемыми. Например, программный код для управления мышкой может быть почти идентичным тому, что требуется для управления графическим планшетом. Теоретически, однако, нет никаких причин, для того чтобы класс Mouse, управляющий манипулятором «мышь», был подклассом класса Tablet, контролирующего графический планшет, или наоборот. В данном случае в качестве родителя произвольно выбирается один из них, при этом другой наследует общую программную часть кода и переопределяет код, зависящий от устройства». Данная проблема является типовой проблемой шаблона GRASP «Защита от изменений» [4] и решается с помощью введения необходимого интерфейса, обеспечивающего изоляцию клиента от конкретных деталей реализации. Применение наследования в данной ситуации обеспечивает слишком сильную взаимозависимость данных классов, имеющую соот-

ветствующие негативные последствия. Появление необходимости управления новым устройством, вероятнее всего, приведет к пересмотру данного решения в целом. Таким образом, не следует использовать наследование просто на том основании, что некоторые классы имеют похожий код.

Порождение подкласса для комбинирования применяется, когда дочерний класс наследует черты более чем одного родительского класса. Это множественное наследование, которое объединяет линии поведения родительских классов и тем самым нарушает принцип единственности обязанности (SRP), поскольку обязанности родительских классов принципиально различны, иначе они не были бы различными классами. Поэтому множественное наследование было исключено из языков, которые считаются типовыми объектно-ориентированными языками и заменено реализацией интерфейсов, которая позволяет объекту выступить в роли другого объекта, не изменяя своей первоначальной сущности. Однако и в этом случае дочерний класс должен соблюдать принцип LSP, чтобы не преподносить сюрпризов клиентам родительских классов. В [2] представлены те же самые формы наследования с той лишь разницей, что опущено наследование для варьирования, а наследование для спецификации названо наследованием для реализации. Однако, при описании наследования для конструирования приводится следующий пример. «Путем наследования класса «Экономичное Окно» конструируется класс Самолет, в котором родительский метод изменить положение () превращается в метод летать (), а от методов свернуть () и развернуть () вообще отказываются». Такое использование наследования вообще нельзя признать более или менее разумным. Это аналогично тому чтобы в реальной жизни пытаться сконструировать мобильный телефон на основе молотка. По словам автора, «конечно, бывают ситуации, когда наследование применимо, даже если тест «является» не пройден» [2]. В [5] однозначно показывается, что не следует использовать наследование, если тест «is-a» не пройден. Желание использовать наследование как механизм повторного использования как можно чаще приводит к тому, что появились такие экзотические формы наследования как для обобщения, ограничения, конструирования и варьирования, которые в объектно-ориентированных языках со статической типизацией приносят лишь проблемы при сопровождении, поддержке и модернизации кода.

Более подробная классификация форм наследования (причем правильных форм наследования, соответствующих отношению «is-a») приведена в [5], где различаются следующие три общие категории (рис. 1):

- наследование модели, отражающее отношения «is-a» между абстракциями, характерными для модели предметной области;
- программное наследование, выражающее отношения между объектами программной системы, не имеющих очевидных двойников во внешней модели;
- наследование вариаций – специальный случай, относящийся как к моделям, так и программному наследованию, служащий для описания класса через его отличия от других классов.

При моделировании внешней системы часто возникает ситуация, когда категория внешних объектов естественно разделяется на непересекающиеся подкатегории, которые являются подтипами этой общей категории (наследование подтипов). При этом утверждается, что родительский класс является абстрактным, «поскольку он описывает не полностью специфицированное множество объектов», т.е., является обобщением, используемым при классификации объектов. В то же время наследник этого родителя может быть, как эффективным, так и отложенным (абстрактным).

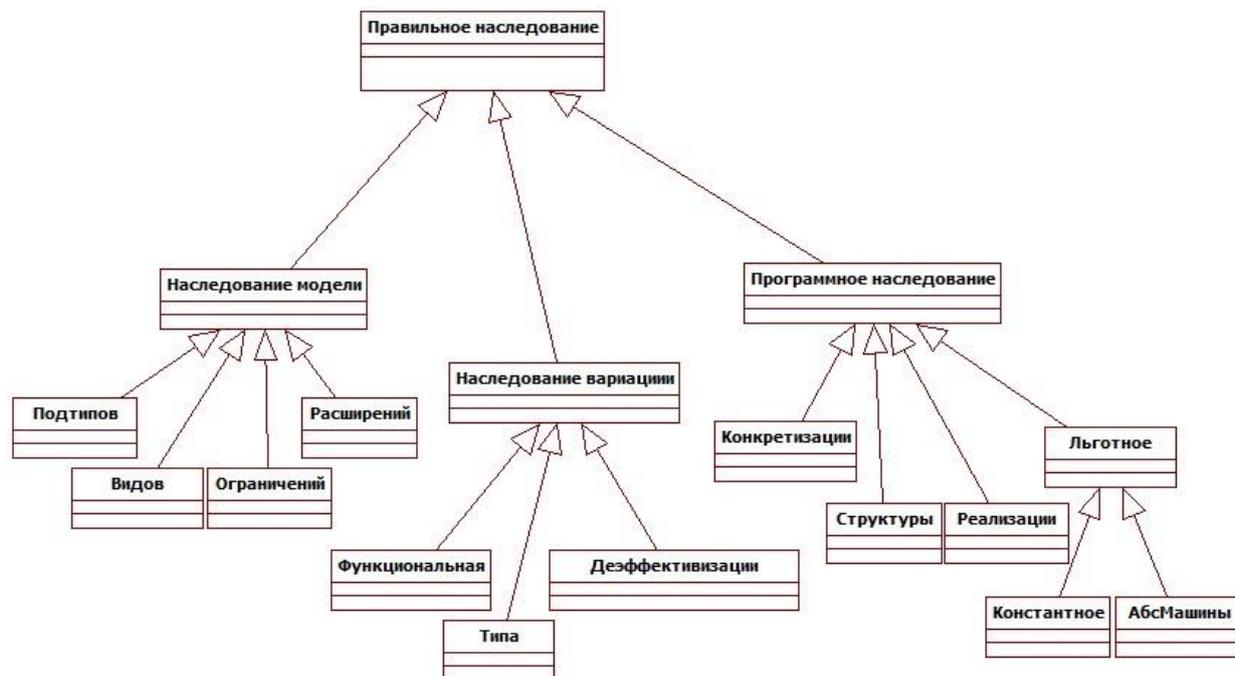


Рис. 1. Классификация форм наследования Б. Мейера

«Наследование подтипов является формой наследования ближайшей к иерархической таксономии в ботанике, зоологии и других естественных науках» [5]. Например, млекопитающие являются наследниками позвоночных и т.д. При этом следует оговориться, что цели моделирования в программной системе должны соответствовать целям классификации в естественных науках иначе ее использование теряет смысл. Также примером данного наследования может служить определение банковского счета, который может быть текущим счетом, сберегательным счетом и т.д. Наследование с ограничением применимо, если экземпляры класса потомка являются экземплярами родительского класса, удовлетворяющими некоторому дополнительному ограничению, выраженному, как часть инварианта потомка, не включенного в инвариант родителя. В качестве типичного примера наследования с ограничением приводится квадрат как наследник прямоугольника. Ограничением является утверждение, что сторона 1 = сторона 2, включаемое в инвариант класса квадрат. Однако, математика – это очень абстрактная область знаний, утверждающая лишь, то что в отдельных случаях у прямоугольников стороны могут оказаться равны. А по словам автора, «другим типичным примером является таксономия, в котором простое булево свойство, такое как пол персоны (или свойство с несколькими фиксированными значениями, такое как цвет светофора), используется как критерий наследования, хотя нет важных вариантов компонентов, зависящих от свойства» [5]. При моделировании объектов реального мира стоит лишь уменьшить погрешность измерений и квадрат тут же перестает быть квадратом. Кроме этого, если, например, потребуется масштабирование моделируемых объектов с различными коэффициентами масштаба по осям, то едва ли пользователи захотят сохранения этого свойства. Таким образом, в каждом индивидуальном случае решение будет достаточно специфическим и опираться на потребности конкретных пользователей. Однако примером данной формы наследования может служить ограниченный банковский счет, являющийся потомком банковского счета, с которого запрещается снятие в день суммы, превышающей заданный порог. При этом клиенты родительского банковского счета должны быть готовы к тому, что со счета может сниматься запрошенная сумма не полностью. Тем не менее, данный пример, как и пример с моделированием геометрии объектов, являются частными случаями наследования подтипов.

Наследование с расширением применимо, когда потомок вводит компоненты, не представленные в родителе и неприменимые к его прямым экземплярам. При этом утверждается,

что класс родителя должен быть эффективным. Рассмотрим пример с абстрактным классом `Shape`, который декларирует операции перемещения и масштабирования. От данного класса можно унаследовать класс `Rectangle`, имеющий диагональ и способный вычислять ее длину. Данный пример является примером наследования с расширением, в котором родитель является абстрактным. Таким образом, опровергается то, что родитель должен быть всегда эффективным. Далее описывается следующий парадокс наследования. «Присутствие обоих вариантов – расширения и сужения (ограничения) – является одним из парадоксов наследования. Расширение применяется к компонентам, в то время как ограничение (понимаемое как специализация) применяется к экземплярам. Проблема в том, что добавляемые компоненты обычно включают атрибуты. Так что при наивной интерпретации типа (заданного классом) как множества его экземпляров отношение между классом и наследником (рассматриваемых как множества) «быть подмножеством» становится полностью ошибочным» [5]. Далее рассматривается пример, в котором экземпляры родительского класса образуют одноэлементное множество, записываемое как $\langle n \rangle$, где n целое. А экземпляры дочерних классов – как пару, содержащую целое и вещественное, записываемое как $\langle n, f \rangle$. На этом основании утверждается, что множество пар дочерних экземпляров не является подмножеством одноэлементного множества родительских экземпляров. А верно обратное: отношение «быть подмножеством» имеет место в обратном направлении. Однако это – чисто математическая трактовка данных множеств. Проблема заключается в том, данный пример рассматривается в отсутствие клиента родительского класса, для которого множество парных экземпляров может быть представлено как множество одноэлементных экземпляров. При этом экземпляры как одноэлементного множества, так и двухэлементного множества различны для клиента, а, следовательно, множество дочерних экземпляров является подмножеством родительского типа. Таким образом, не существует никакого парадокса наследования. Далее и сам автор решает данную проблему, применив для этого другие математические абстракции. Тем не менее, наследование с расширением также следует отнести к частному случаю наследования подтипов.

Наследование вида используется там, где единый критерий классификации кажется ограничительным. В этом случае предлагается использовать «приемы множественного и особенно дублирующего наследования». Далее приводится класс `EMPLOYEE` в системе управления персоналом, для которого существуют два различных критерия классификации служащих по типу контракта (временные или постоянные работники) и по типу выполняемой работы (инженерная, административная, управленческая). Поэтому для соблюдения «идей использования наследования для классификации, следует ввести промежуточный уровень (два вида служащих), описывающий конкурирующие критерии классификации» [5]. «При наследовании подтипов предполагается, что экземпляры наследников принадлежат непересекающимся подмножествам множества, заданного родителем. При наследовании видов: различные наследники некоторого класса представляют не пересекающиеся подмножества его экземпляров, а различные способы классификации экземпляров родителя» [5]. Наличие двух критериев классификации в наследовании видов говорит о том, что абстракция `EMPLOYEE` используется двумя различными способами, а, следовательно, содержит две линии поведения (обязанности), что противоречит принципу единственности ответственности со всеми вытекающими негативными последствиями. Поэтому рекомендовать данную форму наследования как хорошую практику программирования вряд ли целесообразно. Кроме того, сам автор не рекомендует применять данную форму наследования, особенно новичкам. «Прежде всего, должно быть ясно, что, подобно дублируемому наследованию, наследование видов не является механизмом для новичков. Правило осмотрительности, введенное для дублируемого наследования, справедливо и здесь: если ваш опыт разработки ОО-проектов измеряется несколькими месяцами, избегайте наследования видов» [5].

Таким образом, если рассмотреть все достоинства и недостатки данного наследования, а также возможности альтернативных решений, вероятнее всего, даже опытный разработчик откажется от наследования видов. Соответственно, акцентирование внимания на решении

конкретных задач разработчика намного важнее, чем построение стройной иерархии ради самой иерархии и принесет более весомую выгоду особенно для долговременной эксплуатации и поддержке программного кода. Наследование вариаций применяется, если класс потомок переопределяет некоторые компоненты класса родителя. «Класс потомок при этом не должен вводить никаких новых компонентов за исключением тех, что непосредственно необходимы переопределяемым компонентам, что обеспечивает отличие данной формы наследования от наследования с расширением» [5]. Наследование вариаций функций переопределяет только тела компонентов, а при наследовании вариаций типа все переопределения являются переопределениями сигнатур. Наследование вариаций применимо, когда существующий класс родителя задает некоторую абстракцию, полезную саму по себе, но обнаруживается необходимость представления подобной, хотя и не идентичной, абстракции, имеющей те же компоненты, но с отличиями в сигнатуре или реализации.

При этом автор настаивает, чтобы оба класса были либо эффективными, либо отложенными. «Такое наследование не рассматривает эффективизацию компонентов, когда речь идет о переходе от абстрактной формы к конкретной» [5]. Эффективизацию компонентов автор отнес чисто к программной форме наследования – к наследованию с овеществлением. Однако и при моделировании реальных объектов такая эффективизация может понадобиться. Это возможно, например, при моделировании транспортных средств, имеющих функцию перемещения, которая, вероятнее всего, будет отложенной, поскольку наземные, воздушные и водные транспортные средства перемещаются совершенно по-разному. Таким образом, наличие отложенного метода перемещения и отсутствии необходимости более детальной классификации транспортных средств приводит к тому, что класс транспортных средств будет абстрактным (отложенным), а его потомки – эффективными. Наследование вариаций функции также следует отнести к наследованию подтипов, т.е., когда имеется некоторое множество объектов, обладающих более специфическим поведением. А наследование вариаций типа следует отнести к наследованию с расширением, так как новые компоненты с измененной сигнатурой у родительского класса недоступны, и у дочернего класса должны быть собственные клиенты, которые имеют доступ к этим компонентам, иначе такое наследование было бы бессмысленным. К данной группе наследования принадлежит и категория дезэффективизации, в которой некоторые эффективные компоненты становятся отложенными. По утверждению автора, такая форма наследования может быть законной в двух случаях.

В первом случае при множественном наследовании сливаются компоненты, наследуемые от двух различных родителей. «Если один из них отложенный, а другой эффективный, то слияние произойдет автоматически при условии совпадения имен (возможно после переименования), эффективная версия будет определять реализацию. Но если обе версии эффективны, следует провести потерю эффективизации одной версии, отдавая предпочтение другой версии» [5]. Однако в современных статически типизированных языках автоматическое слияние произойдет, если отложенный класс является интерфейсом и соответственно наследование в данном случае лучше назвать эффективизацией интерфейсов. Если же оба родительских класса будут эффективными, такое наследование становится принципиально невозможным.

Во втором случае: «Хотя абстракция соответствует потребностям, но повторно используемый класс слишком конкретен для наших целей. Отмена эффективизации позволит удалить нежеланную реализацию» [5]. Даже сам автор оговаривает, что перед использованием этого решения следует рассмотреть альтернативу – реорганизовать иерархию наследования, сделав более конкретный класс наследником нового отложенного класса. «По понятным причинам, это не всегда возможно, например, из-за отсутствия доступа к исходному коду» [5]. Но если родительский класс принадлежит другому компоненту, и, тем более, если у него отсутствует исходный код, использование такой сильной связи как наследование приведет лишь к дополнительным проблемам сопровождения и поддержки кода. Взаимодействие различных физических компонентов лучше разделить с помощью принципа DIP, обеспечивающего их взаимо-

заменяемость. Кроме этого, даже автор настороженно относится к данной форме наследования: «Отмена эффективизации не является общим приемом и не должна им быть. Основная идея этого способа противоречит общему направлению, так как обычно ожидается конкретизация потомка своего более абстрактного родителя» [5].

Наследование с овеществлением (конкретизации) применимо, если родительский класс задает структуру данных общего вида, а дочерний – представляет ее частичную или полную реализацию. Родительский класс в данной форме наследования является отложенным, а класс потомок может быть, как эффективным, так и отложенным. Приведенный ранее пример с транспортными средствами также применим и для данной формы наследования. Кроме этого, при необходимости дальнейшей специализации наземные, воздушные и водные транспортные средства уже могут быть также отложенными. Данную форму наследования также следует отнести к наследованию подтипов, так как принципиальной разницы для построения иерархии программных объектов или объектов предметной области не существует.

Структурное наследование применяется, когда родительский отложенный класс представляет общее структурное свойство, а потомок, который может быть отложенным или эффективным, представляет некоторый тип объектов, обладающих этим свойством. «Например, родительский класс может быть классом COMPARABLE, представляющим объекты с заданным отношением полного порядка. Класс, которому необходимо отношение порядка, становится наследником класса COMPARABLE» [5]. Разница между овеществлением и структурным наследованием заключается в том, что при овеществлении дочерний класс представляет собой то же понятие, что и родительский, отличаясь большей степенью реализации. А при структурном наследовании дочерний класс представляет собственную абстракцию, для которой родительский задает лишь один из аспектов, реализация которого позволяет ему, например, поучаствовать в алгоритмах упорядочивания, выполняемых некоторыми классами. Такая ситуация может существовать не только между программными объектами, но и между объектами реальной предметной области. Например, служащий может оказаться в роли члена профсоюза или в роли спортсмена, не переставая при этом быть собственно служащим в возможной иерархии наследования служащих. Таким образом, данная форма наследования в статически типизированных языках относится к наследованию интерфейса.

Наследованием реализации является «брак по расчету», основанный на множественном наследовании, где один из родителей обеспечивает спецификацию, а другой – предоставляет реализацию. В качестве примера приводится стек, основанный на массиве ARRAYED_STACK. При этом наследование от ARRAY выполняется закрытым. Это вынуждает клиентов класса ARRAYED_STACK использовать соответствующие экземпляры только через компоненты стека. Для статически типизируемых языков закрытое наследование в принципе невозможно, а, следовательно, невозможно гарантировать неиспользуемость стека как массива. Преимущество по сравнению с клиентским отношением, которое дает данная форма наследования – это возможность использовать функции родительского класса без использования имени переменной. Это является сомнительным преимуществом, если принять во внимание, что за его использование отрезается возможность расширения гибкости клиентского класса за счет применения принципа открытости/закрытости (ОСР). Это и было продемонстрировано автором приведением примера с техникой описателей (handle). Наследование возможностей (льготное) является схемой, в которой родитель представляет коллекцию полезных компонентов, предназначенных для использования его потомками. Оно применяется, если родительский класс существует единственно в целях обеспечения множества логически связанных компонентов, дающих преимущества его потомкам.

Первой формой наследования возможностей является наследование констант, при котором компоненты родительского класса все являются константами или однократными функциями, описывающими разделяемые объекты. В качестве примера приводится класс ASCII, который является хранилищем множества константных атрибутов, описывающих свойства

множества ASCII и унаследованный от него класс лексического анализатора TOKENIZER, ответственный за идентификацию лексем входного текста. «Лексемами текста, написанного на некотором языке программирования, являются целые, идентификаторы, символы и так далее и TOKENIZER, необходим доступ к кодам символов для их классификации на цифры, буквы и т. д. Такой класс воспользуется льготами и наследует эти коды от ASCII» [5]. Однако в данном случае класс ASCII не реализует правильную абстракцию и не имеет функций по определению принадлежности символа к цифрам, буквам, управляющим символам и т.д. Приведение класса ASCII к такой абстракции и использование клиентского отношения позволяет развивать гибкость новой абстракции с помощью принципа OCP и добавления новых функций, непосредственно полезных лексическому анализатору. Кроме этого, при переходе на юникод-ные символы использование наследования констант приведет к необходимости полного переписывания кода класса TOKENIZER и не способствует повторному использованию кода.

Второй формой наследования возможностей является наследование абстрактной машины, в котором компоненты родительского класса являются подпрограммами, рассматриваемыми в качестве операций абстрактной машины. Иными словами, родительский класс представляет абстракцию выполнения некоторого алгоритма над объектами дочернего класса, которые реализуют соответствующие абстрактные функции. Преимуществом данной формы является возможность переименования функций родителя, которое позволяет дать им более благозвучное название, соответствующее назначению потомка. Поскольку переименование функций родителя в языках Java и C# невозможно, теряется и данное преимущество. Поэтому в данном случае более уместно определение контракта (интерфейса) для соответствующих абстрактных функций, реализацию которого должны обеспечить объекты, участвующие в выполнении необходимого алгоритма. Построение объектно-ориентированной программной системы – это моделирование как самой предметной области, так и программных задач, возникающих по ее визуальному представлению, сохранению и т.п. Модели для решения задач предметной области концептуально не отличаются от моделей решения программных задач, но они должны быть различны, так как различны сами задачи и тенденции их временного развития. Невозможно построить универсальную модель, пригодную на все случаи жизни, поэтому человечество давно научилось пользоваться принципом «разделяй и властвуй» с помощью построения упрощенных различных моделей для решения различных задач.

Таким образом, для таких статически типизированных языков, как Java и C#, правомерное использование наследования заключается в безусловном соблюдении правила «is-a» и применении следующих форм наследования (рис. 2).

Наследование подтипа подразделяется на наследование вариаций, ограничений и расширений. К наследованию вариаций относятся те случаи, когда потомки родительского класса переопределяют его поведение. При этом класс родитель реализует некоторую абстракцию и существует клиент, который использует поведение данной абстракции. Количество уровней потомков и отложенность родительской абстракции зависят от степени ее обобщения. К данной форме наследования относятся наследование транспортных средств, реализующих функции перемещения или фигур, реализующих функции рисования.



Рис. 2. Правомерные формы наследования для статически типизированных языков

При наследовании ограничений потомки класса родителя вводят дополнительные ограничения при реализации функций родителя. При этом потомки не могут и не должны скрывать сами эти функции, но результат их работы может быть частично положительным или отрицательным. К такому поведению должен быть готов клиент базового класса и корректно обрабатывать соответствующие ситуации, т.е., обеспечивается принцип LSP. К данной форме наследования относится, например, потомок банковского счета с ограничением снятия дневной суммы, который при выполнении операции снятия может снять как всю запрошенную сумму, так и часть этой суммы вплоть до нулевой. В крайнем случае, при наследовании ограничений класс потомок может генерировать исключение, которое должно быть специфическим видом исключения родительской абстракции. При этом клиент родительской абстракции должен знать и уметь обрабатывать такие исключения. Поскольку в настоящее время механизм исключений достаточно тяжеловесен, данная практика не может быть рекомендована к широкому применению. При наследовании расширений потомок родительского класса предоставляет дополнительные возможности, которые отсутствуют у класса родителя. При этом у такого потомка обязан существовать собственный клиент, которому необходимы дополнительные функциональные возможности. В противном случае увеличение функциональной возможностей потомков бесполезно, так как их невозможно использовать.

Все формы наследования подтипа не являются взаимоисключающими, т.е., потомки могут одновременно иметь вариации поведения, вводить ограничения или же реализовывать дополнительные возможности. При наследовании роли класс выполняет определенный контракт (реализует интерфейс) для обеспечения возможности появления его объектов в роли других объектов, над которыми выполняются определенные действия или которые сами способны выполнить некоторый набор действий. При этом класс не изменяет своей первоначальной сущности и не становится участником другой иерархии. К данной форме наследования следует отнести, например, банковский счет, реализующий интерфейс `IComparable`, позволяющий ему поучаствовать в алгоритмах сортировки, если таковая необходима, или класс банк, содержащий множество своих счетов и реализующий интерфейс `IEnumerator`, и, тем самым, выполняющий перечисление своих счетов. При наследовании реализации класс потомок выполняет реализацию интерфейса, объявленного в другом компоненте с целью обеспечения его независимости. Примером данного вида наследования является реализация принципа DIP.

Наследование является самым сильным видом зависимости между классами. Поэтому его применение для повторного использования является необоснованным, поскольку повышает совокупную зависимость. Таким образом, правомерное использование наследования в статически типизированных языках Java и C# заключается в построении для некоторого клиента хорошо определенной абстракции, обладающей гибкостью поведения и возможностью его расширения, а также реализацией контрактов, обеспечивающей разделение алгоритмов от участвующих в них объектов или независимость компонентов.

Кроме того, наличие одного клиента у корневого класса построенной иерархии наследования позволяет иметь четкие критерии классификации классов, входящих в иерархию. Появление дополнительных клиентов приводит к тому, что корневая абстракция должна сочетать две или более линий поведения, требующихся соответствующим клиентам и появлению дополнительных критериев классификации, формирующих иерархию наследования. Наличие нескольких линий поведения противоречит принципу SRP, приводит к более частым изменениям кода и ухудшает возможности его повторного использования, к которому так стремятся ярые поклонники повсеместного использования наследования. Наличие дополнительных критериев классификации, которые часто являются противоречивыми, приводит лишь к нарушению стройности иерархии наследования и дополнительным требованиям к языку программирования в виде возможности потомков сокрытия методов своих родителей. Например, если имеются два клиента, одному из которых необходимы транспортные средства для перемещения грузов из одной точки в другую, а второму – расчет налогов на различные транспортные средства, нет необходимости для этого строить единую иерархию наследования, так как критерии их классификации принципиально различны.

Если у корневой абстракции отсутствует клиент, проектирование иерархии наследования выполняется с целью повторного использования, требующего максимального учета всех возможных вариаций и попытки построения универсальной структуры классов для решения множества задач. При этом, чем более сложную и масштабную систему требуется построить, тем более призрачными являются надежды построить такую универсальную структуру. Таким образом, если у корневой абстракции отсутствует клиент (для объектов не возникает потребности присоединения к объектам различных типов или объединения их в единый список для выполнения некоторых задач (нарушение правила полиморфизма)), то, в первую очередь, необходимо рассмотреть возможность клиентского отношения. И лишь при наличии веских причин (а не возможности при написании кода опускать имя переменной) в ущербности такого отношения следует применять наследование.

Выводы

Адекватное использование наследования заключается в построении правильных абстракций для обобщения или специализации некоторого поведения, востребованного соответствующими клиентами. Применение наследования просто для повторного использования приводит к построению противоречивых иерархий, которые затруднены или невозможны для повторного использования. Помимо этого, наследование необходимо для реализации контрактов, обеспечивающих отделение алгоритмов от участвующих в них объектов или независимость компонентов.

Предложена классификация форм наследования, обеспечивающих его свободное применение в таких статически типизированных языках, как Java и C#.

Библиографический список

1. **Бадд, Т.** Объектно-ориентированное программирование в действии / Т. Бадд. – СПб.: Питер, 1997. – 464 с.
2. **Орлов, С.А.** Теория и практика языков программирования: учебник для вузов / С.А. Орлов. – СПб.: Питер, 2013. – 688 с.
3. **Мартин, Р.** Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб.: Питер, 2018. – 352 с.
4. **Ларман, К.** Применение UML2.0 и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ и проектирование: учеб. пособие / К. Ларман. – М.: Вильямс, 2008. – 736 с.
5. **Мейер, Б.** Объектно-ориентированное конструирование программных систем / Б. Мейер. – М.: Русская редакция, 2005. – 768 с.

*Дата поступления
в редакцию: 01.06.2019*

S.V. Loganov

ON THE VARIETY OF INHERITANCE CATEGORIES

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

Purpose: The article is dedicated to discussing possible categories of inheritance, their adequate and unreasonable use in statically typed object-oriented languages. The concept of the purpose of construction inheritance class hierarchies is given.

Design/ methodology/ approach: The use of inheritance for reuse leads to the construction of conflicting hierarchies that are very difficult to reuse.

Findings: The valid use of inheritance is to build the abstractions with extendable behavior require by the relevant clients.

Research limitations/implications: Statically typed object-oriented languages.

Originality/ value: Inheritance is not recommended for reuse because it is a very strong coupling between classes.

Key words: object-oriented programming, inheritance, class hierarchy, reusability, LSP principle, generalization/concretization.

УДК 004.896

М.В. Мартынюк

**АДАПТАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается подход к решению задач интеллектуального управления состояниями энергосетей в нормальных режимах работы. Разработан и исследован генетический алгоритм автоматизированной настройки параметров устройств управления для обеспечения качества электроэнергии с минимизацией общих энергопотерь. Алгоритм позволяет управлять нормальными режимами работы энергосетей произвольной архитектуры большой размерности, повышая качество электроэнергии и минимизируя энергопотери.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, распределительная электрическая сеть, имитационная модель, качество электроснабжения, энергопотери.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме повышения надежности систем электроснабжения. Ставятся стратегически важные задачи интеллектуализации энергосистем на основе информационных технологий сбора, интеллектуальной обработки и передачи большого объема информации внутри электрических сетей (ЭС), а также автоматизации процессов управления с использованием современных информационных и коммуникационных технологий. Для реализации стратегий развития интеллектуальных сетей разрабатываются активно-адаптивные устройства управления (УУ), автоматизированная настройка параметров которых обеспечит эффективное функционирование ЭС в нормальных режимах работы. Создано новое эффективное комплексное устройство регулирования напряжения – твердотельный регулятор величины и фазы вольтдобавочного напряжения (ТРВДН) [1-4]. При этом управление состояниями сети с помощью ТРВДН выполняется вручную. В связи с этим, необходима разработка автоматизированных алгоритмов оперативной настройки его параметров с целью эффективного управления потоками мощности в распределительных электрических сетях различной конфигурации – протяженных, радиально-магистральных, гексагональных. Регулирование параметров распределительной электрической сети должно осуществляться в режиме реального времени. Решение данной задачи позволит повысить качество электроэнергии, надежность энергосетей и снизить энергопотери. Таким образом, актуальна разработка алгоритмов управления состояниями сложных ЭС произвольной архитектуры для обеспечения нормальных режимов их работы.

Постановка задачи

В данной работе рассматривается решение двух следующих задач управления состоянием электрической сети (под *состоянием электрической сети* будем понимать набор параметров ЭС – значения напряжений в узлах сети, энергопотерь в линиях передач, а также значения параметров управляющих напряжением устройств).

1. Обеспечение напряжения потребителей в пределах допуска (1):

$$\max |\delta \mathbf{U}(\mathbf{P}, \mathbf{K})| \leq k U_{ном}, \quad (1)$$

где $\delta \mathbf{U}(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – вектор относительных отклонений напряжений потребителей от номинального $U_{ном}$, \mathbf{P} – вектор состояния (вектор нагрузок потребителей определяющих текущее состо-

яние энергосети), \mathbf{K} – вектор управления (вектор параметров регулирования комплекса устройств управления), k – допустимый коэффициент отклонения напряжения от номинального (по ГОСТ 32145-2013 значение допустимого отклонения 10 %, т.е., $k = 0.1$).

2. Снижение общих энергопотерь в сети при транспортировке электроэнергии (2):

$$P_{\text{общ.}}(\mathbf{P}, \mathbf{K}) = \sum_{i=1}^N \Delta P_i(\mathbf{P}, \mathbf{K}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $P_{\text{общ.}}(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – общие энергопотери в линиях передачи электрической сети, $\Delta P_i(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – энергопотери в i -й линии передачи электроэнергии, i – номер линии передачи электрической сети, N – количество линий передачи в электрической сети.

Решение обеих задач является вариационным относительно параметров регулирования \mathbf{K} . Первая задача на практике является приоритетной, вторая задача может быть решена в рамках ограничений, накладываемых первой задачей, т.е. целевая функция первой задачи становится ограничением во второй задаче.

Решение задачи управления состоянием ЭС с помощью комплекса УУ осложняется следующими факторами:

- чрезвычайно высокая сложность получения точных аналитических решений;
- существование множества решений (различных векторов управления \mathbf{K}) отвечающих требованию (1);
- изменение коэффициента регулирования отдельного УУ изменяет состояние всех элементов энергосети.

Однако то, что влияние УУ на элементы ЭС «ослабевает» по мере их удаления от данного УУ, позволяет использовать для решения данной задачи различные оптимизационные алгоритмы, в частности, генетический алгоритм [5]. Решение задачи «подбора» оптимального, т.е., отвечающего требованиям (1) и (2), вектора параметров регулирования может осуществляться на имитационной модели распределительной электрической сети (РЭС).

Описание имитационной модели

Рассмотрим распределительную электрическую сеть (РЭС) с активно-адаптивной структурой, представляющую совокупность связанных между собой линиями электропередач элементов трех типов: специальных устройств управления, потребителей и производителей электроэнергии. Рассмотрим наиболее универсальную и сложную в плане управления РЭС многоконтурной конфигурации, структура имитационной модели которой приведена на рис. 1. Сеть верхнего уровня содержит только источники напряжений и понижающие трансформаторы (рис. 2а). Сеть нижнего уровня соответствует уровню конечных потребителей электроэнергии (рис. 2в).

Конечных потребителей в имитационной модели будем представлять понижающими трансформаторами и активно-реактивными нагрузками. Структурная схема имитационной модели представляется неориентированным графом с вершинами (узлами) и ребрами (устройствами/линиями) различных типов. Каждый тип ребер и узлов графа обладает набором свойств. Узлам в графовой модели соответствуют точки приложения потенциала, отображаемые на структурных схемах узловые точки с указанием их местоположения (x_u – координаты узлов), неотображаемые на структурных схемах узловые точки, не привязанные к координатам, представляющие собой, например, соединение линий передач, контакты – соединения в трехфазной сети (одной узловой точке могут соответствовать до 4 контактов – фазы A , B , C и нейтраль N). Ребрам графа соответствуют линии электропередачи с соответствующими характеристиками (длина, удельное сопротивление, площадь поперечного сечения), нагрузки/потребители (потребляемая мощность, характеризуются элементом вектора состояния \mathbf{P}), УУ (комплексный коэффициент трансформации, характеризуются элементом вектора управления \mathbf{K}).

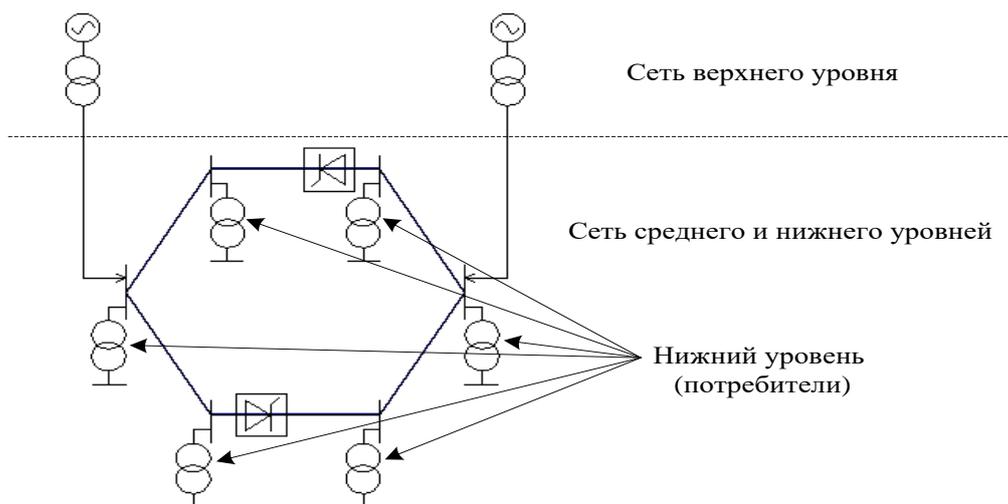
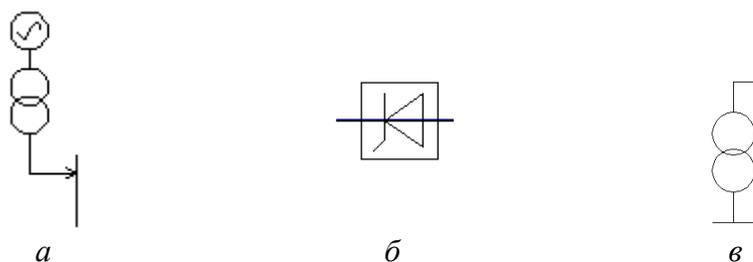


Рис. 1. Структурная схема модели РЭС

Рис. 2. Обозначения мнемоник элементов модели РЭС:
а – источник; б – УУ; в – потребитель

Отдельный элемент вектора управления **К** представляет собой комплексный коэффициент трансформации напряжения. В УУ, описанном в [3], возможно регулирование выходного напряжения в диапазоне $\pm 9\%$ с дискретным шагом в $1,5\%$, угла сдвига фаз в диапазоне $\pm 4,5^\circ$ с шагом в $1,5^\circ$. Таким образом, возможна реализация тринадцати уровней регулировки выходного напряжения и семи уровней регулировки угла сдвига фаз. Общее количество состояний одного УУ в этом случае равно $13 \cdot 7 = 91$.

Вычисление параметров электрической цепи для определения текущего состояния ЭС подразумевает вычисление значений токов и напряжений для каждой ветви и каждого узла электрической цепи. В данной работе параметры ЭС вычислялись с помощью алгоритма, описанного в [6]. На основании вычисленных токов и напряжений цепи определяется полное описание состояния ЭС, характеризуемое такими параметрами, как общие энергопотери в сети, полная мощность потребления и выполнение требования (1).

Описание генетического алгоритма

Для решения задачи обеспечения качества электроэнергии и минимизации энергопотерь с учетом большого количества возможных состояний УУ были исследованы эвристические подходы, применяемые при решении задач оптимизации параметров энергосетей [7-9]. Неприменимость алгоритма полного перебора для решения подобных задач показана, например, в [10]. В результате разработан генетический алгоритм (ГА), позволяющий найти решение, близкое к оптимальному, за требуемое время.

Для поиска квазиоптимального вектора параметров регулирования УУ с использованием эвристических алгоритмов необходимо решить следующие задачи:

- выполнить кодирование решения задачи в форму, удобную для работы эвристических алгоритмов;
- выбрать критерии оценки полученного решения;
- разработать метод генерации начального множества решений;
- разработать метод коррекции сгенерированного решения с целью получения допустимого решения;
- настроить параметры эвристического алгоритма.

На каждой итерации эвристический алгоритм будет работать с набором коэффициентов регулирования УУ, подбирая их таким образом, чтобы обеспечить качество электроэнергии потребителю с минимизацией энергопотерь. Условие окончания работы ГА – обеспечено заданное значение качества электроэнергии в сети или с учетом ограничения на время поиска решения. Под *решением* будем понимать закодированный битовой строкой вектор параметров регулирования комплекса устройств управления (**К**), совместно с вектором нагрузок потребителей (**Р**), определяющий состояние ЭС. Под *популяцией* будем понимать набор возможных решений – набор векторов управления, задающих множество различных состояний комплекса УУ. Под *приспособленностью* будем понимать количественную оценку качества возможного решения, т.е. величину общих энергопотерь $P_{общ}$ (2) ЭС при сохранении качества поставляемой электроэнергии (1).

Рассматриваемый ГА при генерации решения манипулируют символьными строками, которые должны однозначно интерпретировать состояние электрической сети. Пусть ЭС включает N управляющих устройств с S количеством состояний, определяемых возможным набором их параметров. Размер битовой строки, состоящей из элементов множества $M = \{0, 1\}$, для параметра можно определить по формуле (3):

$$|M|^{(k-1)} < S \leq |M|^k, \quad (3)$$

где S – количество возможных допустимых состояний параметра решаемой задачи, k – длина битовой строки.

Пусть устройства управления имеют два коэффициента регулирования – по амплитуде напряжения U и сдвигу фаз φ . Тогда битовая строка, кодирующая решение, будет состоять из аллелей, количество которых соответствует количеству УУ, а каждая аллель будет включать 2 компонента по числу коэффициентов регулирования (рис. 3).

U_1	φ_1	U_2	φ_2	...	U_N	φ_N
-------	-------------	-------	-------------	-----	-------	-------------

Рис. 3. Кодирование решения, набора значений коэффициентов регулирования N УУ

Необходимо учесть, что для оценки качества получаемых решений само решение должно находиться в области допустимых решений. Существуют различные стратегии обеспечения допустимости сгенерированных решений ГА, рассмотрим применимость наиболее распространенных.

Первый вариант. Стратегия основывается на отбрасывании решений, не входящих в область допустимых. Генерация будет производиться до тех пор, пока нужное количество допустимых решений в популяции не будет сформировано. Вероятность генерации значений символьных строк, представляющей недопустимое решение, определяется диапазоном и дискретностью регулирования параметров УУ.

Второй вариант. Решения, лежащие вне области допустимых решений, помечаем флагом недопустимости для их отсеивания при переходе на следующую итерацию (при формировании нового поколения).

Третий вариант. Недопустимые значения решений корректируются следующим образом. Выходящий за диапазон допустимых значений коэффициент регулирования УУ принимается равным ближайшему допустимому значению.

Четвертый вариант. При формировании решения используются такие алгоритмы, которые заведомо обеспечивают входение решения в допустимое множество состояний УУ, где под состоянием УУ будем понимать набор значений коэффициентов регулирования УУ.

Для формирования начальной популяции ГА при решении задачи управления состояниями ЭС, т.е., получения квазиоптимальных управляющих воздействий для обеспечения качества электроэнергии с минимизацией энергопотерь, будем использовать четвертый вариант. Решения начальной популяции будем формировать следующим образом. Случайному значению из множества допустимых дискретных значений параметров коэффициентов регулирования УУ ставится соответствующее битовое представление в соответствующую аллель. Отметим, что качество ГА зависит напрямую от того, насколько удачно будет сформирована начальная популяция, а также насколько разнообразны варианты решений начальной популяции.

Алгоритм генерации множества допустимых решений начальной популяции имеет следующий вид.

Первый шаг. Генерируем случайным образом номер набора состояния комплекса УУ.

Второй шаг. Устанавливаем значение коэффициентов регулировки УУ в соответствии сгенерированному решению и формируем значение битовой строки.

Третий шаг. Производим моделирование электрической сети. Для этого рассчитываем токи, протекающие во всех линиях электрической сети, и значения напряжений на всех узлах сети методом узловых потенциалов. Рассчитываем значение целевой функции – общие энергопотери в сети. Проверяем, обеспечивает ли сгенерированный набор коэффициентов регулирования УУ выполнению условия (1). Если это так, сгенерированный набор значений коэффициентов регулирования УУ включаем в множество решений начальной популяции. Если мощность множества решений меньше требуемого значения, переход на шаг 1, иначе выход. Для формирования решений новых популяций при работе ГА будем использовать третий вариант стратегии формирования решений, являющийся наилучшим применительно к специфике нашей задачи. Процесс адаптации ГА к решению прикладных задач заключается в формировании механизма кодирования / декодирования решения в символьную строку, построения функции оценки новых решений и оптимизации ГА настройкой их параметров.

Все настраиваемые параметры ГА можно условно разделить на три группы:

- параметры, влияющие на генерацию новых решений в текущем поколении на основе решений предыдущего поколения. К ним относятся вероятность выбора операторов ГА кроссовер, мутация и т.д., выбор вида мутации, кроссовера и т.д.;
- параметры, влияющие на стратегию отбора перспективных решений при формировании нового поколения решений из существующего множества;
- параметры, влияющие на время работы ГА.

Первая и вторая группы параметров отвечают за скорость сходимости ГА к квазиоптимальному решению и качество исследования области допустимых решений. Третья группа включает в себя размер популяции на каждой итерации, количество итераций работы ГА. В то же время необходимо учитывать, что настройка параметров групп влияет друг на друга. В общем виде, все параметры ГА образуют замкнутую систему со сложными обратными связями (компенсирующими и усиливающими), и решение задачи настроек самих генетических алгоритмов выливается в отдельную оптимизационную задачу.

Общий алгоритм настройки параметров генетического алгоритма

Настройка параметров ГА будет происходить в два этапа. На первом этапе будут настроены параметры первого и второго типов, которые влияют на качество формирования новых решений внутри популяции, а также отбора решений в новую популяцию. На втором

этапе на основе настроенных параметров первых двух типов будут настраиваться параметры третьего типа, влияющие на время получения решения ГА.

В связи с тем, что типы параметров взаимосвязаны, настройка их должна проходить итерационно до тех пор, пока она приводит к улучшению решения.

Очевидно, что настроенные на одной архитектуре энергосети значения параметров ГА не являются оптимальными для другой архитектуры.

К параметрам, настраиваемым на первом этапе, относятся вероятность мутации, доля решений, полученных с помощью оператора кроссовера, тип кроссовера, метод отбора решений для работы оператора кроссовер, доля элитных решений, переходящих в следующее поколение.

Настройка каждого из параметров заключается в фиксации значения всех остальных параметров и в варьировании значения настраиваемого параметра в пределах допуска. Инициализация значений параметров первого типа в ГА была произведена следующим образом:

- метод выбора «родительской» пары – случайный отбор;
- тип кроссовера – одноточечный;
- вероятность выбора оператора кроссовер 0,1;
- вероятности инвертирования бит в битовой строке для мутации 0,01;
- метод отбора – комбинированный, при этом вероятность элитного отбора 0,1.

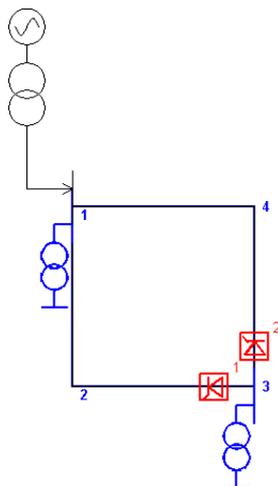


Рис. 4. Малая ЭС с двумя УУ

Дальнейшая настройка и исследования работы ГА были выполнены на конкретных примерах, для различных топологий ЭС разного размера. При настройке параметров варьировалось значение одного параметра при фиксации значений всех остальных параметров, как было описано выше. Результаты проведенных исследований для схемы ЭС, представленной на рис. 4, дали следующие настройки параметров ГА: размер популяции – 20 решений, генерация начальной популяции выполнена по правилу вхождения решения в допустимое множество состояний УУ, элитный отбор в новую популяцию решений составляет 20 %, тип кроссовера – двухточечный, выбор оператора кроссовера с вероятностью 0,7, мутации – с вероятностью 0,3. Критерии останова: заданное время работы алгоритма или отсутствие улучшения решений в течение 50 поколений.

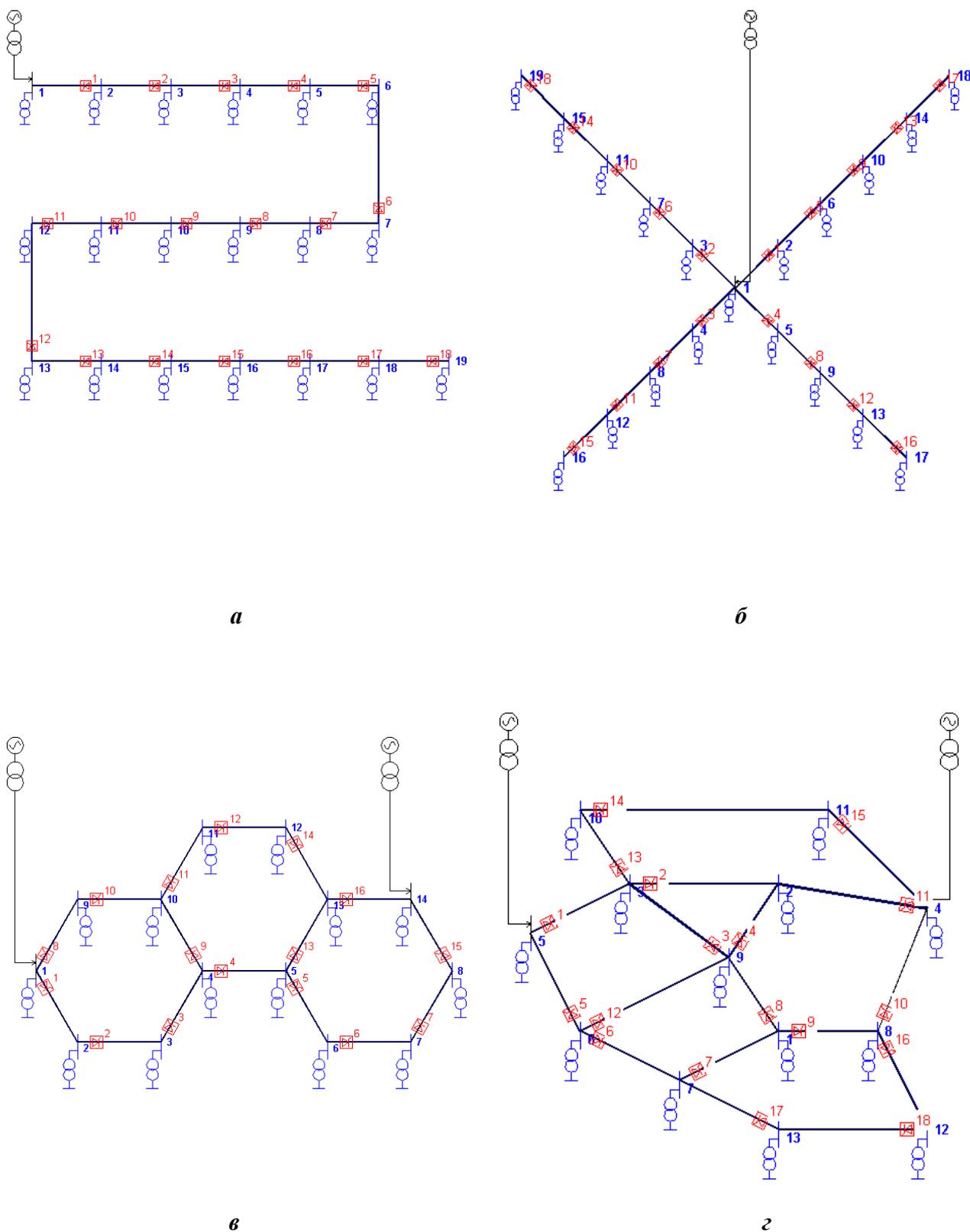


Рис. 5. Варианты конфигураций ЭС:
а – линейная; **б** – радиальная; **в** – гексагональная; **г** – произвольная

Результаты моделирования при 9 запусках ГА представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования при 10 запусках ГА

№	Время работы (с)	Номер набора	Энергопотери (кВт)
1	17,27	6806	8,177
2	21,99	7717	8,096
3	22,47	6706	6,755
4	26,74	2673	7,296
5	20,07	1702	7,134
6	18,45	5806	8,028
7	19,56	3702	7,251
8	18,33	6805	8,177
9	16,56	8716	8,327

Как видно из табл. 1, лучший результат составил 6,755 кВт, что хуже минимально возможных потерь (4,995 кВт), полученных с помощью алгоритма полного перебора, но при этом время работы ГА значительно меньше (порядка 20 с). В результате исследований была проведена настройка параметров ГА для ЭС различных конфигураций, представленных на рис. 5, со сходным количеством УУ. Результаты проведенных исследований настройки параметров ГА в зависимости от конфигураций энергосетей с 16÷18 устройствами управления представлены в табл. 2.

Увеличение количества УУ в энергосети при работе ГА также приводит к увеличению объема вычислений, однако для ГА, в отличие от алгоритма полного перебора состояний, данное увеличение не носит лавинообразный характер. Зависимость времени работы ГА от количества УУ представлена на рис. 6.

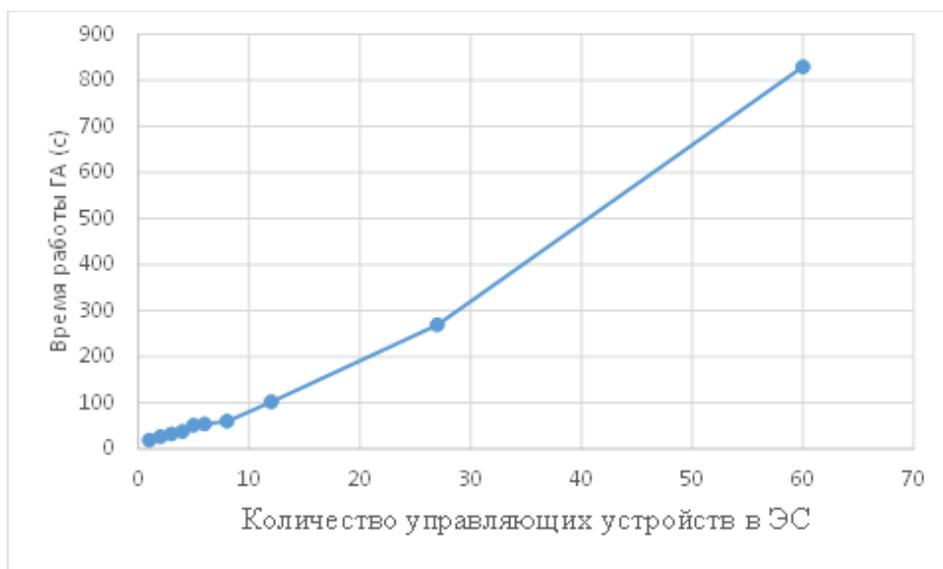


Рис. 6. Время работы ГА в зависимости от количества устройств управления

Таблица 2

Результаты моделирования при 10 запусках ГА с 18 УУ

	Линейная топология	Радиальная топология	Гексагональная топология	Произвольная топология
Метод выбора «родительской» пары	Выбор родительской пары, не зависимо от топологии сети, осуществляется по значениям функции приспособленности			
Тип кроссовера	двухточечный			
Вероятность выбора оператора кроссовер	0,6	0,7	0,7	0,7
Вероятности инвертирования бит в битовой строке для дальней мутации	0,03	0,05	0,06	0,10
Элитный отбор (%)	10	20	30	20

Заключение

Скорость работы ГА позволяет использовать их для расчета ЭС большой размерности. Тем не менее, как было указано выше, для каждой структурной схемы ЭС требуется выполнение настроек параметров ГА. Диапазон изменения коэффициентов передачи реально существующего УУ [3] дает возможность эффективного решения задач интеллектуального управления энергосетями.

Библиографический список

1. **Sosnina, E.** Harmonic Analysis of the Thyristor Regulator Output Voltage / E. Sosnina, A. Kralin, R. Bedretdinov, E. Kryukov // Proc. 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America (T&DLA). Peru, 2018. – P. 1-6.
2. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Е.В. Крюков, А.А. Кралин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Н. Новгород: НГТУ, 2017. – С. 132-136.
3. Пат. 2621062 Рос. Федерация: МПК G 05F 1/30. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В.; заявитель и патентообладатель Ниж. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева – № 2016127017; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 16.
4. **Martynyuk, M.V.** Voltage regulation of a linear section of an extended distribution network with thyristor regulators of booster voltage (TRBV) / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin, Evgeny V. Kryukov // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2019.
1. **Батищев, Д.И.** Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д.И. Батищев. – Воронеж, 1995.
2. **Martynyuk, M.V.** Matrix Method of Calculation for Simulation of Distribution Electric Networks Of Medium Voltage / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin // International Journal of Applied Engineering Research, – 2017. – V. 12/ – № 24. – P. 15066-15072.
3. **Корнеев, А.С.** Использование генетических алгоритмов для решения задач оптимизации в электроэнергетике / А.С. Корнеев, М.С. Ляхов // Сборник IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодая гвардия», 18-21 апреля, КузГТУ, Кемерово, 2017. – С. 4. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/Articles/0201038-.pdf> (дата обращения: 03.10.2018).
4. **Поляхов, Н.Д.** Оптимизация распределения потоков мощности в энергосистеме с помощью генетических алгоритмов / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, И.А. Рубцов, И.В. Швыров // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 170. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6523> (дата обращения: 20.05.2018).

5. **Gurjar, S.** Smart Grid Reconfiguration Using Simple Genetic Algorithm and NSGA-II / S. Gurjar, U. Me-wada // Journal Club for Electrical Engineering (JCEE), 2015, 2(I). – P. 37-43.
6. **Sokolova, E.S.** Optimization of the Parameters of the Distribution Network Computer Model to Reduce Losses / E.S. Sokolova, M.V. Martyniuk, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018.

*Дата поступления
в редакцию: 05.06.2019*

M.V. Martyniuk

ADAPTATION OF THE GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEMS OF MANAGING THE CONDITION OF THE ELECTRIC NETWORK

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

Purpose: an approach to solving problems of intelligent control of the states of the power grids in normal operation modes is considered. A genetic algorithm has been developed and investigated for the automated adjustment of control device parameters to ensure the quality of electric power while minimizing total energy losses.

Approach: the method of optimization of the selection of parameters is implemented on a simulation model of the electrical network.

Results: a description of the genetic algorithm and the algorithm for setting its parameters is given. The algorithm has been tested on simulation models of electrical networks of various architectures. It is shown, that it is possible to use complex of the TVBRs to control the state of the electrical network.

Keywords: intelligent control, electrical distribution network, simulation model, quality of power supply, energy loss.

УДК 532.529

А.В. Ялозо

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ИНЖЕНЕРНЫХ ГИДРОСИСТЕМАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –
Российский федеральный ядерный центр

Представлен гибридный метод моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Методика моделирования одномерных течений сжимаемых и несжимаемых сред основана на использовании законов сохранения массы и импульса и эмпирических характеристик элементов. Моделирование течений в трехмерном приближении основано на использовании алгоритма SIMPLE. Реализован метод проведения связанных 1D-3D расчетов в программном комплексе «FlowDesigner» и модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Приведены результаты верификации предложенного метода.

Ключевые слова: связанное моделирование, инженерные гидросистемы, трубопроводы, гидравлический расчет, FlowDesigner, ПП ЛОГОС.

Введение

В области математического моделирования инженерных гидросистем можно выделить два основных подхода. Первый из них – одномерное (1D) моделирование гидросистем различного назначения, основанное на использовании методов теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1] и оперирующее интегральными балансами потоков. Определение потерь удельной энергии (гидравлических потерь) на участках гидравлических систем при таком подходе основано на использовании эмпирических формул. Как правило, такие системы представляют собой сеть разветвленных трубопроводов сложной структуры и достаточной протяженности. Численные методы моделирования таких задач базируются на различных способах решения систем нелинейных алгебраических уравнений, основанных на законах сохранения массового баланса и импульса [1-5]. Второй подход к математическому моделированию инженерных гидросистем – трехмерное (3D) моделирование гидродинамических течений в объектах сложной геометрической конфигурации. К данным объектам относятся такие промышленные изделия как ракеты, реакторы, турбины, корабельные установки и др. Математическое моделирование гидродинамических течений в этих изделиях осуществляется с целью детальной оценки технических характеристик [6-8], учитывающих взаимовлияние различных физических процессов и позволяющих максимально точно воспроизвести трехмерную картину течения.

Однако существуют задачи, решение которых с применением только одного из описанных подходов невозможно: например, гидросистемы, содержащие элементы с неизвестными эмпирическими характеристиками, либо участки, на которых важно получить детализированные по пространству и времени результаты. Подобные задачи часто встречаются при моделировании гидродинамических течений в автомобильной, авиационной и энергетической промышленности. Во многих случаях они требуют проведения значительного количества расчетов с целью многокритериальной многодисциплинарной оптимизации разрабатываемых образцов техники. Оптимальным подходом для такого класса задач является проведение связанных расчетов, сочетающих в себе трехмерное численное моделирование и полуэмпирическую оценку с использованием ТГЦ [1]. В этом случае задача целиком решается в одномерном приближении с использованием ТГЦ; выделяются один или несколько участков,

гидродинамические характеристики которых оцениваются с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке. Данный подход позволяет получить распределение интегральных характеристик по всей системе при относительно небольших вычислительных затратах. При этом на критически важных участках сохраняется возможность получения детализированных по пространству результатов посредством трехмерного математического моделирования. Детальное исследование воздействия гидродинамического потока на отдельные элементы конструкции позволяет определить потенциально проблемные места и заранее принять меры по обеспечению их надежности и оптимальной работоспособности.

Связанное 1D-3D моделирование широко применяется для решения задач в различных областях промышленности. Так, в работах [9, 10] приводятся результаты связанного моделирования отдельных фрагментов системы жидкостного охлаждения легкового автомобиля с целью оптимизации отдельных компонентов. В работах [11, 12] такой подход используется для моделирования кровеносной системы человека с учетом различных патологий. В работе [13] на примере моделирования части системы охлаждения реактивного двигателя показано, что точность итогового результата связанной модели сопоставима с полностью трехмерной постановкой, при этом связанная модель позволила существенно ускорить общее время решения задачи. Однако в большинстве исследований для поведения расчетов используется коммерческое программное обеспечение и, как следствие, недостаточно освещаются численные алгоритмы организации связи.

Настоящая статья посвящена описанию гибридного метода и разработанного на его основе программного комплекса одномерного моделирования инженерных гидросистем с возможностью проведения связанных 1D-3D расчетов.

Основные уравнения и метод расчета

Рассмотрим численный метод моделирования гидродинамических течений в одномерном приближении. Любую инженерную гидросистему можно представить в виде набора соединенных между собой гидравлических элементов. Места сочленения двух и более элементов между собой далее будем называть узлами гидравлической системы.

Прежде всего, сформулируем основные допущения и пределы применимости предлагаемого метода моделирования гидросистем в одномерном приближении. Такие параметры транспортируемой среды, как давление и плотность, изменяются только вдоль течения потока. В пределах одного гидравлического элемента параметры транспортируемого вещества считаются усредненными. В случае необходимости при моделировании протяженных элементов они разделяются на конечное число контрольных объемов по направлению потока. При этом параметры транспортируемого вещества в пределах одного контрольного объема также считаются усредненными, а массовый расход между соседними контрольными объемами вычисляется как скалярная величина. Предполагается, что весь объем всех связанных между собой гидравлических элементов не может быть пустым, а всегда заполнен одинаковым веществом с теми или иными параметрами. В процессе расчета замена одного вещества на другое не предусмотрена. Температура транспортируемого вещества считается постоянной. Представленный метод не учитывает процессы критического течения, гидравлических ударов и распространения акустических волн.

Введем обозначения: Q_i – объемный расход, P_i – полное давление, ρ_i – плотность транспортируемого вещества на каждом из входов / выходов элементов схемы. Основная идея предлагаемого метода состоит в описании каждого конструктивного элемента гидросистемы набором уравнений относительно объемных расходов Q_i и давлений P_i на каждом из его входов / выходов, не зависящих от топологии системы. Количество уравнений, которыми должен быть описан элемент, будет зависеть от количества его входов. Как правило, такие зависимости определяются экспериментально и на основе эмпирических формул. Формулы

для вычисления гидравлических сопротивлений основных видов элементов трубопроводов представлены в [14, 15].

Для каждого узла системы из закона сохранения массы следует, что независимо от типа вещества, перемещающегося по системе, алгебраическая сумма массовых расходов в любом узле сети равна нулю. Поэтому для каждого узла системы будет справедливо равенство (1):

$$\sum_{i=1}^k \rho_i \cdot Q_i = 0, \quad (1)$$

где k – количество элементов, сходящихся в узле.

Очевидно, что для каждого узла также справедливо равенство (2):

$$P_1 = P_2 = \dots = P_k. \quad (2)$$

Для эффективного расчета расходов и давлений в гидравлической системе в отличие от уже существующих подходов предлагается составить общую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для Q_i и P_i , содержащую уравнения сохранения для всех узлов системы и уравнения, описывающие все элементов системы (3):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ P_1 \\ \vdots \\ Q_n \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{2n} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При этом линейзация уравнений осуществляется методом простых итераций. В итоге решение стационарной задачи потокораспределения в гидросистеме сводится к итерационному решению серии СЛАУ (4):

$$\begin{aligned} Q_i^{(k+1)} &= \alpha_q \cdot Q_i^{(k)} + (1 - \alpha_q) \cdot Q_i^{(k-1)}, & \alpha_q &\in (0, 1), \\ P_i^{(k+1)} &= \alpha_p \cdot P_i^{(k)} + (1 - \alpha_p) \cdot P_i^{(k-1)}, & \alpha_p &\in (0, 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – номер итерации, α_q – коэффициент релаксации по расходу, α_p – коэффициент релаксации по давлению.

В случае нестационарной задачи решение на каждом временном шаге также сводится к решению серии СЛАУ (4). За счет использования общей СЛАУ для расходов и давлений потребуется меньшее количество итераций до заданного уровня сходимости, чем при отдельном нахождении расхода и давления. Это важно для систем, содержащих большое количество сложных элементов с существенно нелинейными характеристиками. Вектор решения системы (3) будет содержать искомые значения объемных расходов и давлений всех элементов гидравлической сети. За начальное приближение для Q_i и P_i можно принять произвольные ненулевые значения характерного расхода и давления. При этом для Q_i не требуется выполнения закона сохранения массы (1). Для решения общей СЛАУ используется модифицированный метод Гаусса с выбором главного элемента, позволяющий за конечное число вычислений найти точное решение либо сделать вывод о несовместности СЛАУ. Как показала практика, данный метод обеспечивает достаточно быструю сходимость (в пределах 30 итераций) при моделировании большинства гидросистем, причем количество итераций практически не зависит от размерности задачи и от выбора начального приближения. Оптимальное соотношение по скорости сходимости и устойчивости итерационного процесса позволяют достичь значения параметров $\alpha_q = \alpha_p = 0,7$. При моделировании гидросистем большой размерности, насыщенных элементами с существенно нелинейными характеристиками, для повышения устойчивости итерационного процесса оптимально использовать значения $\alpha_q = \alpha_p = 0,5$. Детальное изложение используемой одномерной методики расчета разветвленной сети трубопроводов представлено в [16, 17].

Получение пространственного распределения характеристик течения основывается на численном решении системы уравнений Навье-Стокса [18], описывающей течение вязкой сжимаемой жидкости. Одним из численных алгоритмов решения уравнений Навье-Стокса является алгоритм SIMPLE [19-22]. Данный алгоритм лежит в основе модуля расчета гидродинамических течений отечественного пакета программ инженерного анализа «ЛОГОС» (далее – ПП ЛОГОС), предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [23-25]. ПП ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач [26, 27], включая распространение гравитационных волн на свободной поверхности (цунами) [28, 29] и промышленные задачи [6].

Предлагаемый гибридный метод моделирования инженерных гидросистем основывается на организации обменов граничными условиями между разномасштабными областями по ходу проведения расчета. В процессе проведения связанного расчета при моделировании трехмерной области в качестве граничных условий будем задавать значение массового расхода G_{in} на входе и значение полного давления P_{out} на выходе, рассчитанные в одномерной области. Из трехмерной в одномерную область будем передавать значение перепада давления $\Delta P = P_{in} - P_{out}$, где $P_{in} = \frac{\int \rho v ds}{|F_{in}|}$ – полное давление, осредненное по сечению трехмерной области. Исходя из данных требований, можно сформулировать следующий алгоритм связи одномерной и трехмерной моделей:

Шаг 1. Начальная инициализация одномерной и трехмерной областей.

Шаг 2. Выполнение одной счетной итерации в одномерной области, получение новых значений G_{in} и P_{out} .

Шаг 3. Передача значений G_{in} и P_{out} из одномерной в трехмерную область, восстановление структуры течения на входной границе трехмерной области.

Шаг 4. Выполнение одной счетной итерации в трехмерной области, получение нового значения $\Delta P = P_{in} - P_{out}$.

Шаг 5. Передача значения ΔP из трехмерной области в одномерную.

Шаг 6. Проверка критериев сходимости задачи и, при необходимости, запуск следующей итерации со второго шага.

Таким образом, предложенный подход к сопряжению разномасштабных областей заключается в организации повторяющихся обменов данными внутри одного временного шага до тех пор, пока не выполнится заданный критерий точности. Представленный метод позволяет выделить неограниченное количество трехмерных областей в задаче. Для ускорения связанного расчета можно выполнять обмен данными не на каждой счетной итерации, а использовать дополнительный критерий проведения обмена данными, например, основываясь на критериях сходимости каждой из расчетных областей.

Программный комплекс «FlowDesigner»

В соответствии с описанным выше методом был разработан и реализован программный комплекс «FlowDesigner», предназначенный для создания в интерактивном режиме модели гидросистемы из набора конструктивных элементов и математического моделирования ее работы. В текущей версии заложен основной необходимый инструментарий для создания структурной схемы системы разветвленных трубопроводов, задания начальных данных составляющих ее конструктивных элементов и проведения расчета. Предусмотрена возможность экспорта полученных результатов в графическом и табличном виде, представления любых расчетных величин в виде графиков. По составу конструктивных элементов «FlowDesigner» полностью адаптирован для моделирования работы топливных систем маневренных самолетов.

Программный комплекс «FlowDesigner» написан на языке программирования C++ в соответствии с основными принципами объектно-ориентированного и структурного программирования и представляет графическое приложение, состоящее из множества классов. Основой приложения послужила кроссплатформенная библиотека QT [30]. QT позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение в большинстве современных операционных систем путем простой компиляции программы для каждой операционной системы без изменения исходного кода. Библиотека QT включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения, начиная от элементов графического интерфейса и заканчивая классами для работы с сетью, базами данных и XML. QT является полностью объектно-ориентированной, легко расширяемой и поддерживающей технику компонентного программирования.

Главное окно программного комплекса «FlowDesigner», показанное на рис. 1, представляет собой многодокументный интерфейс (MDI), в котором каждой отдельной проектируемой схеме соответствует своя собственная вкладка. Одновременно допускается редактирование и расчет неограниченного числа расчетных схем. Динамическая система хранения позволяет хранить в памяти неограниченное число элементов, что позволяет не накладывать ограничения на схему по количеству содержащихся в ней элементов. Счетный модуль комплекса адаптирован для использования на многопроцессорных ЭВМ.

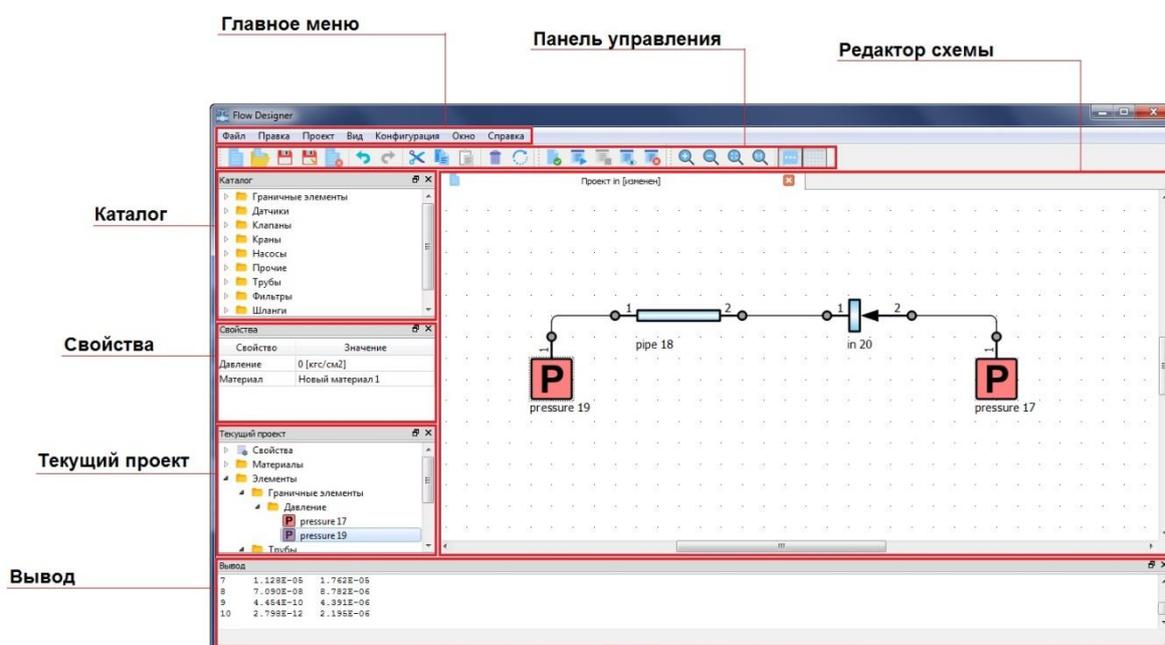


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса «FlowDesigner»

Проектирование схемы происходит путем добавления требуемых элементов из «Каталога» (рис. 1), содержащего набор элементов, непосредственно в «Редактор схемы» и соединения элементов между собой. Параметры каждого элемента задаются во вкладке «Свойства». Древовидная структура и общие параметры создаваемой схемы доступны в окне «Текущий проект». Запуск процедуры расчета построенной схемы выполняется из «Главного меню» «FlowDesigner» либо из «Панели управления», дублирующей основные операции работы со схемой. Вся информация о ходе выполнения расчета отображается в окне «Вывод» (рис. 1). После выполнения расчета полученные результаты отображаются непосредственно в «Редакторе схемы». Перед выполнением расчета проводится автоматический анализ корректности построенной схемы. Выполняется проверка на наличие несоединенных гидравлических выходов, а также незадаанных значений обязательных параметров элементов. Завершив расчет, программа автоматически переходит в режим просмотра результатов.

На рис. 2 показана схема в режиме обработки результатов. Справа показана палитра расхода Q , стрелками на схеме показано направление потока.

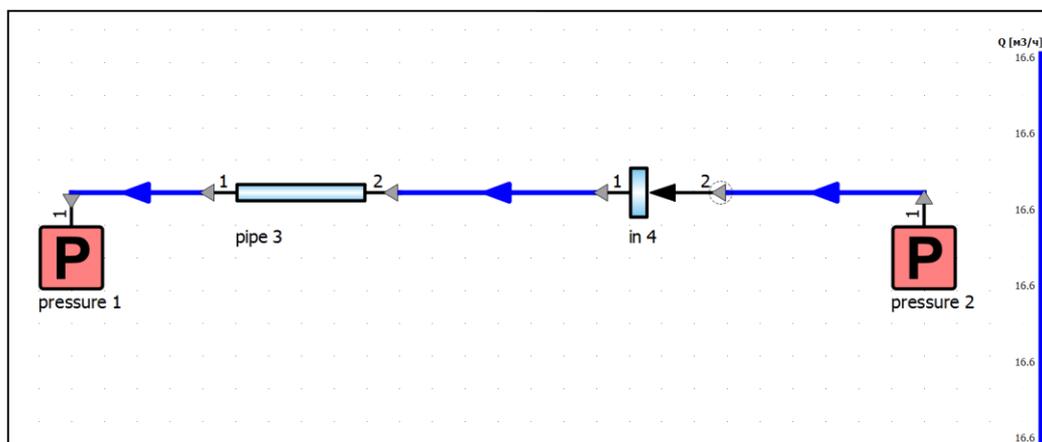


Рис. 2. Просмотр результатов расчета

В случае необходимости все полученные результаты могут быть экспортированы в табличном формате. Кроме этого, возможно сохранение макета схемы, включая полученные направления течений и палитру полученных результатов в графическом файле. Для облегчения работы конечного пользователя разработанный программный комплекс включает в себя интерактивную справочную систему. В ней подробно описываются основные этапы работы с программой, а также приведены математические модели всех конструктивных элементов, доступных в данном программном комплексе.

Течение в прямой трубе круглого поперечного сечения

В рамках программного комплекса «FlowDesigner» в соответствии с изложенным методом была реализована возможность проведения связанных расчетов с ПП ЛОГОС. Для верификации предложенного подхода к сопряжению разномасштабных областей рассмотрим задачу течения жидкости по прямой трубе круглого сечения. На трубе, имеющей внутренний диаметр 0,02 м и длину 0,2 м, задается перепад давления 5,6 кПа. Плотность перетекающей по трубе жидкости составляет 1000 кг/м^3 , динамическая вязкость – $\mu = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Требуется определить распределение массового расхода жидкости через трубу с течением времени. Будем решать данную задачу в двух постановках: с использованием полностью трехмерной модели и в связанной постановке. Для моделирования задачи в трехмерной постановке была построена блочно-структурированная сетка, состоящая из 16 500 ячеек (рис. 3).

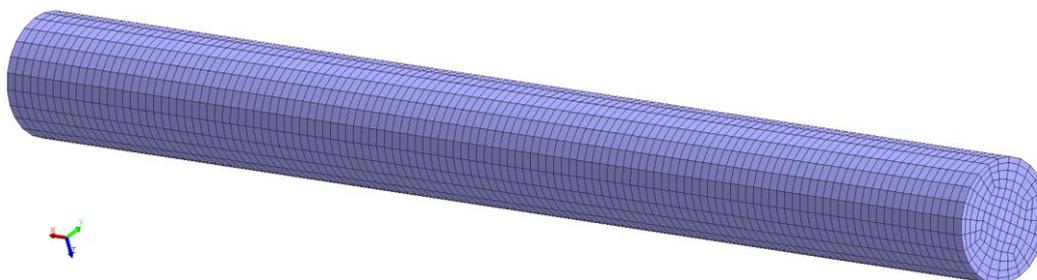


Рис. 3. Сеточная модель трубы круглого сечения

Для связанной постановки половину трубы длиной 0,1 м будем моделировать в трехмерном приближении, а оставшуюся часть – с использованием одномерной методики. Для ламинарного течения ньютоновской жидкости в прямой трубе круглого поперечного сечения с учетом прилипания потока на стенках есть известное аналитическое решение [31] (5):

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход, м³/с; R – радиус трубы, м; ΔP – перепад давления на концах трубы, Па; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; L – длина трубы, м.

Используя (5) можно определить аналитические значения установившегося объемного расхода в трубе.

На рис. 4 представлено векторное поле скорости для полностью трехмерной и связанной постановок. Как видно из рисунка, поля скоростей в полностью трехмерной и связанной постановке совпадают. Это говорит о корректности предложенного алгоритма по сопряжению разномасштабных областей. Погрешность результатов численного моделирования относительно аналитического решения, вычисленного по формуле (5), не превышает 0,5 %.

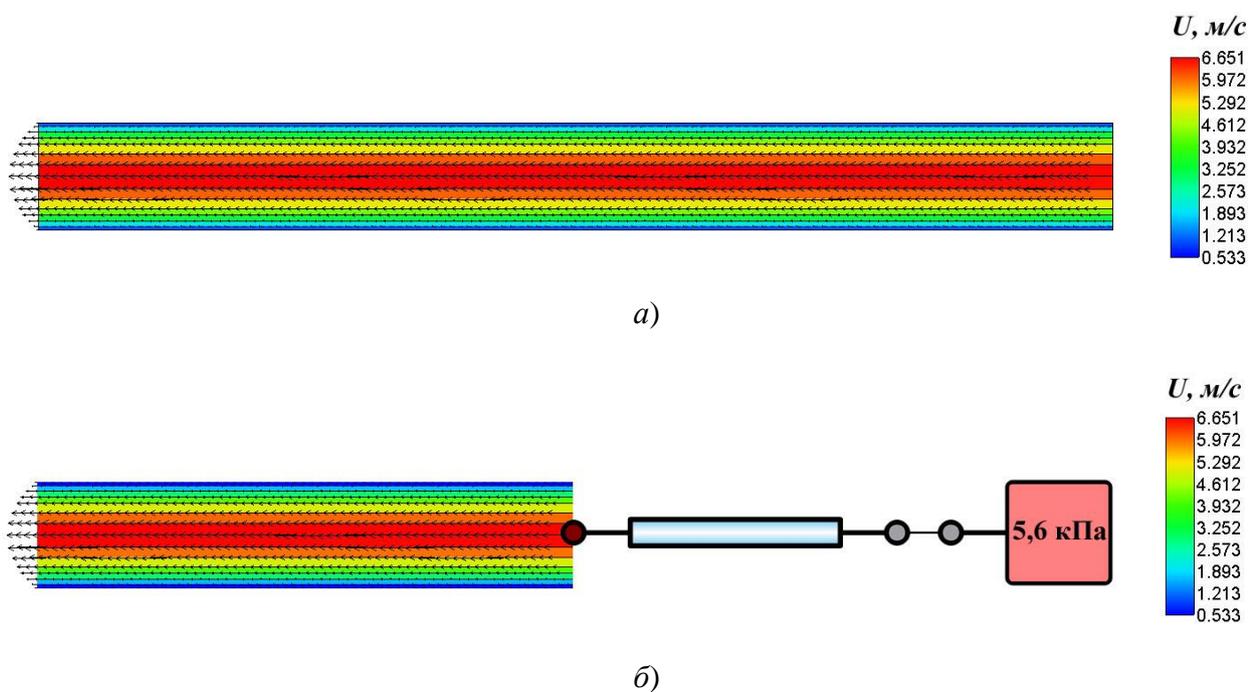


Рис. 4. Векторное поле скорости:
а – 3D модель; б – 1D-3D модель

На рис. 5 представлено распределение давления. Перепад давления по всей длине трубы совпадает для полностью трехмерной 3D или связанной 1D-3D постановок, при этом давление в области стыковки соответствует половине перепада давления для всей трубы.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что полностью трехмерная и связанная постановки дают практически одинаковые результаты. Разница в вычислениях не превышает 0,2 %. Это подтверждает корректность предложенного подхода по организации связи разномасштабных областей.

Заключение

В статье рассмотрен гибридный метод моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Приведено краткое описание метода моделирования работы систем разветвленных трубопроводов в одномерном приближении, реализованного в программном комплексе «FlowDesigner». Моделирование течений в трехмерном приближении основано на использовании алгоритма SIMPLE, реализованного в модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Реализован метод проведения связанных 1D-3D расчетов в программном комплексе «FlowDesigner» и модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Приведены результаты верификации предложенного метода.

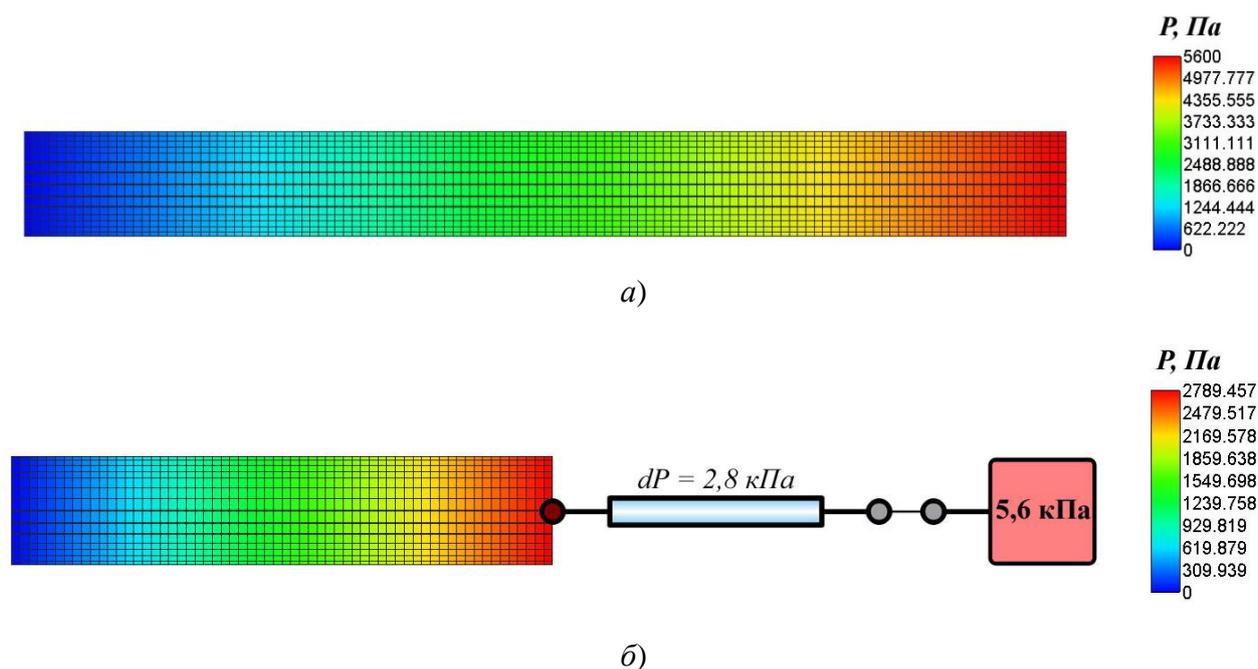


Рис. 5. Распределение давления:

а – 3D модель; *б* – 1D-3D модель

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9, государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5, а также при финансовой поддержке РФФИ - 17-05-00067.

Библиографический список

1. **Меренков, А.П.** Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 279 с.
2. **Todini, E.** A gradient method for the solution of looped pipe networks / E. Todini, S. Pilati // Comput. Appl. Water Supply. – 1988. – №. 1. – P. 1-20.
3. **Coelho, B.** Efficiency achievement in water supply systems – A review / B. Coelho, A. Andrade-Campos // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 30. – P. 59-84.
4. **Ateş S.** Hydraulic modelling of control devices in loop equations of water / S. Ateş // Flow Measurement and Instrumentation. – 2017. – V. 53. – P. 243-260.
5. **Ormsbee, L.E.** The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age / L.E. Ormsbee // 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati, Ohio, USA, 2006.

6. **Betelin, V.B.** Mathematical simulation of hydrogen–oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / V.B. Betelin, R.M. Shagaliev, S.V. Aksenov, I.M. Belyakov, Y.N. Deryugin, A.S. Kozelkov, D.A. Korchazhkin, V.F. Nikitin, A.V. Sarazov, D.K. Zelenskiy // *Acta Astronautica*. – 2014. – V. 96. – P. 53-64.
7. **Сафронов, А.В.** Результаты валидации многофункционального пакета программ ЛОГОС при решении задач аэрогазодинамики старта и полета ракет-носителей / А.В. Сафронов, Ю.Н. Дерюгин, Р.Н. Жучков, Д.К. Зеленский, А.В. Саразов, А.С. Козелков, Н.Ф. Кудимов, Ю.М. Липницкий, А.В. Панасенко // *Математическое моделирование*. – 2014. – Т. 26. – № 9. – С. 83-95.
8. **Козелков, А.С.** Расчетные исследования аэродинамических характеристик сверхзвукового самолета на крейсерских режимах полета / А.С. Козелков, А.В. Корнев, Д.Ю. Стрелец, И.А. Танненберг, А.А. Останко // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. – 2017. – № 6. – С. 17-21.
9. **Lu, P.** The simulation methods based on 1D/3D collaborative computing for the vehicle integrated thermal management / P. Lu, Q. Gao, Y. Wang // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 104. – P. 42-53.
10. **Pang, S.C.** A review on air flow and coolant flow circuit in vehicles' cooling system // *International Journal of Heat and Mass Transfer* / S.C. Pang, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, M.A. Hazrat. – 2012. – № 55. – P. 6295-6306.
11. **Formaggia, L.** On the coupling of 3D and 1D Navier-Stokes equations for flow problems in compliant vessels / L. Formaggia, J.F. Gerbeau, F. Nobile, A. Quarteroni // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2001. – V. 191. – P. 561-582.
12. **Dobroserdova, T.K.** A finite element solver and energy stable coupling for 3D and 1D fluid models / T.K. Dobroserdova, M.A. Olshanskii // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2013. – V. 259. – P. 166-176.
13. **Peng, W.** A novel multi-fidelity coupled simulation method for flow systems / W. Peng, Z. Yun, Z. Zhongping, Q. Lei, Z. Zhixiang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2013. – V. 26(4). – P. 868-875.
14. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
15. **Селезнев, В.Е.** Математическое моделирование трубопроводных сетей и каналов. Методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
16. **Ялозо, А.В.** Математическое моделирование работы топливной системы самолета / А.В. Ялозо, А.С. Козелков, Д.Ю. Стрелец, А.В. Корнев, И.Л. Матерова, Е.А. Левченко, И.Н. Лапенков // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. – 2018. – № 6. – С. 12-24.
17. **Ялозо, А.В.** Моделирование систем разветвленных трубопроводов / А.В. Ялозо, А.С. Козелков, В.В. Курулин, И.Л. Матерова, А.В. Корнев, Д.Ю. Стрелец // *Математическое Моделирование*. – 2018. – Т. 30. – № 10. – С. 123-138.
18. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д. Ландау, В.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2001, – 732 с.
19. **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. – М.: Мир, Т. 1, 2, 1991. – 1056 с.
20. **Волков, К.Н.** Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, А.С. Козелков, В.Н. Емельянов, И.В. Тетерина. – М.: Физматлит, 2014. – 416 с.
21. **Козелков, А.С.** Полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью / А.С. Козелков, Д.П. Мелешкина, А.А. Куркин, Н.В. Тарасова, С.В. Лашкин, В.В. Курулин // *Вычислительные технологии*. – 2016. – Т. 21. – № 5, – С. 54-76.
22. **Лашкин, С.В.** Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости разделенным и совмещенным алгоритмом типа SIMPLE / С.В. Лашкин, А.С. Козелков, Д.П. Мелешкина, А.В. Ялозо, Н.В. Тарасова // *Математическое моделирование*. – 2016. – Т. 28. – № 6. – С. 64-76.
23. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Р.М. Шагалиев, А.В. Ялозо // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2016. – Т. 56. – № 8. – С. 1524-1535.
24. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов, А.Г. Карпенко, А.С. Козелков, И.В. Тетерина. – М.: Физматлит, 2013. – 536 с.

25. **Лашкин, С.В.** Исследование эффективности параллельной реализации алгоритма SIMPLE на многопроцессорных ЭВМ / С.В. Лашкин, А.С. Козелков, А.В. Ялозо, В.Ю. Герасимов, Д.К. Зеленский // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9. – № 3. – С. 298-315.
26. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина, А.А. Куркин, М.А. Легчанов, Ю.А. Циберева // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 44-58.
27. **Козелков, А.С.** Зонный RANS–LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, А.А. Куркин, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 5. – С. 24-33.
28. **Kozelkov, A.S.** Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, E.S. Tyatyushkina, V.V. Kurulin, N.V. Tarasova // Science of Tsunami Hazards. – 2016. – V. 35. – №. 3. – P. 106-144.
29. **Kozelkov, A.S.** Numerical modeling of the 2013 meteorite entry in Lake Chebarkul, Russia / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, V.V. Kurulin, E.S. Tyatyushkina // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2017. – V. 17. – P. 671-683.
30. **Шлее, М.** Qt 5.3 Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.
31. **Уилкинсон, У.И.** Неньютоновские жидкости / У.И. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию: 29.07.2019*

A.V. Yalozo

A HYBRID MATHEMATICAL SIMULATION METHOD FOR HYDRODYNAMIC FLOWS IN ENGINEERING HYDRAULIC SYSTEMS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
All-Russian Research Institute of Experimental Physics – Russian Federal Nuclear Center

Purpose: The paper presents a hybrid method to simulate hydrodynamic flows in engineering hydraulic systems.

Design/methodology/approach: The simulation technique for one-dimensional compressible and incompressible fluid flows is based on the use of the mass and momentum conservation laws, and empirical characteristics of components. The simulation of flows in the three-dimensional approximation is based on the use of the SIMPLE algorithm.

Results: A method of performing coupled 1D-3D simulations has been implemented in the FlowDesigner software complex and in the CFD module of the LOGOS software package. Developed method's verification results are presented.

Area of applicability: The obtained results may be useful for the simulation of hydrodynamic flows in engineering hydraulic systems.

Keywords: coupled simulation, engineering hydraulic systems, hydraulic computation, FlowDesigner, LOGOS SP.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.1

Л.Т. Крюков, М.И. Ершова

КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что результаты исследования параметров микропластической деформации могут быть успешно применены для решения задач контроля механических свойств материалов реакторного оборудования. Экспериментально установлено, что параметр микропластической деформации, характеризующий протяженность микропластической области и интенсивность релаксации в ней напряжений, линейно связан с коэффициентом ударной вязкости и является более чувствительным индикатором охрупчивания, чем ударная вязкость. Обосновывается, что параметры микропластической деформации более корректно использовать в качестве индикатора различного вида охрупчивания сталей.

Ключевые слова: параметры микропластической деформации, ударная вязкость, охрупчивание сталей.

Одной из важных задач при эксплуатации конструкций атомного машиностроения является обеспечение контроля механических свойств конструкционных сталей. В зависимости от конкретных условий работы, контроль механических свойств материалов может осуществляться путем использования неразрушающего метода, вырезки части конструкций для изготовления образцов и проведения механических испытаний, а также путем использования образцов-свидетелей. Для целей контроля механических свойств материалов предлагается использование характеристик микропластической деформации [1]. Со спецификой протекания микроскопической деформации связаны многие особенности поведения материалов и их эксплуатационные свойства. Микропластическая деформация в значительной мере определяет такие явления, как упругое последствие, релаксация напряжений, внутреннее трение, характеристики усталости и ползучести, склонность материалов к хрупкому разрушению и другие [2]. Следует особо отметить проблемы контроля за состоянием материалов реакторного оборудования, как в силу специфики эксплуатации материалов, так и из-за необходимости получения данных, отличающихся более высокой достоверностью. Известно, что процесс радиационного повреждения материалов реакторного оборудования зависит от большого количества факторов, связанных с химическим составом стали, особенностями ее термической и механической обработок, параметрами облучения, комбинированным влиянием облучения и среды и т.п. Это делает актуальным проблему изучения и прогнозирования поведения конкретных материалов, их сварных швов в штатных условиях эксплуатации различных частей конструкций реакторов. Для этих целей используются образцы-свидетели, которые должны быть не только размещены максимально близко к определенной части конструкции, но и иметь минимально возможные размеры (\varnothing 3,5 мм, высота 7 мм). В то же время методики испытаний этих образцов-свидетелей должны обладать максимальной точностью и информативностью, чтобы в результате испытаний малого количества образцов получить достоверные результаты об изменении комплекса механических характеристик. К таковым относятся характеристики прочности: ударной вязкости, вязкости разрушения, критических температур вязко-хрупкого перехода, малоциклового усталости. Все перечисленное дает представление о сложности проблемы контроля материалов реакторного оборудования,

для решения которой ведутся работы в развитых странах с различными подходами, но общей остается одна тенденция: уменьшение размеров образцов и повышение информативности методов испытаний.

Для оценки пределов пропорциональности (упругости), текучести, ударной вязкости и критических температур вязко-хрупкого перехода в сталях по параметрам микропластической деформации (ПМД) предлагается использовать методику, разработанную для испытания образцов металлических материалов при ступенчатом (прерывистом) увеличении прикладываемой нагрузки [1]. Сущность методики заключается в регистрации функции отклика (в данном случае – кривой релаксации напряжений) при приращении нагрузки на образец на постоянную величину через равные промежутки времени. На первом этапе работ, определяющем границы применимости методики, в качестве параметра реакции материала на нагрузку используется простейшая характеристика – величина падения напряжения $\Delta\sigma$. Эта величина качественно характеризует интегральное влияние различных факторов торможения движущихся дислокаций на каждом этапе микропластической деформации. Этапы (стадии) микропластической деформации ограничены критическими напряжениями σ_1° , σ_2° , σ_1' , σ_2' и σ'' , при которых реализуются новые механизмы пластической деформации, дополнительно к действующим при более низких напряжениях. Этим критическим напряжениям соответствуют определенные величины релаксации напряжений $\Delta\sigma_1^\circ$, $\Delta\sigma_2^\circ$, $\Delta\sigma_1'$, $\Delta\sigma_2'$ и $\Delta\sigma''$ [1].

Критические напряжения σ_2° и σ'' находятся в удовлетворительной линейной корреляции соответственно с условными пределами упругости и текучести, но в отличие от последних имеют определенный физический смысл. Поэтому изменение структуры материалов при воздействии на них различных факторов можно оценить по параметрам σ_2° и σ'' более корректно, чем, например, по значениям σ_y (условного напряжения, при котором достигается заданная величина остаточной деформации – 0,05; 0, 02; 0,001 и 0,005 %) и $\sigma_{0,2}$ (условного предела текучести рассматриваемых материалов). Критическое напряжение σ_2° , обозначающее окончание микропластической области деформации и соответствующее σ_y , совместно с параметром $\Delta\sigma_2^\circ$ характеризует макроупругие свойства материала, определяя верхнюю границу (σ_2°) области минимальных необратимых пластических деформаций и их интенсивность ($\Delta\sigma_2^\circ$). Кроме того, используя эти параметры, можно оценить изменение ударной вязкости металлических материалов. По параметрам микропластической деформации также можно определять температуры вязко-хрупкого перехода в сталях.

В настоящее время для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению широкое распространение получили испытания на ударную вязкость: это связано с тем, что данная характеристика в большинстве случаев более резко реагирует на изменение структуры, чем пределы упругости и текучести. Однако следует обратить внимание, что величина ударной вязкости по своей сути является условной характеристикой, зависящей от условий испытаний и типа образцов. Например, для оценки склонности сталей к хрупкому разрушению увеличивают скорость нагружения (динамические испытания на изгиб), повышают «жесткость» напряженного состояния образца (различные типы надрезов создают состояние трехслойного растяжения), снижают температуру испытания. Следует отметить, что при испытаниях разные типы образцов одного и того же материала дают разные значения ударной вязкости, определяемой отношением затраченной работы к сечению образца в месте надреза, что обусловлено деформацией образца не в плоскости, а в некотором объеме материала, определить который не представляется возможным. Поэтому вычисление характеристики ударной вязкости не имеет физического смысла.

Хрупкое разрушение материалов, не сопровождающееся значительной пластической деформацией, происходит в упругой (макро) области, в которой имеется два пути релаксации возникающих максимальных локальных напряжений – релаксация напряжений за счет протекания микропластической деформации и за счет нарушения сплошности материала (образования трещин). В связи с этим было замечено, что снижение релаксационной стойкости материала при нагрузках ниже предела текучести сопровождается его охрупчиванием. Необ-

ходимо отметить, что попытки оценить количественно охрупчивание сталей по изменению только релаксационного параметра или только пределов текучести и прочности не дали положительных результатов, удовлетворяющих потребности практики. Исследование различных видов охрупчивания сталей, связанных с развитием обратимой и необратимой отпускной хрупкости, и др., показало, что эти процессы неизбежно ведут к изменению характера микропластической деформации и, соответственно, к изменению ПМД (параметров микропластической деформации). При этом при охрупчивании сталей, выявляются некоторые закономерности в изменениях параметров σ_2° и $\Delta\sigma_2^\circ$.

При всех видах охрупчивания сталей наиболее характерным является повышение параметра σ_2° или снижение величины $\Delta\sigma_2^\circ$. Охрупчивание может сопровождаться изменением в указанном направлении одного из этих параметров или обоих, причем между значениями каждого из этих параметров и величиной ударной вязкости нет взаимосвязи. Однако вполне удовлетворительная корреляция обнаруживается между ударной вязкостью и параметром A ,

включающим значения $\Delta\sigma_2^\circ$ и σ_2° , который выражается как $A = \frac{(\Delta\sigma_2^\circ)^2}{\sigma_2^\circ}$. Результаты определения значений КСУ (ударной вязкости) в МДж/м² (X) и $A \cdot 10^2$ в МПа (Y) приведены в табл. 1 для различных сталей и двух титановых сплавов после различных режимов термического упрочнения. В этой таблице сталь 18Х2Н4МА представлена в четырех состояниях: А, Б, В и Г. Состояние «А» – горячая деформация + улучшение + закалка с различными температурами отпуска; состояние Б – литье + улучшение + закалка с отпуском; состояние В – литье + циклическая гомогенизация при 1050 °С + улучшение + закалка с отпуском; состояние Г – тоже, что и В, но гомонизация при 1250 °С.

Как видно из табл. 1, общей зависимости КСУ-А для всех материалов нет, для каждой марки получена своя индивидуальная линейная зависимость КСУ-А, характеризующаяся высокими значениями коэффициентов корреляции, при этом выявляется тенденция к возрастанию коэффициента «К» в линейном уравнении при увеличении содержания углерода в стали, соответственно увеличению ее прочности. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости КСУ-А для инструментальной стали У10 и конструкционной стали 30ХГСА, закаленных и отпущенных в интервале температур 200-650 °С. Большой угол наклона зависимости КСУ-А для стали У10 показывает, что в то время как для высокоуглеродистой и высокопрочной стали испытания на ударную вязкость становятся непоказательными, параметр A регистрирует существенное изменение вязких свойств стали с изменением ее структуры в зависимости от температуры отпуска.

Таким образом, можно заключить, что ПМД целесообразно использовать в качестве индикатора охрупчивания различного вида сталей, оценивая, в частности, изменение простейшего параметра $A = \frac{(\Delta\sigma_2^\circ)^2}{\sigma_2^\circ}$. Этот параметр по своей сути характеризует протяженность микропластической области и интенсивность релаксаций в ней напряжений. До

напряжения σ_2° возможность релаксации напряжения весьма ограничена, а в интервале $\sigma_2^\circ - \sigma''$ эта возможность непрерывно возрастает, а выше σ'' – резко возрастает, исключая саму возможность хрупкого разрушения материала. Очевидно, что при равных условиях нагружения одинаковых образцов сталей, вероятность хрупкого разрушения будет тем выше, чем больше протяженность микропластической области и меньше интенсивность релаксации в ней. В этом смысле параметр A характеризует некоторый запас вязкости материала (склонность его к хрупкому разрушению), определенный при очень малых деформациях и не зависящий от конкретно реализуемого способа разрушения материала.

Таблица 1

Значения ударной вязкости (X) и параметра A (Y) для сталей и титановых сплавов

Марка стали	Параметры	Значения ударной вязкости (X) и параметра A (Y)										Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции «r»
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y		
45	X	0,25	0,17	0,27	0,31	0,49	0,61	0,73	0,85	1,11	1,41	Y = 0,51 + 0,91 · X	0,96
	Y	0,88	0,76	0,53	0,75	0,87	1,02	1,11	1,41	1,46	1,79		
У8	X	0,17	0,27	0,24	0,36	0,37	0,30	0,41	0,55	0,56	-	Y = 0,71 + 4,11 · X	0,94
	Y	0,47	0,67	0,52	0,68	0,82	1,03	0,99	1,18	1,58	-		
У10	X	0,22	0,30	0,28	0,27	0,30	0,37	0,44	0,46	0,55	0,62	Y = 0,44 + 3,55 · X	0,98
	Y	0,40	0,40	0,50	0,56	0,74	0,87	1,08	1,25	1,59	1,70		
30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	Y = 0,17 + 0,27 · X	0,95
	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65		
40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	Y = 0,66 + 0,99 · X	0,69
	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-		
15X2HM A	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	Y = 3,67 + 1,56 · X	0,71
	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-		
5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	Y = 0,13 + 0,5 · X	0,92
	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-		
18X2H4M A (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	Y = 0,87 + 0,23 · X	0,82
	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-		
18X2H4M A (B)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	Y = 0,2 + 0,65 · X	0,96
	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-		
18X2H4M A (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	Y = 0,33 + 0,75 · X	0,95
	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-		
18X2H4M A (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	Y = 0,26 + 0,56 · X	0,95
	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-		
X19H2Г5 Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	Y = 0,97 + 0,46 · X	0,90
	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-		
BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	Y = 0,55 + 1,4 · X	0,98
	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-		
BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	Y = 2,23 · X	0,99
	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-		

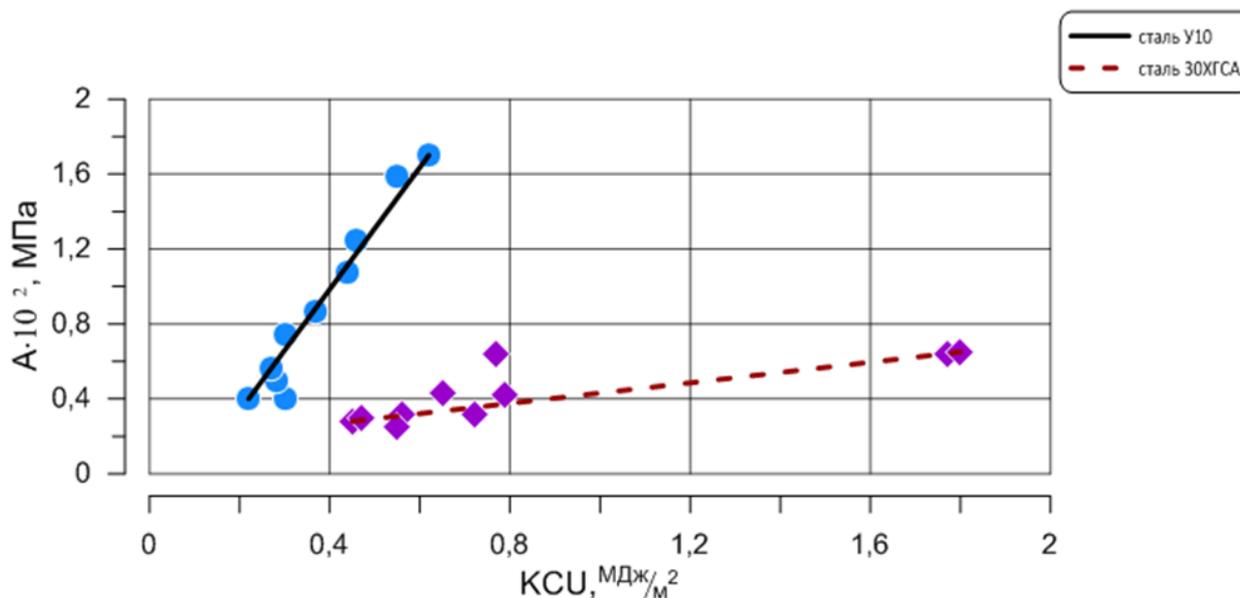


Рис. 1. Зависимость между ударной вязкостью и параметром A

Например, при изменении надреза образца Шарпи с U на V-образный работа его разрушения уменьшится при сохранении, естественно, постоянным параметра A . В то же время при изменении структуры материала или температуры испытания, влияющих на развитие микропластической деформации, будет изменяться и параметр A , указывая на повышение или снижение запаса вязкости материала и склонности его к хрупкому разрушению. Таким образом, параметр A (или другая функция ПМД), включающий имеющий определенный физический смысл характеристики и определенных одним и тем же способом для вязких и хрупких материалов, может служить более объективной характеристикой материала, чем ударная вязкость.

Определение параметров микропластической деформации, производимое на одном типе миниатюрных образцов (\varnothing 3,5 мм, высота 7 мм) с применением одной испытательной машины, позволяет оценить комплекс механических свойств материалов, а именно: пределы упругости, текучести, ударную вязкость, температуру порога хладноломкости. При этом используются микропластические характеристики, имеющие определенный физический смысл, что обуславливает более объективную оценку изменений структуры и более корректное сопоставление свойств, чем при использовании условных стандартных показателей механических свойств металлических материалов.

Такой способ испытания материалов, кроме использования в атомной энергетике, может найти применение для решения различных технических вопросов, например, для контроля свойств материалов трубопроводов и других конструкций, позволяющих периодически производить вырезку небольших объемов материала из наиболее нагруженных участков; при разработке новых сплавов – для экспрессного контроля комплекса механических свойств большого числа композиций, выплавленных в малых количествах. При отработке и совершенствовании технологии возможно применение данного способа для оценки неоднородности механических характеристик и их анизотропии вылитых и кованных деталях сложной формы с резкими переходами по сечению, в которых вследствие разной скорости кристаллизации и различной степени горячей деформации отдельных объемов объективно возникает макронеоднородность структуры, а также – для определения механических свойств материала сварного шва и околошовной зоны и для других целей.

Таким образом, применение параметров микропластической деформации для контроля механических свойств материалов реакторного оборудования предполагает получение ряда преимуществ, а именно:

- повышение точности контроля из-за устранения необходимости введения поправок на разную интенсивность облучения образцов-свидетелей, так как образцы имеют объем в 100 раз меньший, чем, например, стандартные образцы для ударных исследований, и могут быть в достаточном количестве расположены в зоне с практически одинаковой интенсивностью облучения;
- снижение трудоемкости и повышение оперативности контроля в силу использования образцов простой формы, а также применения одной испытательной машины для оценки комплекса механических свойств;
- улучшение социальных условий контроля вследствие существенного уменьшения массы радиоактивных образцов, подвергаемых испытаниям;
- использование характеристик, имеющих определенный физический смысл (вместо условных), позволяет более объективно оценивать состояние материалов и, следовательно, дает возможность более точно прогнозировать их радиационный ресурс.

Библиографический список

1. **Крюков, Л.Т.** Определение момента перехода материала из пластичного состояния в хрупкое с использованием параметров микропластической деформации // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5 (102). – С. 48-53.
2. **Белошенко, В.А.** Определение критической температуры хрупкости методами измерения микротвердости и внутреннего трения / В.А. Белошенко, О.И. Дацко, В.Б. Примислер и др. // Заводская лаборатория. – 1986. – №2. – С. 74-76.

*Дата поступления
в редакцию: 04.06.2019*

L.T. Kryukov, M.I. Ershova

CONTROL OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF REACTOR EQUIPMENT ON THE PARAMETERS OF MICROPLASTIC DEFORMATION

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

Purpose: rationale of the use of microplastic deformation parameters to control the mechanical properties of structural steels of reactor equipment.

Approach: prediction of the behavior of metals, their welds in normal operating conditions of various parts of reactor structures.

Results and their application: the parameters of microplastic deformation is advisable to use as an indicator of embrittlement of steels, microplastic deformation parameters give a more objective assessment of changes in the structure and correct control of mechanical properties, as well as have a certain physical meaning, in contrast to the standard methods of control of mechanical properties of structural steels.

Conclusions: experiments carried out on the subject of embrittlement in different steels showed that the embrittlement processes are changing the nature of microplastic deformation. It is found that the parameter A characterizing the length of the microplastic region and the intensity of relaxation of stresses in it is linearly related to the value of KCU and is a more sensitive indicator of embrittlement than the toughness determined in the standard tests of Sharpe samples.

Keywords: parameters of microplastic deformation, impact strength, embrittlement of steels.

УДК 621.31

А.Б. Лоскутов, А.Н. Фитасов, С.А. Петрицкий

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ 0,95 КВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен сравнительный анализ эффективности по величине потерь электрической энергии двух схем электроснабжения с напряжениями 10/0,4 кВ и 10/0,95/0,4 кВ. Оценка эффективности применения напряжения осуществлялась по величине потерь электроэнергии в элементах сети. Расчет потерь произведен в зависимости от следующих параметров: изменения числа часов расчетного периода, длины линии и величины нагрузки потребителя. Полученные зависимости позволяют определить области эффективности применения напряжения 950 В. Зависимость величины потерь от числа часов расчетного периода показала, что наибольший эффект применения 950 В будет достигнут при величине 4000 ч, т.е., при нагрузке, работающей в двухсменном режиме. Зависимость величины потерь от относительной длины линии выявила, что наибольшая эффективность применения напряжения 950 В будет при относительном изменении длины линии 114,3 %. Зависимость величины потерь от величины нагрузки показала, что наибольшая эффективность будет достигнута при номинальной мощности нагрузки для напряжения 950 В.

Ключевые слова: оценка энергетической эффективности, технические потери электрической энергии, напряжение 950 В, сети напряжением до 1000 В.

Стратегическим ориентиром энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики и повышения качества жизни населения страны. Одним из главных векторов перспективного развития отраслей топливно-энергетического комплекса является переход на путь инновационного и энергоэффективного развития. В связи с ростом потребления электрической энергии большое значение обретают распределительные сети, обнаруживающие предел их пропускной способности. Особое внимание в данном контексте должно быть уделено сетям до 1000 В, для которых характерны следующие проблемы: высокая степень износа; низкая надежность; высокий уровень технических и коммерческих потерь электрической энергии; низкая эффективная длина и недостаточная пропускная способность линий; недопустимые отклонения напряжения в электрически удаленных точках. При увеличении напряжения потери при передаче электроэнергии уменьшаются; однако при переходе на напряжения свыше 1000 В увеличивается опасность поражения электрическим током. Соответственно, возникает необходимость разработки дополнительных мероприятий по электробезопасности.

В качестве питающего напряжения предлагается использовать 950 В. Данное напряжение находится пределах до 1 кВ, что, в свою очередь, позволит использовать в данной сети электрические аппараты, предназначенные для сетей до 1000 В, увеличить протяженность участков распределительной сети до 1 км и снизить технические и коммерческие потери. Обоснование применения напряжения 950 В приведено в работах [1,2]. Подобные экспериментальные проекты были уже реализованы в ряде сетевых организациях [2].

В настоящей статье представлены результаты исследования эффективности применения напряжения 950 В по сравнению с напряжением 380 В. Оценка эффективности применения напряжения осуществлялась по величине потерь электроэнергии в элементах сети.

Расчет потерь проводился в зависимости от следующих параметров:

- от числа часов расчетного периода;
- от относительного изменения длины линий сети;
- от относительного изменения мощности нагрузки потребителей.

В качестве объекта исследования принята схема электроснабжения с 6 участками линий. К участкам линий подключено 33 потребителя. Нагрузка каждого потребителя составляет 15 кВА. Расстояние между точками подключения потребителей 70 м. Все длины участков сети по длине не превышают 500 м, что обусловлено ограничением допустимым падением напряжения в сети 0,4 кВ. Расчеты проведены для двух вариантов конфигурации схемы электроснабжения.

В первом варианте рассматривается схема электроснабжения 10/0,4 кВ (рис. 1). В схеме предусматриваются две ТП: мощность первой 400 кВА (ТП1) и мощность второй 250 кВА (ТП2). От ТП1 запитаны три участка сети 0,4 кВ длиной 420 м и один участок сети 0,4 кВ длиной 490 м. От ТП2 запитаны два участка сети 0,4 кВ длиной 490 м. Два участка сети, запитанные от ТП2, находятся на расстоянии 420 м, поэтому для подключения ТП2 используется линия 10 кВ проводом АС-35 длиной 420 м. ТП 2 подключается к сети 10 кВ шлейфом от ТП1.

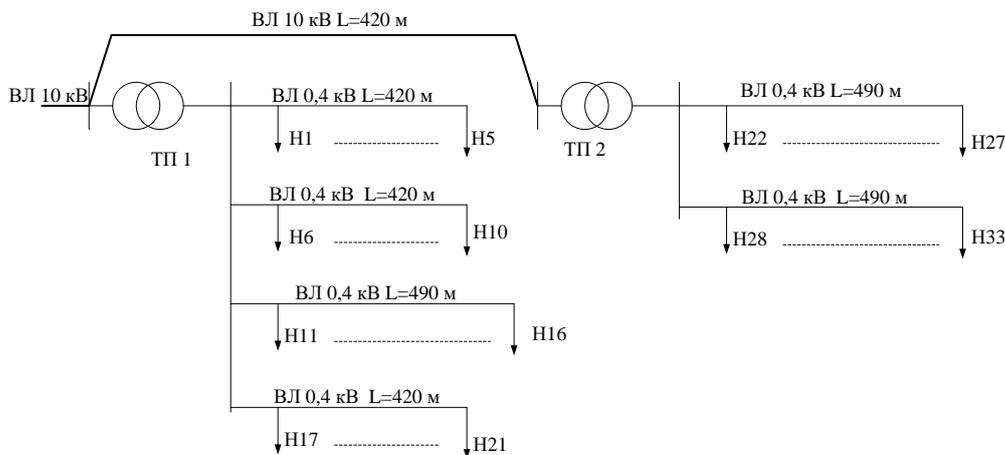


Рис. 1. Схема электроснабжения 10/0,4 кВ

Во втором варианте рассматривается схема электроснабжения 10/0,95/0,4 кВ (рис. 2). Возможность использования напряжения 950 В определяется наличием необходимого оборудования на это напряжение.

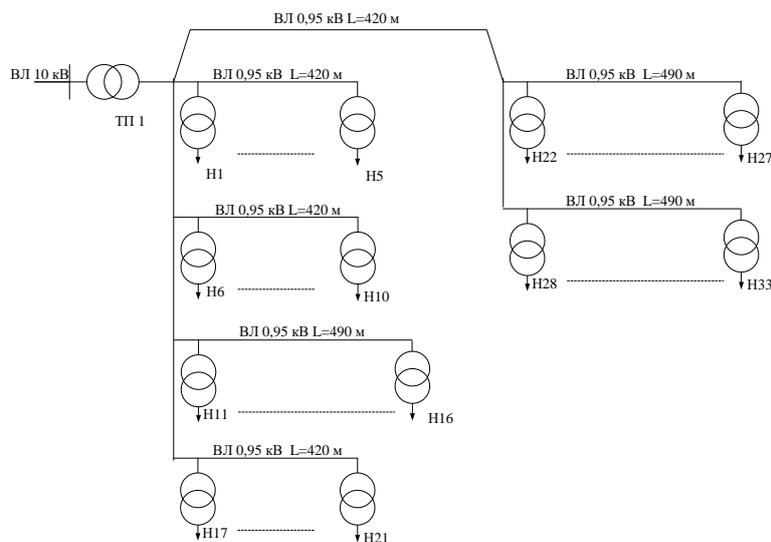


Рис. 2. Схема электроснабжения 10/0,95/0,4 кВ

В схеме предусматривается одна ТП мощностью 630 кВА (10/0,95 кВ). Вся распределительная сеть работает на напряжение 0,95 кВ. Для питания удаленных участков предлагается использовать линию с напряжением 0,95 кВ для удовлетворения требования по снижению напряжения в конце линии. Все потребители подключены к индивидуальным трансформаторным подстанциям 0,95/0,4 кВ мощностью 25 кВА размещенным на опорах. Данные трансформаторы изготавливаются под заказ, т.к. напряжение 950 В является инновационным и получило распространение пока только в пилотных проектах.

Параметры трансформаторов ТМТГ-630 (10/0,95) и ТМГ – 25 (0,95/0,4 кВ) приведены в табл. 1. Данные параметры использовались при расчете нагрузочных потерь в трансформаторе и потерь холостого хода.

Таблица 1

Основные параметры трансформатора

№	Наименование параметра	ТМТГ-630/10/0,95	ТМГ-25-У1
1	Номинальная мощность трансформатора, кВА	630	25
2	Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ	10	0,95
3	Номинальное напряжение обмотки НН, кВ	0,95	0,4
4	Схема и группа соединения обмоток	Д/У	У/У _н -0
5	Напряжение короткого замыкания, %	5	3
6	Потери холостого хода, Вт	1100	80
7	Потери короткого замыкания, Вт	7600	600

Трансформаторы ТМГ-25 (0,95/0,4 кВ) для питания потребителей установлены на столбах (рис. 3). На этой же опоре смонтирован щит с коммутационными и защитными аппаратами, счетчики электроэнергии. Данная разработка соответствует отраслевым техническим регламентам, государственным нормам, правилам и стандартам.

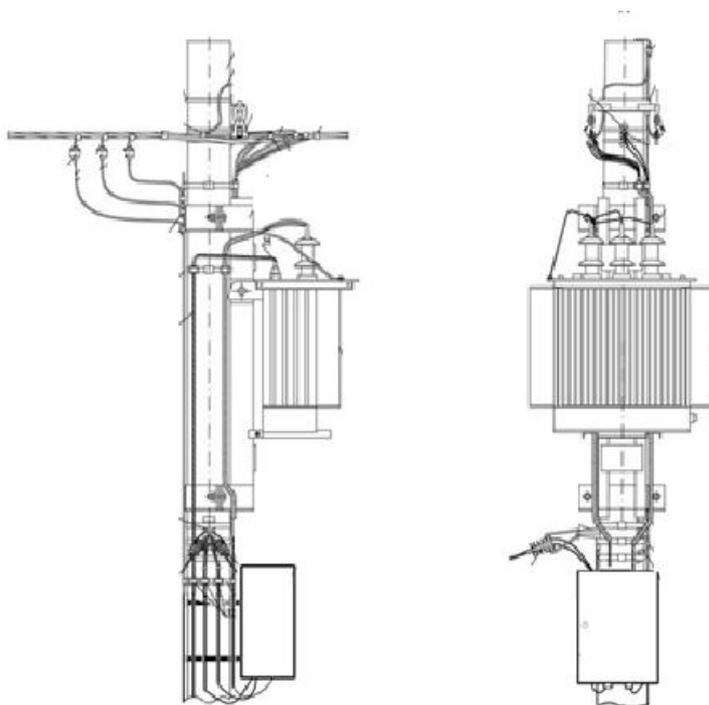


Рис. 3. Установка трансформатора ТМГ-25 (0,95/0,4 кВ)

Расчет нагрузочных потерь был проведен для двух вариантов схемы электроснабжения согласно методики [3]. Величина нагрузочных потерь электрической энергии определяется по выражению (1):

$$\Delta W = k_{\text{л}} \cdot k_{\text{к}} \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot T \cdot k_{\text{ф}}^2, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ – потери мощности в элементе сети (трансформаторах и ЛЭП) при средних за расчетный интервал нагрузках узлов, кВт; $k_{\text{ф}}^2$ – коэффициент формы графика суммарной нагрузки сети за расчетный период (принимается равным 1 при отсутствии данных летнего и зимнего суточных графиков нагрузки), о.е. [3,4]; $k_{\text{к}}$ – коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки различных ветвей сети (принимается равным 0,99 [3,4]), о.е.; $k_{\text{л}}$ – коэффициент, учитывающий влияние потерь в арматуре ВЛ и принимаемый равным 1,02 для линий напряжением 110 кВ и выше и равным 1,0 для линий более низких напряжений, о.е. [3,4]; T – число часов в расчетном периоде, ч.

Переменные потери мощности при средних за расчетный период нагрузках сети в элементах сети 10 кВ (ВЛ, трансформаторах) определяются по формуле (2):

$$\Delta P_{\text{ср}} = 3 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R = \frac{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}{U_{\text{ср}}^2} \cdot R = \frac{P_{\text{ср}}^2 \cdot (1 + \text{tg}^2 \varphi)}{U_{\text{ср}}^2} \cdot R, \quad (2)$$

где $I_{\text{ср}}$ – среднее значение токовой нагрузки, А; R – активное сопротивление элемента (ВЛ и трансформаторов), Ом; $P_{\text{ср}}$, $Q_{\text{ср}}$ – средние значения активной и реактивной мощности, кВт, кВар; $U_{\text{ср}}$ – среднее напряжение элемента сети, кВ; $\text{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности (принят по $\cos \varphi = 0,8$ для потребителей 0,4 кВ, что соответствует наиболее реальной нагрузке потребителей), о.е.

При расчетах так же учитывались постоянные потери, обусловленные потерями холостого хода трансформаторов [3]. Расчет составляющих потерь в зависимости от числа часов проводился в диапазоне от 2000 до 4000 ч. Данный диапазон часов соответствует односменному и двухсменному режиму работы нагрузки, что характерно для потребителей небольшой мощности. Свыше 4000 ч расчеты не производились, поскольку такой режим работы характерен для крупных промышленных предприятий.

По результатам расчетов были построены графические зависимости. На рис. 5 приведены зависимости изменения величин потерь при увеличении числа часов расчетного периода. Исследования величины потерь в диапазоне расчетного периода 2000-4000 ч. показали, что применение напряжения 950 В является эффективным, поскольку увеличение числа часов расчетного периода приводит к росту величин потерь в обеих схемах электроснабжения. Однако в схеме 10/0,4 кВ рост величины потерь больше по отношению к потерям в схеме 10/0,95/0,4 кВ. При двухсменном режиме работы нагрузки применение напряжения 950 В будет более эффективно на 6,5 % по отношению к нагрузке работающей в односменном режиме работы.

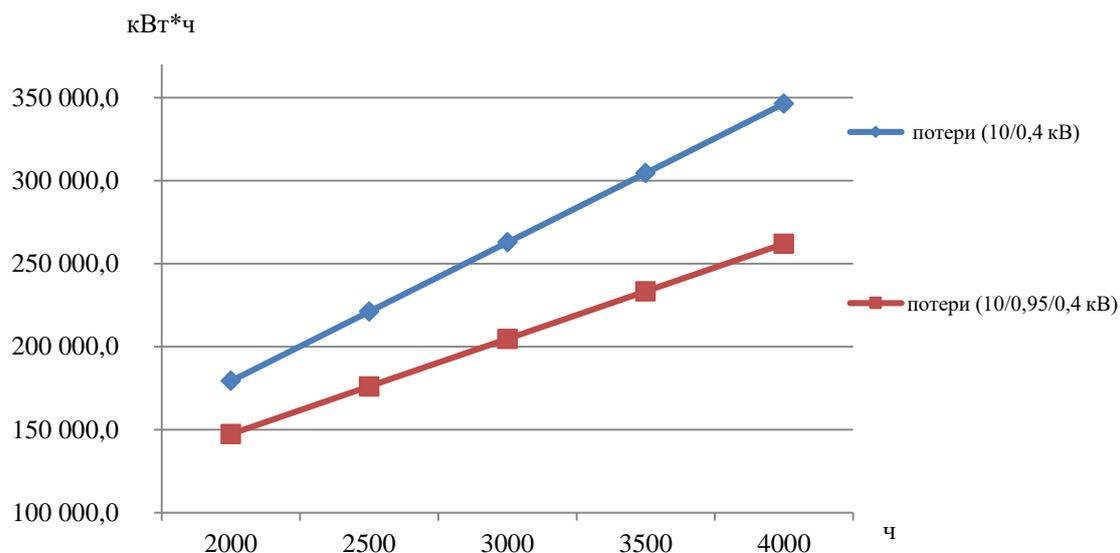


Рис. 5. Зависимость изменения потерь по вариантам схемы при количестве часов от 2000-4000

Расчет составляющих потерь проводился в зависимости от относительной длины линий. За «базу» в 100 % принят вариант, условия которого оговорены в модели.

При исследованиях расстояние между точками подключения потребителей было выбрано от 20 до 80 м, что соответствует реальным расстояниям между точками подключения нагрузки. По отношению к базовому варианту это составляет от 30 до 115 % длины линии. Свыше величины 115 % относительной длины линии исследования не проводились, поскольку в электрически удаленных точках схемы 10/0,4 кВ возможно отклонение напряжения, выходящее за пределы ГОСТ 32144-2013 [5].

На рис. 6 приведены зависимости изменения величин потерь при изменении относительной длины линий.

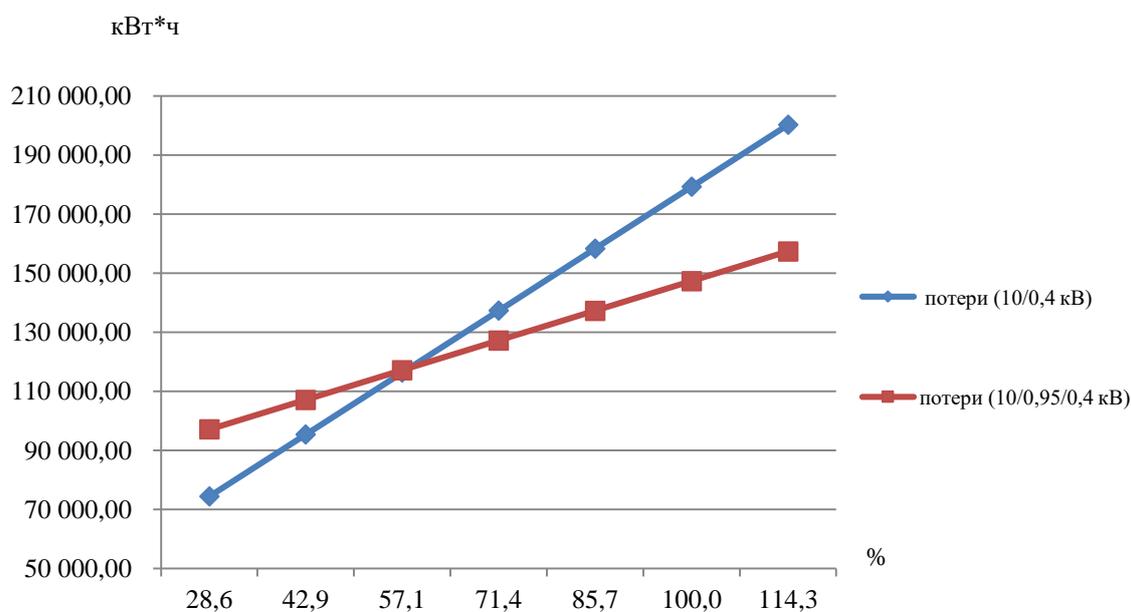


Рис. 6. Зависимость изменения потерь по вариантам схемы при относительном изменении суммарных длин линий

Исследования величины потерь при относительном изменении длин линий показали, что с увеличением длины линии свыше 50 % от базовой величины потери при напряжении 950 В будут ниже, чем при напряжении 0,4 кВ. Наибольшая эффективность будет достигнута при длине линии 115 % при напряжении 950 В.

При относительной величине длины линий менее 50% применение напряжения 950 В не является эффективным.

Расчет составляющих потерь проводился в диапазоне изменения нагрузки от 50 до 100% по отношению к базовой мощности, что соответствует реальному изменению нагрузки небольших предприятий. На рис. 7 приведены зависимости изменения величин потерь при изменении относительной величины нагрузки.

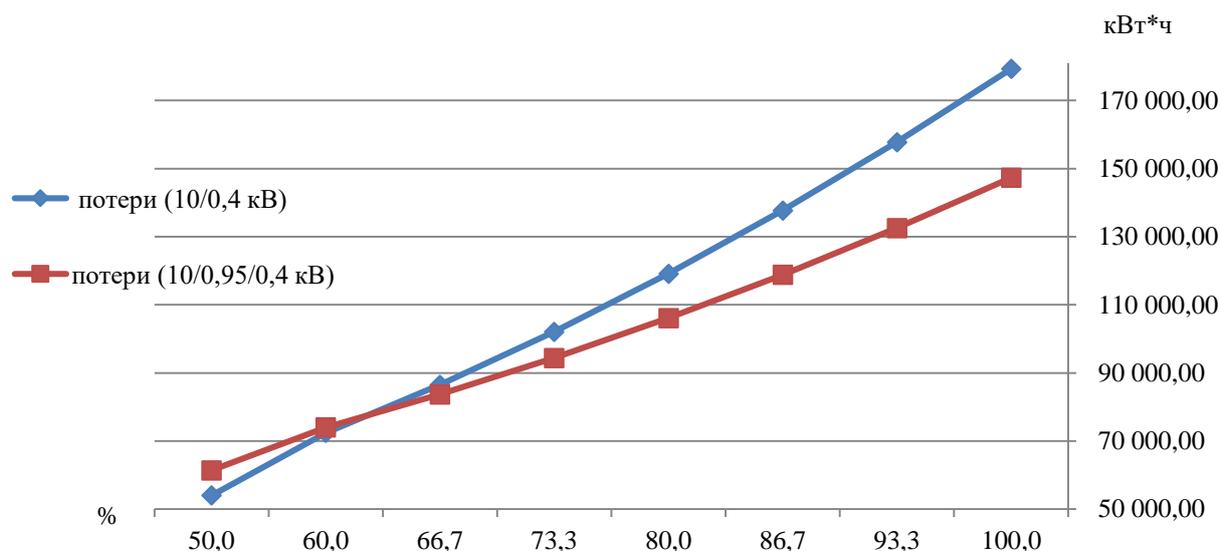


Рис. 7. Зависимость изменения потерь по вариантам схемы при относительном изменении величины нагрузки

Проведенные исследования величины потерь показали, что с увеличением мощности нагрузки свыше 60 % от базовой величины потери при напряжении 950 В будут ниже, чем при напряжении 0,4 кВ. Наибольшая эффективность будет достигнута при номинальной мощности нагрузки для напряжения 950 В.

При относительной величине нагрузки менее 60 % применение напряжения 950 В становится неэффективным.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что применение напряжения 950 В является эффективным, поскольку позволяет снизить потери электрической энергии.
2. Зависимость величины потерь от числа часов расчетного периода показала, что наибольший эффект применения 950 В будет достигнут при величине 4000 ч, т.е. при нагрузке работающей в двухсменном режиме.
3. Зависимость величины потерь от относительной длины линии выявила, что наибольшая эффективность применения напряжения 950 В будет при относительном изменении длины линии 114,3 %.
4. Зависимость величины потерь от величины нагрузки показала, что наибольшая эффективность будет достигнута при номинальной мощности нагрузки для напряжения 950 В.

5. В дальнейших исследованиях при сравнении вариантов схем питания распределенной нагрузки на напряжение 0,4 кВ и напряжении 0,95 кВ необходимо производить технико-экономическое обоснование, которое более полно позволит оценить эффективность применения напряжения 950 В. При его разработке необходимо учитывать капитальные затраты, а также затраты на обслуживание оборудования

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 640 с.
2. «Россети» представили первые результаты эксплуатации уникальной инновационной сети 0,95 кВ». – 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: http://www.rosseti.ru/press/news/?ELEMENT_ID=20268
3. Расчет и экспертиза нормативов технологических потерь электрической энергии при её передаче по электрическим сетям: Комплект нормативно-технологических и учебных материалов. – М.: Межрегиональный институт менеджмента энергоэффективности. 2006. – 214 с.
4. Приказ Минпромэнерго РФ от 04.10.2005 N 267 «Об организации в Министерстве Промышленности и энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.

*Дата поступления
в редакцию: 20.06.2019*

A.B. Loskutov, A.N. Fitasov, S.A. Petritskiy

THE ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF 0.95 KV VOLTAGE IN THE POWER SUPPLY SYSTEM WITH DISTRIBUTED LOAD

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

Purpose: The article discusses the increase of energy efficiency of electrical networks with voltage up to 1000 V due to the use of 950 V.

Design/methodology/approach: The authors have developed a method for estimating the energy efficiency of applying 950 V voltage in electric networks with voltage up to 1000 V in terms of losses. The dependences of losses on various indicators have been studied: load values, line lengths and the number of hours of the calculation period.

Findings: electric power losses are reduced in comparison with the 0.4 kV network when using 950 V voltage. Dependences of electric energy losses are linear when changing the length of the line and the number of hours of the calculation period. Electric energy losses increase less in relation to a circuit with a voltage of 0.4 kV with an increase in the line length and the number of hours of the calculation period in a circuit with a voltage of 950 V. Losses are non-linear with changes in load and the highest efficiency will be achieved at nominal load. The points were found with the values of losses at which it does not make sense to apply a voltage of 950 V in three studies.

Research limitations/implications: This study was conducted for power supply circuits up to 1000 V.

Originality/value: The voltage value of 950 V was applied in the study, which was implemented only in a few pilot projects of the Russian Federation. Energy efficiency rating is given by the use of voltage 950 V.

Key words: energy efficiency assessment, technical losses of electrical energy, voltage 950 V, networks with voltage up to 1000 V.

УДК 621.039.531/534

В.М. Мордвинцев, Н.Г. Кодочигов, Ю.П. Сухарев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВВОДА
В ШАРОВУЮ ЗАСЫПКУ ВТГР СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОСТИ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Целью проведенных исследований являлась отработка методологии оценки усилий внедрения погружных стержней системы компенсации реактивности насыпной активной зоны и прогнозирование усилий внедрения в существующих проектах газоохлаждаемых реакторов, определения эффектов сопутствующих внедрению стержней, а также оценка возможности использования, в качестве резервной, шариковой системы компенсации реактивности. Применялся экспериментально-расчетный подход к определению усилий внедрения погружных стержней, основанный на физическом моделировании процесса внедрения стержней с использованием принципов теории подобия, теории планирования экспериментов с дисперсионным и регрессионным анализом результатов. Разработана степенная зависимость для пересчета результатов модельных испытаний на натурные объекты; получены оценки усилий внедрения стержней в шаровые засыпки активных зон известных проектов ВТГР. Проведено сравнение полученных результатов с данными зарубежных исследований. Установлены особенности и эффекты при заполнении засыпок шаровых твэлов мелкими шариками – поглощающими элементами (пэлами).

Разработанная методология прогнозирования усилий внедрения стержней в шаровые засыпки дает возможность проводить на стадии проектирования реакторов оценку работоспособности погружных стержней и механизмов СУЗ, оптимизировать их конструкцию.

Ключевые слова: система компенсации реактивности, шаровые твэлы, усилие внедрения стержня, дисперсионный и регрессионный анализы, резервная система компенсации реактивности, мелкие поглощающие шары (пэлы).

Введение

При проектировании высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) большой мощности типа проектов ТНТР-300 и ВГ-400 с объемом активной зоны в 700-800 тыс. шаровых твэлов актуален вопрос изучения процесса внедрения в засыпку твэлов погружных стержней компенсации реактивности. В реальных условиях работы установки, а также при полномасштабном моделировании шаровой засыпки это является трудновыполнимой задачей. В связи с этим процессы внедрения изучались путем физического моделирования на разномасштабных моделях активной зоны (а.з.) [1, 2] с последующей оценкой натуральных параметров на полномасштабных фрагментах. Одной из проблем проектирования ВТГР большой единичной мощности с шаровыми твэлами является разработка резервной системы компенсации реактивности. В аварийных ситуациях с разгерметизацией первого контура одним из способов компенсации может быть ввод в активную зону мелких поглощающих шариков (пэлов) [3].

Решению этих проблем посвящена данная работа. Несмотря на то, что приведенные данные по экспериментальным исследованиям получены в период работ по проектированию реактора ВГ-400, в настоящей статье они дополнены новой информацией и переосмыслены, представляя определенную ценность в связи с разработкой и строительством ВТГР с насыпной активной зоной за рубежом, а также возможным продолжением разработки таких реакторов в России.

Постановка задачи исследований

Разработка методологии получения на стадии проектирования реакторов оценок величины усилий внедрения в засыпку шаровых твэлов погружных стержней компенсации реактивности предполагает решение следующих задач:

- получение экспериментальных данных о нагрузках на стержни на моделях активной зоны;
- анализ факторов определяющих на величину нагрузок на стержни;
- разработка зависимостей пересчета полученных данных на натурные условия различных проектов ВТГР.

Экспериментальные исследования внедрения погружных стержней

Целесообразность физического моделирования ввода погружных стержней на полномасштабных фрагментах шаровой засыпки обусловлена возможностью получения необходимой информации при использовании (наличии) минимального количества полномасштабных графитовых макетов шаровых твэлов (диаметром 0,06 м).

Этапы моделирования состоят в следующем [3].

1. На первом этапе на уменьшенных моделях бункера проводятся эксперименты с внедрением группы стержней, в количестве предусмотренным проектом, и определяются усилия внедрения, приходящиеся на единичные стержни, а также в целом на всю группу. Определяется также степень влияния различных факторов на процесс внедрения.
2. На втором этапе на уменьшенных моделях проводятся эксперименты с внедрением одного стержня во фрагменты шаровой засыпки различного объема и определяется фрагмент с диаметром ограничивающей обечайки, обеспечивающий значения по усилиям внедрения аналогичные полученным на первом этапе.
3. На третьем этапе на полномасштабном фрагменте с размерами, определенными на втором этапе, проводятся эксперименты с внедрением единичного стержня в засыпку графитовых макетов шаровых твэлов и определяются (оцениваются) усилия внедрения, миграция шаров и наличие возможных повреждений шаровых элементов для натуральных условий.

В итоге разрабатывается эмпирическая зависимость для пересчета усилий внедрения, получаемых при модельных испытаниях на натурный объект.

Одной из проблем проектирования ВТГР большой единичной мощности с шаровыми твэлами является разработка резервной системы компенсации реактивности. В аварийных ситуациях с разгерметизацией первого контура одним из способов компенсации может быть ввод в активную зону мелких поглощающих шариков (пэлов) [3].

Указанный выше алгоритм проведения исследований по определению усилий при погружении стержней был реализован на моделях активной зоны проекта ВГ-400 с масштабами М1:46; 1:10, 1:3, предусматривающий внедрение в засыпку группы из 55 стержней с диаметром стержня $d_{ст}=2d_{ш}$ на глубину до $80d_{ш}$, а также на фрагменте с графитовыми шарами М1:1. На рис. 1 представлена схема исследования процессов внедрения погружных стержней.

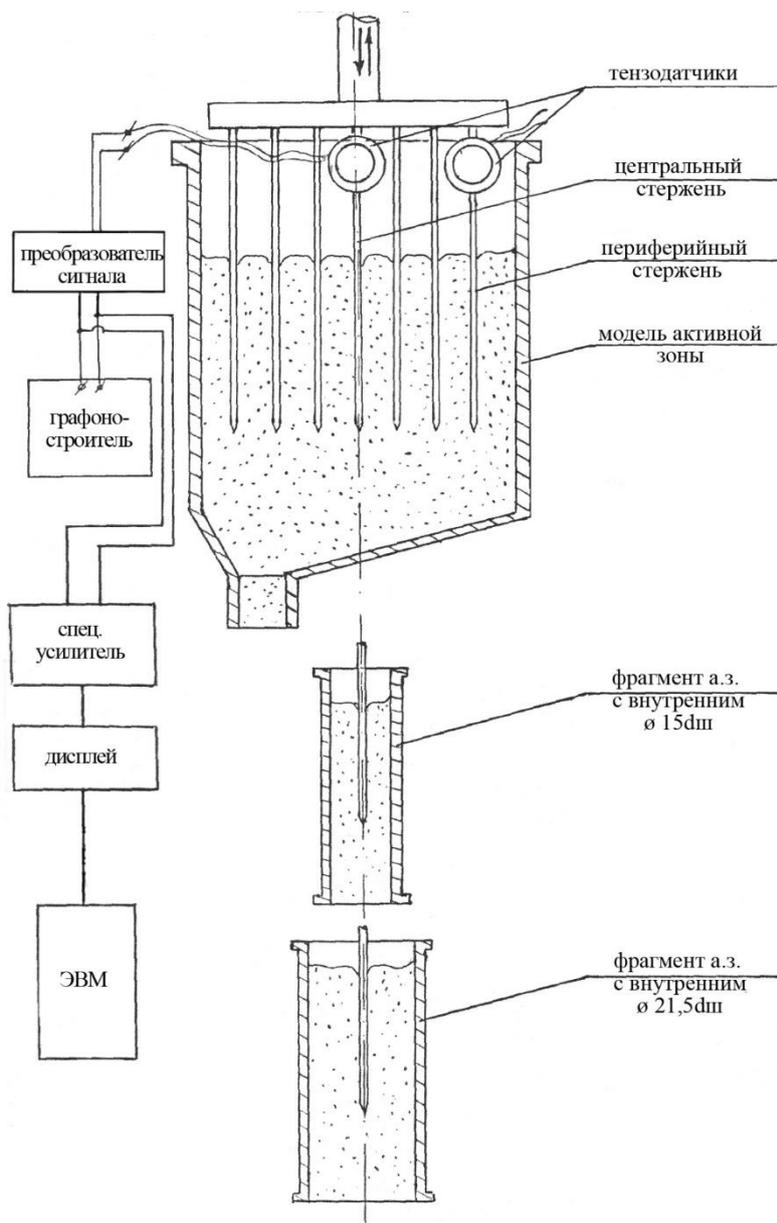


Рис. 1. Схема исследования процессов внедрения погружных стержней

Результаты исследований

На рис. 2 представлены типовые графики распределения усилий внедрения стержней по глубине внедрения (до глубины внедрения 35 диаметров шаров).

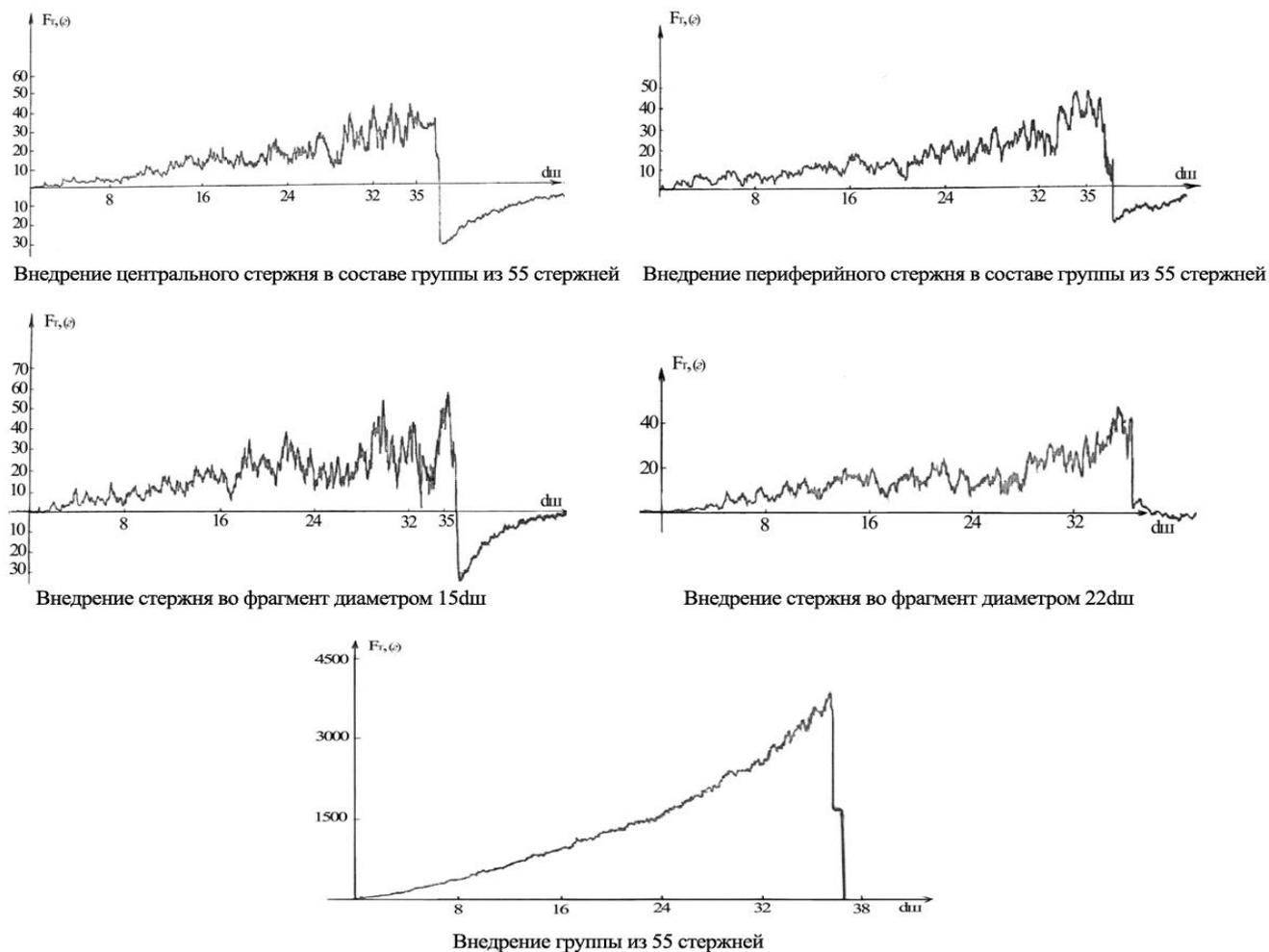


Рис. 2. Типовые графики усилий внедрения стержней в зависимости от глубины погружения

Как видно из графиков, реальный процесс носит характер хаотически чередующихся пиков и спадов осевых нагрузок, особенно интенсивно проявляющийся на единичных стержнях. Наибольший практический интерес как для определения наиболее представительных размеров фрагмента масштаба 1:1 а.з., так и для проектирования механизмов, обеспечивающих процесс внедрения, представляют максимальные нагрузки на стержни (пиковые усилия внедрения), возникающие в процессе погружения стержней на заданную глубину. Однако ввиду того, что доверительные интервалы стохастического распределения максимальных нагрузок, рассчитанные для различных условий моделирования, в большинстве экспериментов по ходу внедрения взаимно перекрываются, возникает вопрос: результаты каких экспериментов можно считать с заданной степенью вероятности отличающимся по усилиям внедрения, а какие имеют статистически незначительные различия. Поставленная задача решается методом проверки статистических гипотез относительно средних [5].

Проведенный таким образом дисперсионный анализ полученных результатов показал, что с вероятностью 97,5 % использование фрагментов а.з с диаметром $22d_{ш}$ и высотой $90d_{ш}$ не приводит к различиям по нагрузкам на стержень от получаемых при внедрениях стержня в модель а.з реактора ВГ-400 в составе группы из штатных 55 стержней на всех глубинах внедрения. Это означает, что фрагмент с данными размерами наиболее полно моделирует усилия внедрения, приходящиеся на единичный стержень в модель активной зоны, и, следовательно, для моделирования на полномасштабных графитовых шарах $d_{ш} = 0,06$ м достаточ-

но иметь не весь объем засыпки, а только ее фрагмент, вмещающий 32 000 шаров. Существенными оказались также и различия в усилиях внедрения центральных и периферийных стержней в составе группы – нагрузки на центральные стержни составляют в среднем 95 % от периферийных.

Интерес представляет также вопрос выявления факторов, существенным образом способных повлиять на величины усилий внедрения стержней. Априори принимались три фактора: степень перегруженности шаровой засыпки (т.е., изменение ее пористости в процессе рециркуляции), внутреннее трение шаровой засыпки и число произведенных последовательных внедрений стержней. С этой целью были спланированы полные трехфакторные эксперименты типа 2^3 [5]. для различных глубин внедрения с варьированием факторов, условно обозначенных А, В, и С на двух уровнях каждый, а именно:

- фактор А на уровнях: А1 (0 – нет перегрузки), А2 (100 % – перегружен один объем засыпки);
- фактор В на уровнях: В1 ($f_{\text{внутр}}=0,12$), В2 ($f_{\text{внутр}}=0,45$);
- фактор С на уровнях: С1 (первое внедрение), С2 (пятое внедрений).

Исследуемыми параметрами (откликами экспериментов) принимались значения максимальных нагрузок \bar{F}_{cm} на единичные стержни в составе группы из 55 стержней в четырех точках по ходу заглупления, а именно: $15d_{ш}$, $35d_{ш}$, $55d_{ш}$, $70d_{ш}$: для периферийного стержня и в пяти (до $80d_{ш}$) для центрального. При этом ввиду пульсирующего характера нагрузок значения нагрузок для последующего анализа брались с трендовой составляющей процесса внедрения, рассчитанной как аппроксимация полиномом второй степени. Получаемая точность такой аппроксимации вполне приемлема для оценок относительного влияния исследуемых факторов в трехфакторном эксперименте.

Эксперименты проводились тремя сериями для оценки воспроизводимости получаемых данных при одинаковых условиях внедрения в каждой серии.

В табл. 1 представлена матрица плана полного трехфакторного эксперимента 2^3 для двух масштабов моделирования М1:46 и М1:10 и глубины внедрения $35d_{ш}$. Здесь же приведены данные по дополнительным экспериментам с $f_{\text{внутр}} = 0,25$ и М1:3, уточняющим исследуемые эффекты. Матрицы плана для других глубин внедрения имеют аналогичную структуру.

Параметр x_0 означает наличие свободного члена в предполагаемой регрессионной модели исследуемых эффектов.

Для оценки влияния изучаемых факторов применялись процедуры дисперсионного и регрессионного анализов.

Таблица 1

Матрица плана полного трехфакторного эксперимента типа 2^3

№ серии эксперимента	x_0	x_1 (перегрузка)	x_2 ($f_{\text{внутр}}$)	x_3 (кол-во внедрений)	Факторы взаимодействия				$\bar{F}_{ст}(кг)$ при $H=35d_{ш}$	
					x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	М1:46	М1:10
1	+	- (перегрузки нет)	- (0,12)	- (первое внедрение)	+	+	+	-	0,031	3,0
2	+	+ (перегрузка есть)	- (0,12)	- (первое внедрение)	-	-	+	+	0,024	2,36

Окончание табл. 1

3	+	- (перегрузки нет)	+ (0,45)	- (первое внедрение)	-	+	-	+	0,108	10,48
4	+	+ (перегрузка есть)	+ (0,45)	- (первое внедрение)	+	-	-	-	0,084 0,081	8,25
5	+	- (перегрузки нет)*	- (0,12)	+ (пятое внедрение)	+	-	-	+	0,03	2,9
6	+	+ (перегрузка есть)	- 0,12	+ (пятое внедрение)	-	+	-	-	0,023	2,28
7	+	- (перегрузки нет)	+ (0,45)	+ (пятое внедрение)	-	-	+	-	0,105	10,14
8	+	+ (перегрузка есть)	+ (0,45)	+ (пятое внедрение)	+	+	+	+	0,0812	7,98
Дополнительные эксперименты										
9		(перегрузка нет)	0,25	(первое внедрение)					0,061	5,62
10		(перегрузка есть)	0,25	(первое внедрение)					0,048	4,67
11		(перегрузка нет)	0,36	(первое внедрение)					M 1:3	
									86,13	
12		(перегрузка есть)	0,36	(первое внедрение)					67,83	

Дисперсионный анализ [6] применялся с целью выявления значимости исследуемых факторов и их взаимодействий с учетом имеющих место погрешностей при воспроизведении однотипных экспериментов. Оценка производилась по экспериментальным значениям F_0 – критерия Фишера относительно его табличного значения $F_{(0,025, 1, 6)} = 8,81$ при задаваемом уровне значимости в 2,5 % и при степенях свободы спланированных экспериментов $f_1 = 1$ и $f_2 = 6$.

Регрессионный анализ [7] применялся для установления количественной взаимосвязи между факторами. Связь между этими переменными характеризуется математической моделью, которая называется уравнением регрессии. В нашем случае ставится задача подбора линейной регрессии вида (1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_r, \quad (1)$$

где β_k – коэффициенты регрессии.

Процедура регрессионного анализа содержит три позиции: расчет коэффициентов регрессии, проверка адекватности принятой модели и проверка значимости коэффициентов.

В табл. 2. приведены результаты дисперсионного и регрессионного анализа трехфакторного эксперимента для глубины внедрения $35d_{ш}$. Для других глубин внедрения проведенные расчеты дали качественно идентичные результаты.

Степень значимости при регрессионном анализе определялась на основе полученных коэффициентов регрессии с учетом величины отклонения отклика.

Таблица 2

Таблица результатов дисперсионного и регрессионного анализа трехфакторного эксперимента для глубины внедрения $35d_{ш}$

Глубина, внедрения	Дисперсионный анализ			Регрессионный анализ	
	Факторы	Экспериментальные значения критерия Фишера F_0 относительно $F_{(0,025, 1, 6)}$	Значимость факторов	Коэффициенты уравнения регрессии	
				M1:46	M1:10
$5d_{ш}$	A	$F_0 > 8,81$	да	$\beta_0 = 0,0604$	$\beta_0 = 5,92$
	B	$F_0 > 8,81$	да	$\beta_1 = -0,0081$	$\beta_1 = -0,71$
	C	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_2 = 0,031$	$\beta_2 = 3,29$
	AB	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_3 = -0,0006$	$\beta_3 = -0,099$
	AC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_4 = -0,004$	$\beta_4 = -0,039$
	BC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_5 = 0,0004$	$\beta_5 = 0,011$
	ABC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_6 = -0,0001$	$\beta_6 = -0,054$
				$\beta_7 = 0,0004$	$\beta_7 = 0,007$

Статистически значимыми с вероятностью 97,5 % можно считать только два фактора: А (степень перегруженности засыпки, влияющая на ее пористость) и В (величина внутреннего трения засыпки $f_{внутр}$). Влияние фактора С (количества последовательных внедрений) не существенно за исключением самых верхних слоев засыпки, где с увеличением количества внедрений образуются углубления под местами входа стержней. Факторы взаимодействия также можно считать несущественными. Таким образом, с учетом, что $\beta_2 > \beta_1$, трение является фактором, определяющим (при прочих равных условиях) величину усилий внедрения. В табл. 3. приведены усредненные данные по усилиям внедрения периферийного стержня в составе группы из 55 стержней в предварительно однократно перегруженную засыпку в зависимости от масштаба моделирования, коэффициента трения и материала шаров с разбивкой по диапазонам глубины внедрения.

Таблица 3

Усилия внедрения единичных стержней в составе группы 55 стержней

Масштаб модели, материал шаров	Коэффициент трения ($f_{внутр}$)	Глубина внедрения (в диаметрах шаров)			
		(15-30) $d_{ш}$	(30-50) $d_{ш}$	(50-70) $d_{ш}$	(70-80*) $d_{ш}$
		Усилия внедрения стержня (кг)			
M1:46, сталь	0,12	0,011-0,022	0,022-0,036	0,036-0,061	0,061-0,072
	0,25	0,019-0,045	0,045-0,075	0,075-0,126	0,127-0,155
	0,45	0,031-0,072	0,072-0,136	0,136-0,229	0,229-0,278
M1:10, сталь	0,12	1,06-2,18	2,14-3,54	3,54-5,96	5,96-7,15
	0,25	1,85-4,18	4,18-7,35	7,35-12,25	12,35-15,25
	0,45	3,03-7,01	7,01-13,88	13,88-22,28	22,28-27,06
M1:3, стекло	0,36	26,4-60,1	60,0-118,5	118,5-186,1	186,1-224,9
M1:1** графит	0,18	291-635	636-1085	1086-1800	1800-2235

*) внедрение единичного стержня по центру модели

***) внедрение во фрагмент диаметром $22d_{ш}$ и высотой $90d_{ш}$

Используя полученные экспериментальные данные по усилиям внедрения погружных стержней, составлена в соответствии с принципами теории подобия эмпирическая аппрокси-

мационная зависимость для пересчета результатов модельных испытаний на предполагаемые натурные условия реактора (2):

$$F_{ст(н)} = F_{ст(м)} \left(\frac{M_n}{M_m} \right)^3 \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_m} \right) \left(\frac{f_n}{f_m} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где $F_{ст(н)}$, $F_{ст(м)}$ – соответственно натурные и модельные усилия внедрения;

$\frac{M_n}{M_m}$, $\frac{\gamma_n}{\gamma_m}$, $\frac{f_n}{f_m}$ – соответственно отношения масштабов, удельных весов (насыпной плотности с учетом пористости засыпки) и коэффициентов трения натуральных и модельных шаров.

Коэффициент α , представленный в табл. 4, выбирается в соответствии с диапазоном глубины внедрения стержня. Здесь также представлены результаты пересчета модельных испытаний на условия однократно перегруженной активной зоны реактора ВГ-400. Следует отметить, что в аналогичном соотношении, предложенном при проектировании реактора ТНТР-300 (Германия), значение $\alpha = 0,28$ [8]. По нашим данным, полученным по результатам испытаний в широком спектре коэффициентов трения, эту величину следует считать заниженной (табл. 4). Вызывает сомнение также и значение показателя степени при соотношении удельных весов, принятое равным 1,2. Исходя из физического смысла и по данным наших исследований этот показатель должен быть равным 1.

Таблица 4

Расчетные значения усилий внедрения стержня в реакторе ВГ-400

Пересчет на условия реактора по формуле (1)	Коэффициент трения ($f_{внутр}$)	Глубина внедрения (в диаметрах шаров)			
		15-30 $d_{ш}$	30-50 $d_{ш}$	50-70 $d_{ш}$	70-80* $d_{ш}$
		Значение коэффициента α			
		0,8-0,9	0,9-1,0	1,0-1,02	
		Усилие внедрения стержня (кг)			
0,12	210-445	445-740	740-1205	1205-1475	
0,25	378-860	855-1540	1505-2530	2530-3120	
0,45	605-1460	1440-2775	2775-4580	4570-5680	

Для глубины внедрения $35d_{ш}$ имеем:

1. После стартовой загрузки: $F_{ст} = 615\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,12$); $F_{ст} = 1220\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,25$); $F_{ст} = 2150\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,45$).
2. После рециркуляции одного объема: $F_{ст} = 480\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,12$); $F_{ст} = 960\text{ кг}$ ($f_{внутр} = 0,25$); $F_{ст} = 1680\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,45$).

Таким образом, установлено, что максимальные усилия внедрения после выхода засыпки в установившийся режим движения составляет до $F_{ст} = 5,6-5,7\text{ т.}$ (при погружении на максимальную глубину $80d_{ш}$. и ожидаемом коэффициенте трения $f_{внутр} = 0,45$). В начальный период после стартовой загрузки реактора усилия будут несколько выше $F_{ст} = 7,1-7,2\text{ т.}$ Следует отметить, что по данным [8] нагрузка на стержень на глубине $80d_{ш}$ ($4,8\text{м}$) при $f_{внутр} = 0,54$ составила $F_{ст} = 7\text{т.}$ В целом по глубинам нагрузки на стержень, представленные в [8], весьма незначительно отличаются от оценок, полученных при наших исследованиях.

Значительным недостатком, помимо больших усилий внедрения и осевых нагрузок на стержни, являются имевшие место случаи повреждения шаров (образование выщербин и сколов). По данным [8], эффективным способом снижения вероятности повреждения твэл является применение усовершенствованной конструкции наконечника стержня в виде лункообразного углубления, захватывающего один твэл и снижающего тем самым удельные нагрузки в точках касания. К недостаткам следует относить увеличение давления засыпки твэлов на блоки отражателей, а также миграцию твэлов в процессе циклов внедрения – извлечения стержней. При этом стержни заглубляют единичные шары на $\approx 2d_{ш}$, но в то же время вся свободная поверхность засыпки приподнимается на $\approx d_{ш}$. При извлечения стерж-

ней происходит дополнительная миграция до $5-6d_{ш}$ в результате заполнения шарами образующихся каналов (пустот) под местами внедрения.

Эксперименты по внедрению мелких поглощающих элементов (пэлов) в засыпку твэл

В проведенных экспериментах по внедрению мелких поглощающих шаров в засыпку твэл объектами испытаний были два варианта фрагментов шаровых засыпок со стальными шарами диаметром 0,008 м и графитовыми шарами диаметром 0,06 м. В качестве имитаторов пэлов использовались соответственно стальные шарики диаметром 0,0013 м и графитовые диаметром 0,01 м. В первом варианте фрагмент представлял собой обечайку диаметром $10d_{ш}$, заполненную стальными шарами-имитаторами твэл диаметром $d_{ш} = 0,008$ м, по оси которой поочередно вводились в засыпку стальные шары-имитаторы пэл диаметром 0,0013 м в количестве 100 шт. При подаче мелких шаров с небольшой высоты (не более $d_{ш}$) только 2,3 % шаров проникало глубже $14d_{ш}$. Основная масса (до 73 %) двигалась под точкой ввода в зоне одного $d_{ш}$. Картина резко менялась при увеличении высоты падения шаров до $11d_{ш}$: через слой шаров в $14d_{ш}$ прошло 23 % мелких шаров, причем 85 % их двигалось в пристеночной зоне фрагмента. Это очевидно объясняется увеличением зоны рассеивания шаров при отскоке от поверхности засыпки и снижением тем самым вероятности заклинивания их в результате сводообразования в проходных сечениях засыпки.

Во втором варианте эксперименты проводились на фрагменте пристеночной области а.з. проекта ВГМ М1:1, заполненный графитовыми шарами $d_{ш} = 0,06$ м в количестве 1900 шт. Заполнение фрагмента проводилось свободным падением шаров с высоты $5d_{ш}$ порциями по 3-4 шт. В качестве шаров-имитаторов пэл использовались графитовые шарики диаметром 0,01 м, подаваемые на поверхность засыпки в количестве 420-470 шт. с высоты $7d_{ш}$. Установлено, что зона проникновения (распределение) имитаторов пэл во фрагменте существенным образом зависит от способа их подачи:

- при поштучной подаче шариков всю высоту фрагмента засыпки $14d_{ш}$ проходит 66 % шаров; остальные распределяются в вышележащих слоях, в том числе, 3 % непосредственно вблизи свободной поверхности;
- при поштучно-групповой подаче («цепочкой») порциями по 10 шт. – только 38 % проходит всю высоту засыпки, а 34 % задерживаются в районе свободной поверхности;
- при групповой (массовой) подаче одновременно всех используемых шариков только 12 % проходят всю высоту засыпки фрагмента, а 54 % задерживаются вблизи свободной поверхности;
- во всех трех вариантах зона проникновения по радиусу фрагмента составила $4d_{ш}$, причем вдоль боковой стенки задерживается 74-82 % шариков, а по азимуту зона проникновения составляет не менее 360, причем 35-85 % шариков группируются под местом ввода.

Таким образом, максимальные проблемы с проникновением пэлов в засыпку твэл возникают при массовой подаче их в а.з. в режиме компенсации реактивности, решение которых состоит в выборе оптимального способа подачи пэлов в сочетании с уменьшением их диаметра до размеров не более $1/5$ максимального размера проходного сечения в шаровой засыпке. Эта величина составляет $0,155d_{ш}$, т.е. для твэл с $d_{ш} = 0,06$ м, пэлы должны иметь диаметр 0,003 м. Другой серьезной проблемой рассмотренного способа компенсации реактивности является вывод поглощающих шариков из засыпки для последующего выхода реактора в критическое состояние, что требует специальных дополнительных исследований.

Заключение

Установлено, что максимальные усилия внедрения стержней после выхода засыпки в установившийся режим движения составляют до $F_{ст} = 5,6-5,7$ т. (при погружении на максимальную глубину $80d_{ш}$. и ожидаемом коэффициенте трения $f_{внутр} = 0,45$). В начальный период после стартовой загрузки реактора усилия будут несколько выше $F_{ст} = 7,1-7,2$ т.

Наибольшие проблемы с проникновением пэлов в засыпку твэл возникают при массовой подаче их в а.з в режиме компенсации реактивности, решение которых состоит в выборе оптимального способа подачи пэлов в сочетании с уменьшением их диаметра до размеров не более $1/5$ максимального размера проходного сечения в шаровой засыпке. Эта величина составляет $0,155d_{ш}$, т.е., для твэлов с $d_{ш} = 0,06$ м, пэлы должны иметь диаметр $0,003$ м.

Библиографический список

1. **Богоявленский, Р.Г.** Определение усилий при внедрении моделей стержней в шаровую засыпку / Р.Г. Богоявленский, П. Лубны-Герцык, Ю.Д. Никифоров // ВАНТ. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. – 1982. – Вып.1(11). – С. 85.
2. **Мордвинцев, В.М.** Влияние технологических факторов на внедрение стержней в шаровую засыпку / В.М. Мордвинцев, В.В. Милов и др. // ВАНТ, сер. Ядерная энергетика и технология. – 1990. – Вып.2. – С. 68-70.
3. **Карпов, В.А.** Компенсация реактивности мощных реакторов НТР с шаровыми твэлами / В.А. Карпов, Н.Б. Адамова // Атомная техника за рубежом. – №11. – С. 1979.
4. **Мордвинцев, В.М.** Способ испытаний регулирующих стержней, погружаемых в шаровую засыпку / В.М. Мордвинцев, А.С. Майзус, А.Г. Любимый, В.В. Булыгин, В.А. Чуманин // А.С. СССР № 1279418, от 22.08.1985 г.
5. **Монтгомери, Д.К.** Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 491 с.
6. **Шеффе, Г.** Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
7. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. Applied Regression Analysis. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Диалектика, 2007. – С. 912.
8. Физико-механические исследования и расчеты конструкций оборудования атомных энергетических установок. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1975. – 340 с.

*Дата поступления
в редакцию: 01.03.2019*

V.M. Mordvintsev, N.G. Kodochigov, Yu.P. Sukharev

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESSES OF INPUT IN HTGR PEBBLE BED
MEANS OF REACTIVITY COMPENSATION**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering, JSC «Afrikantov OKBM»

Purpose: the purpose of the lead researches was developing of methodology of an estimation of efforts of introduction on control rods of reactivity compensation system at theirs inserting into pebble bed and forecasting of efforts of introduction in existing gas cooled reactors projects, definition of effects of cores accompanying control rods introduction, and also an estimation of an opportunity of use as reserve ball system of reactivity compensation.

Methodology approach: in the lead researches the experimentally-calculated approach to definition of efforts of introduction of sinking control rods, based on physical modelling of process of introduction of cores with use of principles of the theory of similarity, the theory of planning of experiments with dispersive and regression analyses of results was applied.

Results: received volume of experimental data-settlement and their analysis have allowed to develop analytical dependences with which use estimations of efforts of introduction of control rods in fuel element pebble bed cores of known HTGR projects. The comparison of the received results with data of foreign researches was made. Features and effects are established at filling of fuel pebble bed by fine balls-absorbing elements.

Conclusions: the developed methodology of forecasting of efforts of introduction of control rods into fuel element pebble bed enables to spend on a design stage of reactors of an estimation of working capacity sinking control rods and mechanisms of Control and Safety System to optimize their design.

Keywords: reactivity compensation system, spherical fuel elements, effort of introduction of control rod, dispersive and regression analyses, reserve reactivity compensation system, fine absorbing spheres.

УДК 621.314

В.Ф. Стрелков, А.Б. Дарьенков, Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке квазирезонансного преобразователя (КРП) для вторичных источников питания в системах электроснабжения ограниченной мощности. Для увеличения диапазон регулирования напряжения и снижения уровня его пульсаций, в конструкцию КРП введен шунтирующий транзистор. Описана математическая модель предложенного КРП, с помощью которой определены количественные соотношения между параметрами элементов силовых цепей преобразователя. Разработана Simulink-модель, позволяющая исследовать электромагнитные процессы в КРП в режиме реального времени. Получены внешние характеристики КРП и определены рациональные параметры компонентов преобразователя.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь, регулирование напряжения, рекуперация энергии, система электроснабжения, широтно-импульсная модуляция.

Введение

Развитие автономных систем ограниченной мощности имеет большое значение для экономики государства. К автономным объектам могут относиться: удаленные населенные пункты, объекты добывающей промышленности и сельского хозяйства, больницы, передвижные и мобильные объекты малой мощности (маяки, метеостанции и т.д.) Для электроснабжения потребителей в таких системах применяются дизельные или гибридные (комбинированные) источники энергии на основе возобновляемых энергоресурсов. Надежность и качество электроснабжения потребителей зависит от многих факторов, в том числе, от работы вторичных источников питания, необходимых для функционирования ответственных узлов электростанций (блоков системы управления, электроприводов и др.) Важным функциональным узлом вторичных источников питания являются преобразователи электроэнергии. Перспективным видом являются квазирезонансные преобразователи (КРП) [1]. Токи в цепях КРП имеют колебательный характер, в результате чего включение и выключение транзисторов всегда происходит при нулевых значениях тока [2, 3]. КРП обладают высоким уровнем электромагнитной совместимости, широким диапазоном регулирования выходного напряжения, малыми массой и габаритами [4, 5].

Традиционным способом регулирования выходного напряжения в КРП является частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) [6]. Однако ЧИМ обладает рядом серьезным недостатком – увеличение пульсаций выходного напряжения и тока при широком диапазоне регулирования. Следствием этого является узкий диапазон регулирования выходного напряжения (70-100 %), возрастание пульсаций выходного напряжения [7]. Для решения этой проблемы в КРП с ЧИМ могут быть использованы фильтры, настроенные на подавление пульсаций. Однако такой подход приводит к увеличению габаритов КРП или уменьшению динамического диапазона регулирования. Проблема непостоянства рабочей частоты может быть решена путем использования в КРП другого способа регулирования выходного напряжения – широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [8]. Однако для работы КРП в режиме ШИМ необходимо решение задачи оперативного изменения параметров колебательного контура [9].

Для изменения параметров колебательного контура могут быть использованы механические и электрические способы. Механический способ заключается в применении кон-

денсаторов переменной емкости, вариометров, электромеханических реле. Однако данный способ неэффективен из-за низкого быстродействия. Электрический способ заключается в применении элемента с изменяющейся под действием электрического сигнала индуктивностью (катушка индуктивности) или емкостью (варикап). Недостаток использования катушки индуктивности связан со снижением КПД преобразователя. Варикапы не рассчитаны на большую реактивную мощность и их использование в КРП ограничено.

Альтернативными способами управления выходным напряжением КРП являются использование комбинированных схем (ЧИМ с несколькими фиксированными частотами резонансного контура), регулирование выходного напряжения с помощью фазоимпульсного управления (ФИУ) [10]. В [11] для расширения диапазона регулирования напряжения предложено подавлять паразитные колебания путем подключения дополнительного диода. Однако данные способы также обладают рядом недостатков. Поэтому актуальной задачей является разработка и исследование способов регулирования выходного напряжения КРП с фиксированной частотой, широким диапазоном регулирования выходного напряжения и естественным ограничением тока нагрузки.

В настоящей статье представлено исследование и разработка способа регулирования выходного напряжения КРП с переключением при нуле тока в режиме ШИМ путем рекуперации избытка энергии с выхода КРП на его входной конденсатор [12]. Для этого в схеме КРП используется регулирующий транзистор, шунтирующий первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Предложенное решение позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения КРП в пределах от 0 до 100 % номинального значения, ограничить токи нагрузки, снизить уровень пульсаций выходного напряжения, минимизировать массогабаритные параметры трансформатора и выходного фильтра.

Математическая модель КРП

Принципиальная схема предлагаемого КРП представлена на рис. 1. В отличие от существующих КРП, здесь введены диодный мост VD3 и регулирующий транзистор VT3. Назначение VT3 – шунтирование первичной обмотки трансформатора TV, для рекуперации энергии обратно в сеть (в конденсатор C1). Изображен преобразователь, выполненный по мостовой схеме, однако он может быть построен и на полумостовой схеме. В преобразователе с полумостовой схемой входной конденсатор C1 состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов. При постоянном уровне напряжений каждого из них процессы в полумостовой схеме не отличаются от представленной. В схемах замещения и в расчетных формулах в этом случае следует значение напряжения источника питания U_{Π} заменить на $U_{\Pi}/2$. С целью упрощения анализа электромагнитных процессов в КРП приняты, следующие допущения: вентильные элементы обладают свойствами идеальных ключей; трансформатор TV1 идеален (магнитная цепь линейна, индуктивные и активные сопротивления обмоток, потери в магнитопроводе равны нулю), коэффициент трансформации равен единице; потери в C2, а также конденсаторе фильтра C1 равны нулю; потери мощности КРП сосредоточены в сопротивлении R1, включенном последовательно с элементами резонансного контура

При сделанных допущениях по принципиальной схеме КРП (рис. 1): U_H – напряжение емкостного накопителя C_H ; L_1 , C_2 , – индуктивность, емкость дросселя L1 и конденсатора C2; R_1 – активное сопротивление элементов резонансного контура; L_k – индуктивность рассеяния трансформатора TV1.

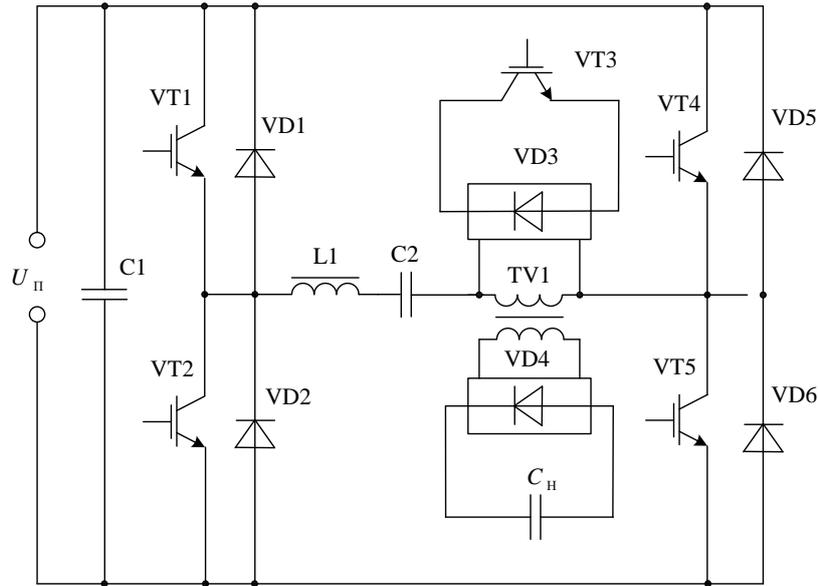


Рис. 1. Принципиальная схема КРП:

VT1, VT2, VT4, VT5 – транзисторы инвертора, VT3 – регулирующий транзистор, VD1, VD2, VD5, VD6 – шунтирующие диоды, VD3, VD4 – выпрямительные мосты, U_{Π} – напряжение питания, C1 – конденсатор входного фильтра, L1, C2 – дроссель и конденсатор резонансного контура, TV1 – трансформатор; C_H – емкостный накопитель

В каждом полупериоде работы зарядного преобразователя можно выделить интервалы, порядок и наличие которых, в свою очередь, может различаться, в зависимости от режима работы преобразователя (момента включения транзисторов: VT1, VT2, VT3, VT4, VT5) [13]. Происходит циклическое переключение транзисторов и смена их интервалов проводимости. Каждому интервалу проводимости соответствует система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы. Определенные интервалы проводимости и их системы дифференциальных уравнений образуют математическую модель КРП.

Дифференциальные уравнения, приведены к относительным единицам.

Относительные значения переменных и параметров модели преобразователя определяются выражениями (1):

$$U_{H}^* = \frac{U_H}{U_{\text{баз}}}; U_{ij}^* = \frac{U_{ij}}{U_{\text{баз}}}; u_{ij}^* = \frac{u_{ij}}{U_{\text{баз}}}; I_{Hi}^{**} = \frac{I_{Hi}^*}{I_{\text{баз}1}}, \quad (1)$$

где $i = 1 \dots 4$ – номер режима; $j = 0 \dots 5$ – номер интервала (нулевой интервал соответствует промежутку времени перед первым интервалом).

В качестве базисных приняты следующие величины (2):

$$U_{\text{баз}} = U_{\Pi}; I_{\text{баз}1} = \frac{U_{\text{баз}}}{\omega_1 \cdot L}; I_{\text{баз}2} = \frac{U_{\text{баз}}}{\omega_2 \cdot L_1}, \quad (2)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left[\frac{R}{2L}\right]^2} = \omega_{01} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}}$ и $\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2} - \left[\frac{R}{2L_1}\right]^2} = \omega_{02} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}}$ – круговые

частоты собственных колебаний резонансного контура на интервале с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно; $L = L_1 + L_k$ – индуктивность резонансного

контура; $\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{LC_2}}$ и $\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1C_2}}$ – круговые частоты собственных колебаний контура на 1-м интервале без учета потерь с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно; $Q_1 = \frac{\omega_{01} \cdot L}{R}$ и $Q_2 = \frac{\omega_{02} \cdot L_1}{R}$ – добротности силового контура на первом интервале работы с выключенным и включенным транзистором VT3 соответственно.

При этом следует учитывать следующие зависимости:

$\theta_1 = \omega_1 \cdot t$ и $\theta_2 = \omega_2 \cdot t$ – циклическая частота собственных колебаний контура с выключенным и с включенным транзистором VT3;

$\vartheta_j^1 = \omega_1 \cdot t_j$ и $\vartheta_j^{11} = \omega_2 \cdot t_j$ – угловые длительности j -го интервала работы контура с выключенным и с включенным транзистором VT3.

Соотношение добротностей контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (3):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} = \sqrt{\frac{L_k}{L_1} + 1}. \quad (3)$$

Соотношение собственных частот колебания контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (4):

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}. \quad (4)$$

Соотношение базисных токов контура с выключенным и с включенным транзистором VT3 (5):

$$\frac{I_{\text{баз1}}}{I_{\text{баз2}}} = \frac{Q_2^2 \cdot \sqrt{4Q_2^2 - 1}}{Q_1^2 \cdot \sqrt{4Q_1^2 - 1}}. \quad (5)$$

Учитывая вышеизложенное, представлены выражения в относительных единицах для I-го режима работы КРП, когда включены транзисторы VT1, VT5 (6-8).

$$\begin{cases} i_{11}^* = (1 + U_{10}^* - U_H^*) \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \cdot \sin \theta_1; \\ u_{11}^* = (1 - U_H^* + U_{10}^*) \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot Q_1}{\sqrt{4 \cdot Q_1^2 - 1}} \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \cdot \sin(\theta_1 - \xi_1) \right] - U_{10}^*; \\ U_{11}^* = (1 + U_{10}^* - U_H^*) \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \right) - U_{10}^*; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} i_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \cdot \theta_1} \sin \theta_1; \\ u_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot Q_1}{\sqrt{4 \cdot Q_1^2 - 1}} \sin(\theta_1 + \xi_1) \cdot e^{\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \cdot \theta_1} \right) - U_{11}^*; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}} \right) - U_{11}^*; \\ I_{H1}^* = \frac{(U_{11}^* + U_{10}^*)}{2\pi} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \right), \end{cases} \quad (8)$$

где: $\xi_1 = \arcsin \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{2Q_1}$ – фазовый угол; U_{10}^* – относительное начальное напряжение конденсатора $C2$ на первом интервале полупериода работы преобразователя (до первого интервала);

U_{12}^* – относительное начальное напряжение на втором интервале полупериода работы преобразователя; U_H^* – относительное напряжение конденсатора C_H ; i_{11}^* – относительный мгновенный ток резонансного контура на первом интервале полупериода работы преобразователя; i_{12}^* – относительный мгновенный ток резонансного контура на втором интервале полупериода работы преобразователя; I_{H1}^* – средний ток заряда конденсатора C_H для рассматриваемого режима работы КРП; u_{11}^* – относительное мгновенное напряжение конденсатора C_2 ; U_{11}^* – относительное начальное напряжение конденсатора C_2 .

Аналогично получены выражения для других режимов работы КРП [14].

На основе полученной математической модели выявлены основные закономерности процессов, происходящих в преобразователе, выполнены расчёты, которые позволили установить количественные взаимосвязи между параметрами элементов силовых цепей. Результатами моделирования являются кривые изменения напряжения на конденсаторе $C2$, ток диагонали схемы, ток нагрузки ток транзистора и среднее значение приведенного тока C_H (I_H^{**}) в различных режимах работы схемы для одного полупериода работы преобразователя.

Внешние характеристики КРП

Перебирая напряжение нагрузки U_H^* с определенной дискретизацией, при некоторых фиксированных углах управления β транзистором VT3, можно получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения нагрузки U_H^* от среднего значения приведенного тока нагрузки I_H^{**} при различных углах управления β). Внешние характеристики преобразователя представлены на рис. 2.

Внешняя характеристика при отсутствии импульсов управления является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки $0 \leq I_H^{**} \leq 1$ и абсолютно мягкой при $I_H^{**} = 1$. Внешняя характеристика, соответствующая углу управления $\beta = 2 \cdot \pi$ является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки, $0 \leq I_H^{**} \leq 0,5$ с уровнем напряжения $U_H^* = 1$, а при значениях тока нагрузки $0,5 \leq I_H^{**} \leq 1$ с уровнем напряжения $U_H^* = 0,5$.

При значении тока нагрузки $I_H^{**} = 0,5$ и $I_H^{**} = 1$ характеристика абсолютно мягкая. Внешняя характеристика, соответствующая углу управления, $\beta = \pi$, является абсолютно жесткой при значениях тока нагрузки $0 \leq I_H^{**} \leq 0,5$ с уровнем напряжения, $U_H^* = 1$ и абсолютно мягкой при $I_H^{**} = 0,5$. Характеристика при β , стремящейся к нулю, стремится к абсолютно мягкой с нулевым током нагрузки. Характеристики, при других углах управления β , занимают промежуточные значения.

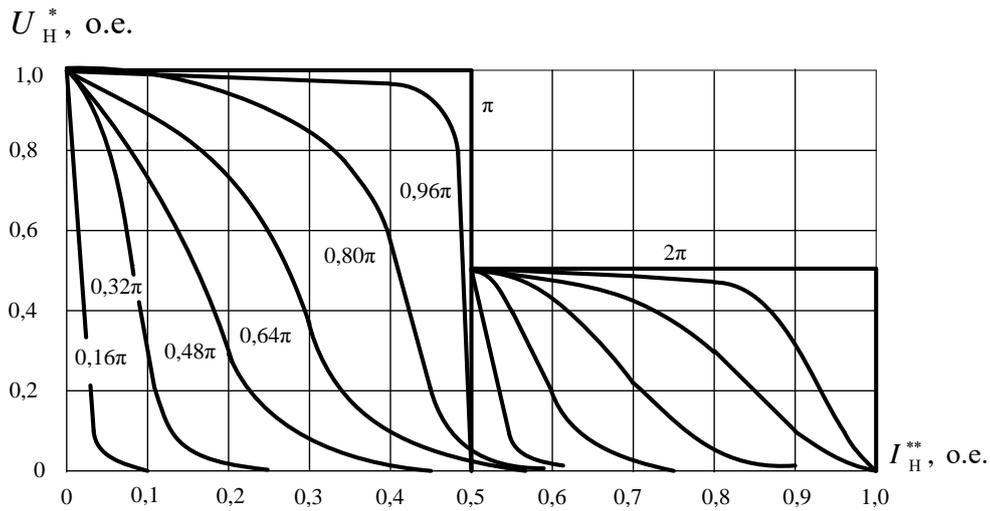


Рис. 2. Внешние характеристики КРП

Имитационная модель КРП

Для исследования особенностей электромагнитных процессов в КРП в среде *MATLAB Simulink* создана имитационная модель (рис. 3), реализованная в соответствии со схемой полумостового преобразователя.

Модель состоит из следующих блоков: источника постоянного напряжения *DC*, конденсаторов полумоста *C1* и *C2*, транзисторов *IGBT1* и *IGBT2* с обратными диодами *D4* и *D3*, резонансного дросселя *L1* и резонансного конденсатора *C3*, индуктивности рассеяния трансформатора *Lk*, выпрямительного моста нагрузки *Universal Bridge1*, накопительного конденсатора *Cn*, противо-ЭДС нагрузки *DC1*, а также выпрямительного моста *Universal Bridge* шунтирующего транзистора *IGBT3*, система управления которым представлена подсистемой *PWM-controller2*, на вход которой подается сигнал задания в диапазоне 0-5, меняющий скважность импульсов управления.

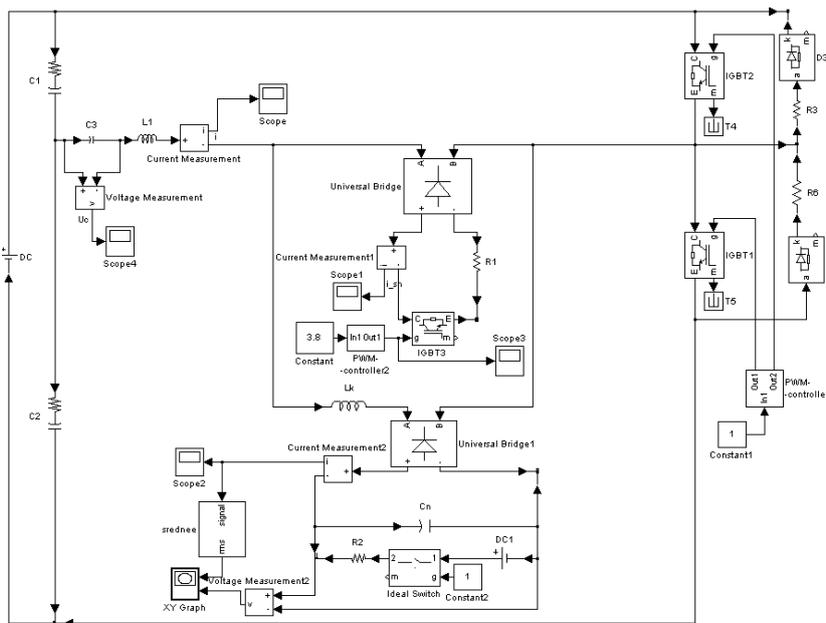


Рис. 3. Имитационная модель КРП

На рис. 4 показаны осциллограммы тока диагонали схемы, напряжения на резонансном конденсаторе, полученные в результате моделирования.

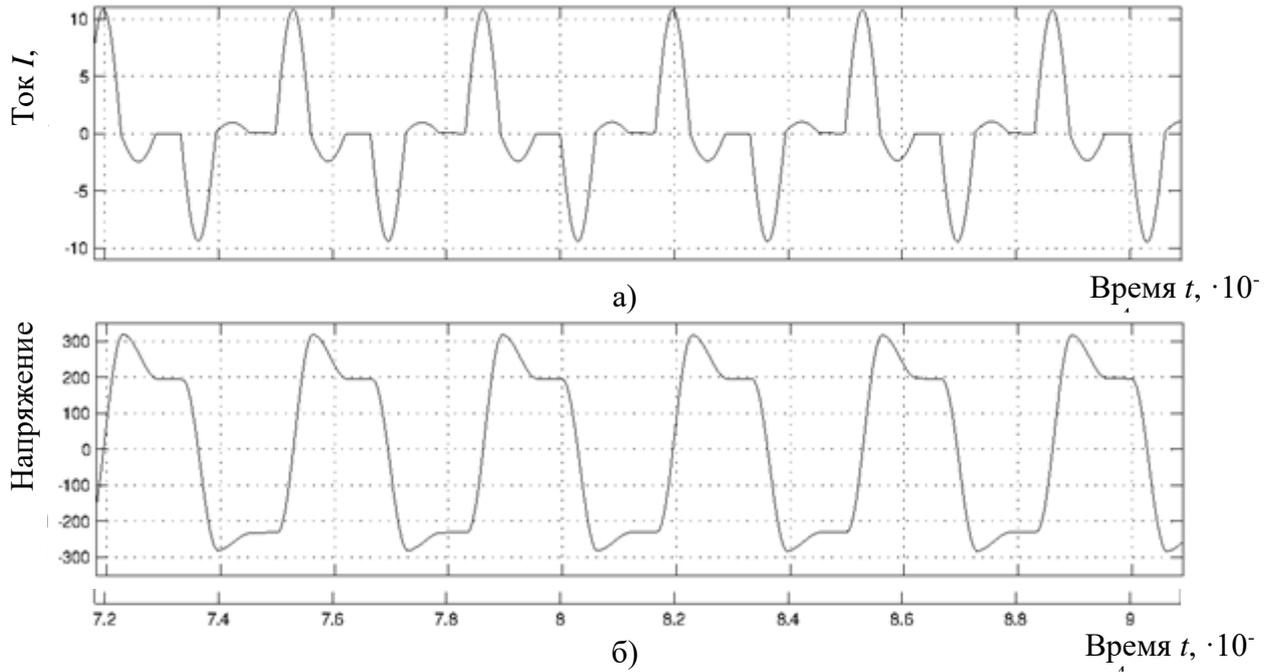


Рис. 4. Осциллограммы работы КРП (без регулирования):
 а) ток диагонали схемы, б) напряжение на резонансном конденсаторе

Если вместо противо-ЭДС в цепь нагрузки включить конденсатор, и построить зависимость напряжения нагрузки от среднего тока нагрузки, то результатом моделирования будет внешняя характеристика преобразователя. Семейство внешних характеристик при различных углах управления представлены на рис. 5.

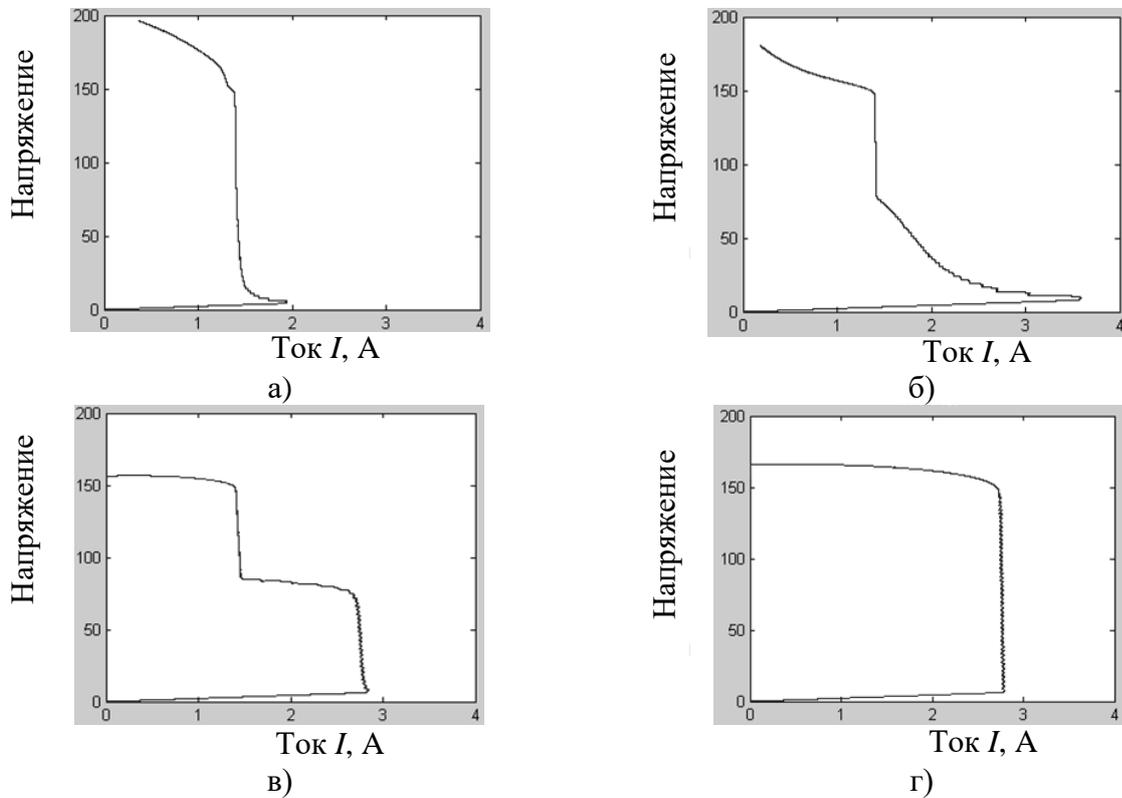


Рис. 5. Внешние характеристики КРП при различных углах управления:
 а) $\beta = 1,1 \cdot \pi$, б) $\beta = 1,85 \cdot \pi$, в) $\beta = 2 \cdot \pi$, г) без импульсного управления VT3

Имитационная модель КРП, в отличие от аналитической, является более точной, т.к. имеет меньшее количество допущений и использует более сложное описание отдельных (в частности, полупроводниковых) элементов. При этом осциллограммы процессов, полученные при имитационном моделировании, незначительно отличаются от кривых, полученных при аналитическом моделировании, что говорит о правильности сделанных в ходе теоретического описания допущений. Другим достоинством имитационной модели является возможность, при необходимости, наблюдения работы системы в динамике – при включении КРП, при заряде емкостного накопителя и т.д.

Экспериментальное исследование КРП

Исследования режимов работы КРП на имитационной модели позволили рассчитать параметры основных элементов преобразователя. Полученные результаты легли в основу экспериментального образца КРП, используемого в блоке системы импульсного питания емкостного накопителя.

На рис. 6 приведены осциллограммы тока диагонали схемы, напряжения на резонансном конденсаторе, полученные экспериментально. Совпадение теоретических и экспериментальных результатов составляет $\pm 10\%$.

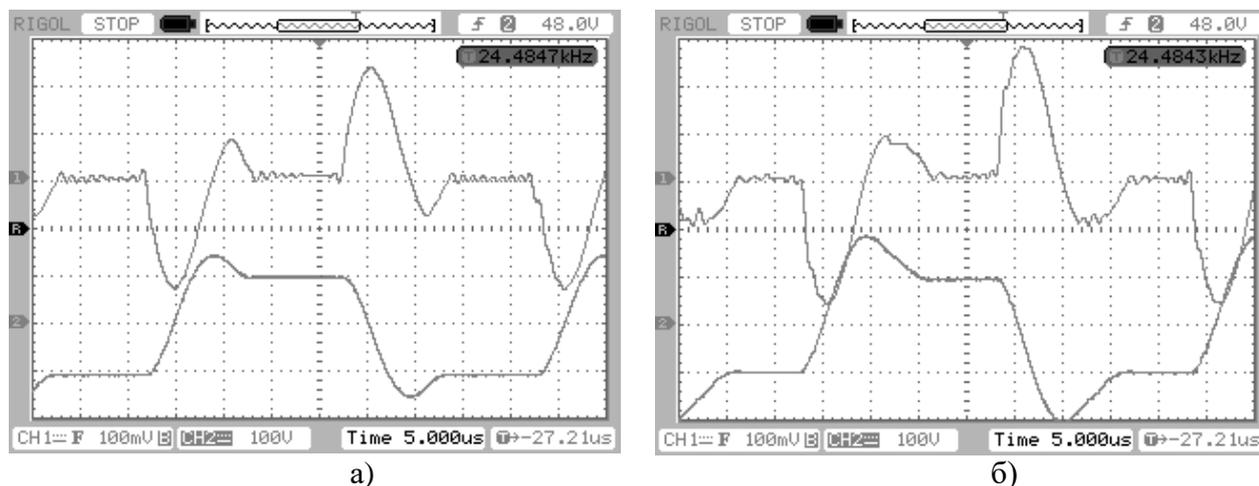


Рис. 6. Осциллограммы тока резонансного контура (кривая 1) и напряжения на резонансном конденсаторе (кривая 2):
а) без регулирования, б) в режиме стабилизации

Испытания экспериментального образца КРП доказали возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

Выводы

Для расширения диапазона регулирования выходного напряжения в пределах 0-100% номинального значения предложен КРП с ШИМ с фиксированной рабочей частотой. Для этого в схему преобразователя вводится шунтирующий транзистор. Регулирование выходного напряжения обеспечивается рекуперацией избытка энергии с выхода КРП на его входной конденсатор.

При работе с фиксированной высокой частотой не происходит уменьшения частоты и увеличения пульсаций напряжения в процессе регулирования. Благодаря этому обеспечивается низкий уровень пульсаций напряжения на нагрузке и достигаются минимальные массогабаритные показатели трансформатора и выходного фильтра.

Разработанная математическая модель зарядного преобразователя, позволила выявить основные закономерности его электромагнитных процессов, дать их количественную оцен-

ку. Имитационная модель обеспечивает расчет электромагнитных процессов в режиме реального времени, внешних характеристик для различных режимов работы КРП и дает возможность определить рациональные параметры компонентов.

Другим достоинством имитационной модели является возможность, при необходимости, наблюдения работы системы в динамике – при включении КРП, при заряде емкостного накопителя и т.д. Наблюдается достаточное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Работа на фиксированной высокой частоте, пониженные потери в транзисторах и высокий уровень электромагнитной совместимости, а также возможность широтного регулирования выходного напряжения делает перспективным применение предложенного КРП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/4.6 от 31.05.2017 г.)

Библиографический список

1. **Penin, A.** Quasi-resonant voltage converter with self-limitation of load current. Similarity of load characteristics of some electronic devices // Analysis of electrical circuits with variable load regime parameters. Power Systems. Springer, Cham, 2016. – P. 389-410.
2. **Горяшин, Н.Н.** Анализ режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения / Н.Н. Горяшин, М.В. Лукьяненко, А.А. Соломатова, А.Ю. Хорошко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. – Т. 54. – № 4. – С. 7-13.
3. **Баранов, А.М.** Сравнительный анализ современных стабилизаторов напряжения / А.М. Баранов // Novainfo.ru, 2016. – Т.2. – № 49. – С. 15-18.
4. **Wang, C.** A single-switched high-switching-frequency quasi-resonant flyback converter / C. Wang, S. Xu, W. Shen, S. Lu, W. Sun // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – V. 34, – №. 9. – P. 8775-8786.
5. **Федянин, В.В.** Разработка и исследование малогабаритного источника питания / В.В. Федянин, Л.Н. Нариманова, С.А. Рютикова, Е.Ю. Горбаченко // Современная наука и практика. – 2016. – № 5 (10). – С. 8-12.
6. **Городний, А.Н.** Особенности управления электронными ключами в квазирезонансных импульсных преобразователях / А.Н. Городний // Праці інституту електродинаміки національної академії наук України. – 2018. – № 51. – С. 94-98.
7. **Маморцев, С.В.** Технология мягкой коммутации транзисторов в преобразователе постоянного напряжения в постоянное / С.В. Маморцев, Г.Я. Михальченко // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2013. – № 1 (27). – С. 24-27.
8. **Wu, H.** Families of forward converters suitable for wide input voltage range applications / H. Wu, Y. Xing // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – V. 29. – № 11. – P. 6006-6017.
9. **Поляков, В.Д.** Квазирезонансные преобразователи с дозированной передачей энергии / В.Д. Поляков // Силовая электроника. 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 92-98.
10. **Быков, К.В.** Выпрямительное устройство на основе LLC-конвертора с фазоимпульсным управлением / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Д.Г. Малышев, Ю.В. Павлов, В.М. Яров // Цифровая электротехника: Проблемы и достижения. Сб. науч. тр. НПП «ЭКРА», 2016. – С. 98-112.
11. **Денисов, Ю.А.** Энергетические показатели параллельного импульсного квазирезонансного преобразователя с расширенным диапазоном регулирования для источников питания радиоэлектронной аппаратуры / Ю.А. Денисов, А.Н. Городний, В.В. Гордиенко, С.Н. Бойко, С.А. Степенко // Електроніка та зв'язок. – 2016. – Т. 21, – № 5 (94). – С. 50-56.
12. **Стрелков, В.Ф.** Электротехнические комплексы радиолокационных станций / Стрелков В.Ф. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03, Н. Новгород, НГТУ, 2016. – 40 с.
13. **Долов, В.Н.** Квазирезонансный преобразователь системы импульсного питания радиолокационной станции / В.Н. Долов, В.Ф. Стрелков, В.В. Ваняев, А.А. Кочнев // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2015. – № 2. – С. 27-32.

14. **Стрелков, В.Ф.** Математическая модель квазирезонансного преобразователя / В.Ф. Стрелков, И.Н. Филатов, Е.А. Ершова // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей, 2018. – С. 20-30.

*Дата поступления
в редакцию: 01.08.2019*

V.F. Strelkov, A.B. Dar'enkov, E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin

**QUASI-RESONANT CONVERTER WITH A WIDE RANGE OF OUTPUT VOLTAGE
REGULATION FOR LIMITED POWER SUPPLY SYSTEMS**

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

The article is devoted to the development of a quasi-resonant converter (QRC) for power supplies in limited power energy systems. A shunt transistor is introduced into the QRC design to increase the voltage regulation range and reduce its ripple. A mathematical model of the proposed quasi-resonant converter has been described, and quantitative relationships between the parameters of the power circuit elements of this converter have been determined. The Simulink model has been created, which has allowed a real-time study of electromagnetic processes in QRC. The characteristics of QRC have been investigated and the rational parameters of its components have been determined.

Keywords: quasi-resonant converter, voltage regulation, energy recovery, power supply system, pulse width modulation

УДК 621.039.5

А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ И ГАЗОПЕРЕНОС В ОБОРУДОВАНИИ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ГАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ процессов газопереноса и газовыделения в оборудовании первого контура реакторной установки (РУ) с газовой системой компенсации давления. Рассмотрены процессы растворимости азота в воде первого контура РУ. Проанализированы три режима работы установки: номинальный, нормального и ремонтного расхолаживания. Для каждого из них рассматривается предельный случай, при котором растворение выделившегося в контуре газа не учитывается в связи с малой скоростью процесса. Для режимов нормального и ремонтного расхолаживания количественно оценены объемы выделившегося в контур газа. Проведен анализ полученных результатов на основании экспериментальных данных швартовых испытаний РУ плавучего энергоблока «Академик Ломоносов».

Ключевые слова: нормальное и ремонтное расхолаживание РУ, газовая система компенсации давления, равновесная концентрация газа, газовыделение, газоперенос.

Введение

Основным источником газа в теплоносителе первого контура является азот газовой системы компенсации давления [1]. При длительном контакте азота с водой КД устанавливается равновесная концентрация раствора. При работе реакторных установок (РУ) происходит массообмен теплоносителя между реактором и компенсатором давления (КД) вследствие изменения средней температуры в первом контуре. Это приводит к выравниванию концентраций растворенного газа в КД и теплоносителе первого контура. По опыту эксплуатации судовых РУ достижение равновесной концентрации происходит за 1-1,5 месяца работы на мощности [2]. Повышенное удельное газосодержание, а также различие условий растворимости газа в теплоносителе, на отдельных участках контура при разных режимах работы установки может привести к выделению газа из раствора и нарушению нормальной работы оборудования первого контура. Также наличие растворенного азота системы компенсации в теплоносителе первого контура [5,6] вызывает более раннее начало пристенного «газового» кипения водогазового раствора на оболочках ТВЭЛов, по сравнению с дегазированной водой, что приводит к повышенной температуре оболочки и топлива, повышению отложений на оболочке, возрастанию рисков взаимодействия пара с циркониевыми элементами ТВС [7].

В настоящей статье рассмотрены три режима работы установки: номинальный, режимы нормального и ремонтного расхолаживания. Для каждого из них рассматривается предельный случай, при котором растворение выделившегося в контуре газа не учитывается в связи с малой скоростью процесса.

Номинальный режим работы установки с очисткой теплоносителя первого контура

Рассматриваемый циркуляционный тракт теплоносителя в режиме нормальной работы реакторной установки изображен на рис.1.

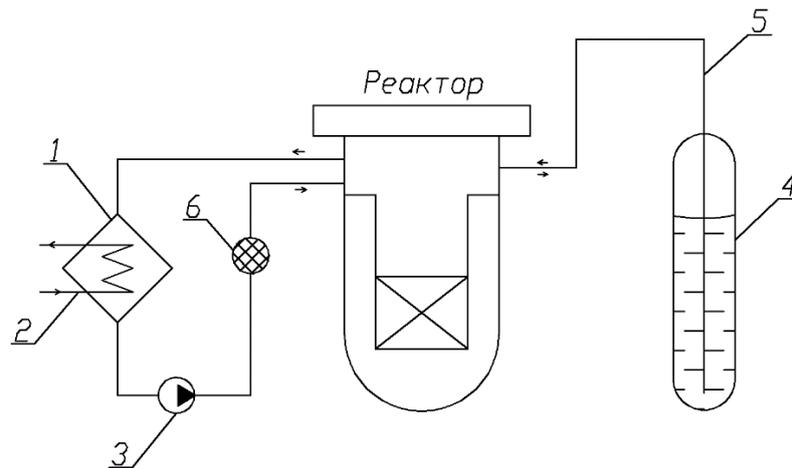


Рис. 1. Схема реакторной установки с работой систем очистки и компенсации давления в номинальном режиме:

- 1 – теплообменник первого-третьего контуров (ТО₁₋₃), 2 – охлаждающая вода ТО₁₋₃,
3 – насос расхоложивания, 4 – система компенсации давления, 5 – трубопровод,
6 – ионообменный фильтр

Предполагается, что вода в КД имеет температуру, которая зависит от интенсивности массообмена с реактором и теплообмена с окружающей средой. Уравнение, описывающее повышение концентрации азота в воде КД с течением времени можно записать в виде [2] (1):

$$C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{н}} \cdot (1 - e^{-\frac{\alpha S}{V_{\text{КД}}} t}), \quad (1)$$

где $C_{\text{КД}}^{\text{н}} = K \cdot P_{\text{г}}$ – равновесная концентрация азота в массе воды в КД определенная по закону Генри [4]; K – коэффициент Генри; $P_{\text{г}}$ – парциальное давление газа; S – площадь поверхности раздела фаз в КД; α – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой КД (зависит от интенсивности перемешивания воды в КД); $V_{\text{КД}}$ – объем воды компенсаторов давления РУ.

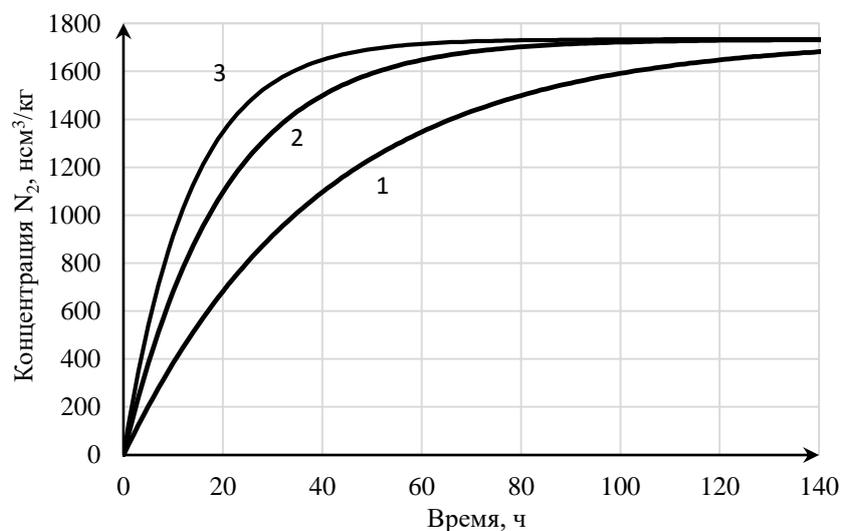


Рис. 2. Накопление газа в воде КД:

- 1 - $\alpha = 0,05$ м/ч; 2 - $\alpha = 0,1$ м/ч; 3 - $\alpha = 0,15$ м/ч

На рис. 2 показан характер повышения концентрации растворенного азота в воде КД во времени при подключении системы компенсации к реактору в начале работы РУ. При $C_{\text{КД}}^{\text{н}} = 1734 \text{ нсм}^3/\text{кг}$, $V_{\text{КД}} = 2 \text{ м}^3$, $S = 1 \text{ м}^2$. Из графика видно, что в реальных реакторных системах насыщение воды КД азотом ($C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{н}}$) происходит достаточно быстро (примерно 120 час с момента подачи газа в КД). При номинальном режиме работы установки с очисткой теплоносителя первого контура на ионообменном фильтре (рис. 1) вероятным источником газовой выделения из теплоносителя является ТО_{1-3} , в котором температура теплоносителя снижается до 40-50 °С, необходимой для работы фильтра, проходя 80 °С – температуру минимальной растворимости азота в воде [3].

Уравнение, описывающее равновесную концентрацию в системе в зависимости от времени будет иметь вид (2):

$$\rho \cdot V_o \cdot \frac{dC}{dt} = G_{\text{ТО}_{1-3}} \cdot C_{\text{min}} + G_{\text{КД}} \cdot C_{\text{КД}} - G_{\text{ТО}_{1-3}} \cdot C_{1\text{К}} - G_{\text{КД}} \cdot C_{1\text{К}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{ТО}_{1-3}}$, $G_{\text{КД}}$ – расход теплоносителя в системе очистки и массообмен между реактором и контуром очистки и между КД и реактором соответственно; C_{min} – минимальная равновесная концентрация азота в теплоносителе ТО_{1-3} ; $C_{1\text{К}}$ – равновесная концентрация азота в массе воды первого контура; V_o – исходный объем первого контура (без КД); ρ – плотность теплоносителя в реакторе при средней температуре.

На рис. 3 приведено изменение концентрации растворенного азота в теплоносителе первого контура во времени при подключении системы очистки к реактору (проработавшему более 50 часов без системы очистки), концентрация растворенного газа в котором исходно соответствует равновесной концентрации при параметрах КД, рассчитанное по уравнению (2). При этом принимаются следующие исходные данные: $\rho = 1001 \text{ м}^3/\text{кг}$, $V_o = 26 \text{ м}^3$, $G_{\text{ТО}_{1-3}} = 1,7 \text{ кг/с}$, $G_{\text{КД}} = 0,01 \text{ кг/с}$, $C_{\text{min}} = 1179 \text{ нсм}^3/\text{кг}$, $C_{\text{КД}} = C_{1\text{К}} = 1734 \text{ нсм}^3/\text{кг}$.

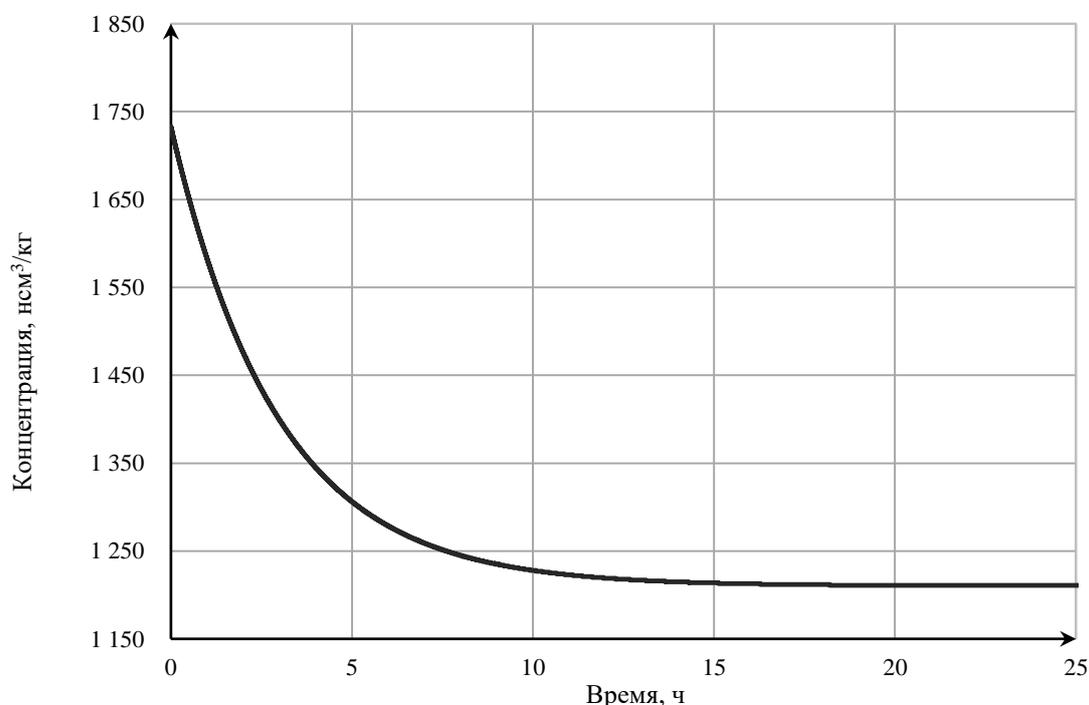


Рис. 3. Изменение концентрации растворенного азота в теплоносителе первого контура во времени при подключении системы очистки в РУ КЛТ-40С

Как видно из графика, изменение концентрации в системе с течением времени прекращается и достигает постоянного значения, равного 1210 нсм³/кг. Полученное значение для установившейся равновесной концентрации подтверждается результатами замеров, выполненных на РУ действующих атомных ледоколов (порядка 1300 нсм³/кг).

Нормальное расхолаживание РУ через парогенератор (ПГ)

Предполагается, что перед расхолаживанием РУ работала на мощности не менее одного месяца при номинальных параметрах теплоносителя первого контура без системы очистки. Оценка процессов газовыделения и газопереноса проводится для основных элементов энергетического оборудования: реактора и КД (рис. 1).

Перед расхолаживанием в реакторе устанавливается равновесная концентрация растворенного газа, определяемая парциальным давлением газа и температурой воды в компенсаторе в соответствии с законом Генри (3):

$$C_{\text{КД}}^o = C_{1\text{К}}^o = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{\text{КД}}^o - P_S(T_{\text{КД}})), \quad (3)$$

где $C_{1\text{К}}^o$ – равновесная концентрация растворенного в теплоносителе первого контура газа перед расхолаживанием; $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент Генри при температуре в КД; Температура воды в КД перед и в процессе расхолаживания принимается постоянной; $P_{\text{КД}}^o = P_{1\text{К}}^o$ – давление в КД перед расхолаживанием; $P_S(T_{\text{КД}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре в КД.

В процессе расхолаживания происходят следующие изменения параметров теплоносителя первого контура: в реакторе снижается температура и давление, происходит пополнение реактора водой системы компенсации, в КД снижается уровень при постоянной температуре. Соответственно изменениям параметров теплоносителя изменяются и равновесные концентрации растворенного в нем газа.

Текущая концентрация растворенного газа в воде КД определится из следующего соотношения (4):

$$C_{\text{КД}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{\text{КД}})), \quad (4)$$

где $P_{1\text{К}} = P_{1\text{К}}^o \cdot V_{\text{Г}}^o / (V_{\text{Г}}^o + \Delta V_{\text{В}})$ – текущее давление в первом контуре в процессе расхолаживания; $V_{\text{Г}}^o$ – объем газа в исходном состоянии; $\Delta V_{\text{В}} = \Delta G \cdot v$ – объем воды, перенесенный из КД в реактор; $\Delta V_{\text{В}} = \Delta V_{\text{Г}}$ – объем перенесенной воды в реактор равен изменению объема газа в системе; $\Delta G = V^0 \cdot \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v^0}\right)$ – масса воды, перенесенная из КД в реактор; V^0 – исходный объем воды в первом контуре без КД; v^0, v – удельный объем теплоносителя в реакторе перед и в процессе расхолаживания соответственно.

Исходная концентрация газа в массе воды КД $C_{\text{КД}}^o$, по мере поступления из КД в реактор, снижается пропорционально снижению давления.

Текущая концентрация линейно зависит от давления, поэтому средняя концентрация газа в массе воды КД, поступающей в реактор, определится как (5):

$$C_{\text{КД,ср}} = \frac{(C_{\text{КД}}^o - C_{\text{КД}})}{2}, \quad (5)$$

Равновесная концентрация газа в исходной массе теплоносителя в первом контуре в процессе расхолаживания (6):

$$C_{1\text{К}} = K(T_{1\text{К}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{1\text{К}})), \quad (6)$$

где $K(T_{1\text{К}})$ – коэффициент Генри при текущей температуре теплоносителя первого контура в процессе расхолаживания.

Расхолаживание РУ ведется при принудительной циркуляции теплоносителя, поэтому при малой мощности остаточных тепловыделений температура теплоносителя в реакторе принимается одинаковой во всем объеме. Отвод тепла ведется через ПГ.

Объем газа, выделившегося из исходной массы воды в реакторе в процессе расхолаживания, определяется соотношением (7):

$$V_{г.1К} = \Delta C_{1К} \cdot G, \quad (7)$$

где $\Delta C_{1К} = C_{1К}^o - C_{1К}$ – изменение равновесной концентрации газа в исходной массе воды первого контура при расхолаживании может быть как положительным, так и отрицательным, но т.к. рассматривается предельный случай, то отрицательные значения изменения концентрации не учитываются; G – исходная масса воды в первом контуре.

На рис. 4 представлено изменение объема выделившегося газа из исходной массы воды первого контура (без КД), равной 26 т в процессе расхолаживания с 300 до 70 °С.

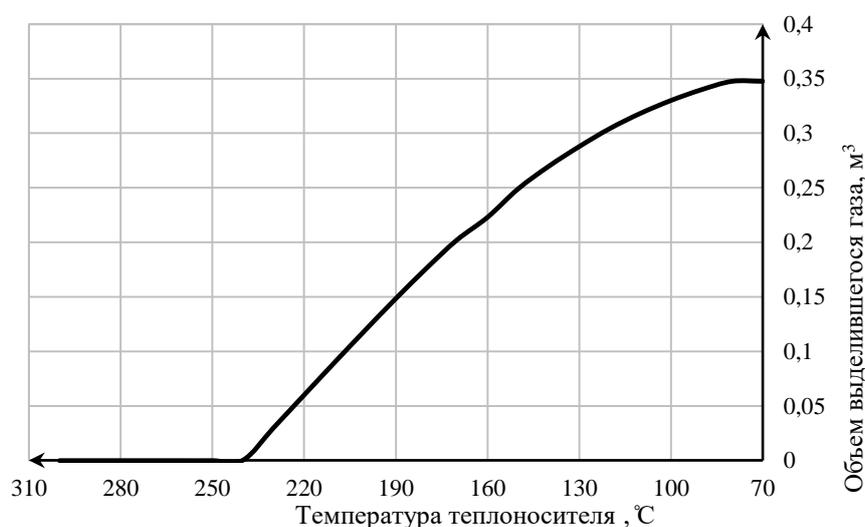


Рис. 4. Объем выделившегося газа из исходной массы воды в первом контуре

Объем выделившегося в реакторе газа из массы воды, поступившей из КД (8):

$$V_{г.КД \rightarrow Р} = \Delta C_{КД \rightarrow Р} \cdot \Delta G, \quad (8)$$

где $\Delta C_{КД \rightarrow Р} = C_{КД,ср} - C_{1К}$ – изменение предельной концентрации газа в массе воды, поступившей из КД в реактор при расхолаживании.

На рис. 5 представлено изменение объема выделившегося газа из массы воды КД, поступившей в реактор в процессе расхолаживания при постоянной температуре воды КД.

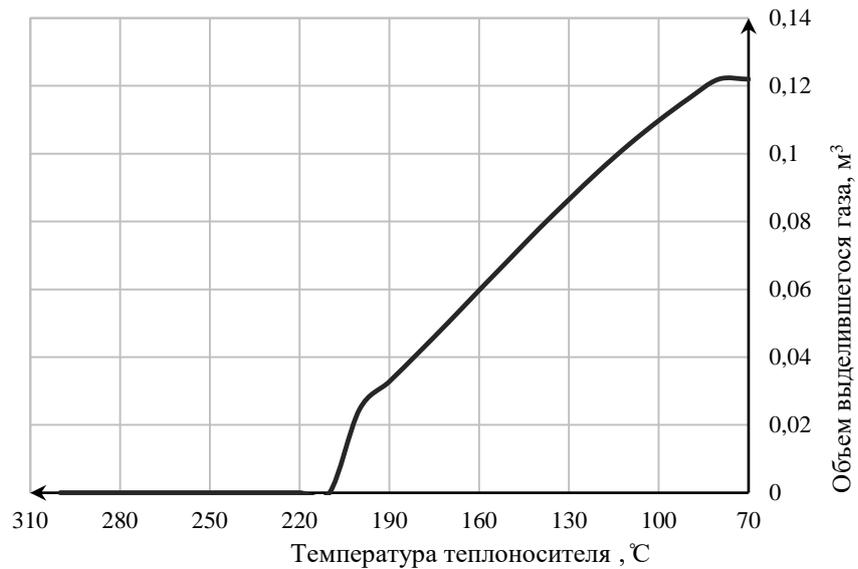


Рис. 5. Объем выделившегося газа из массы воды, поступившей из КД в реактор

Суммарный объем газа, выделившегося в реакторе в процессе расхолаживания (9):

$$V_{\Sigma,г} = V_{г,Р} + V_{г,КД \rightarrow Р}. \quad (9)$$

На рис. 6 показано общее накопление азота в первом контуре в газообразной форме в процессе нормального расхолаживания.

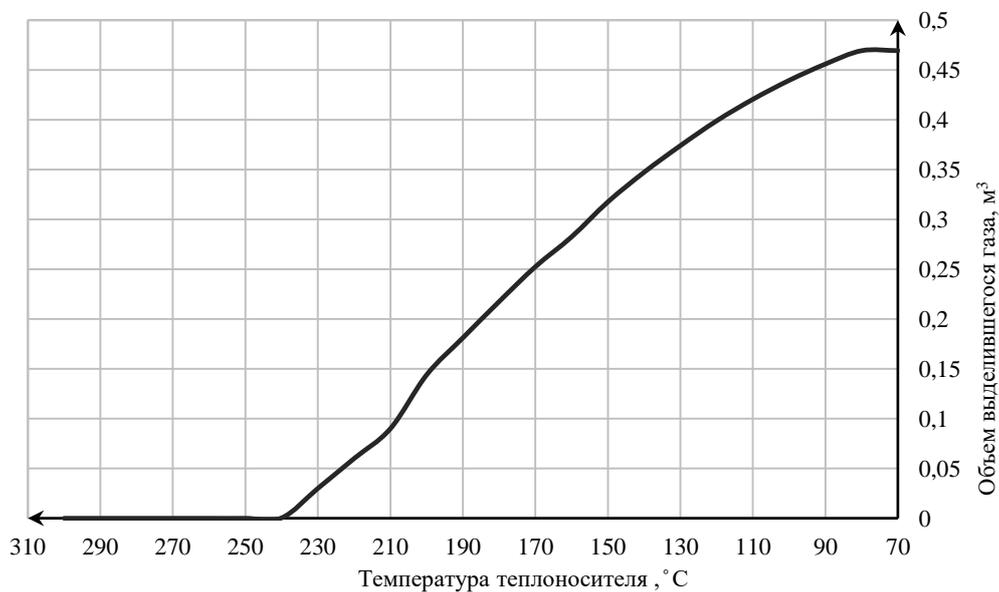


Рис. 6. Общий объем выделившегося газа в рассматриваемом оборудовании первого контура

Из рис. 6. видно, что общий объем выделившегося в реакторе газа превышает объем приводов СУЗ, который составляет ~100 л, поэтому в процессе работы они достаточно быстро заполняются газом. Остальная часть газа переносится в виде водо-газовой эмульсии в другое оборудование и там сепарируется. О наличии водо-газовой эмульсии в контуре очистки при снижении температуры теплоносителя первого контура до 210 °C и ниже свиде-

тельствует неустойчивое показание ультразвукового расходомера при швартовных испытаниях РУ ПАТЭС «Академик Ломоносов» (рис. 7).

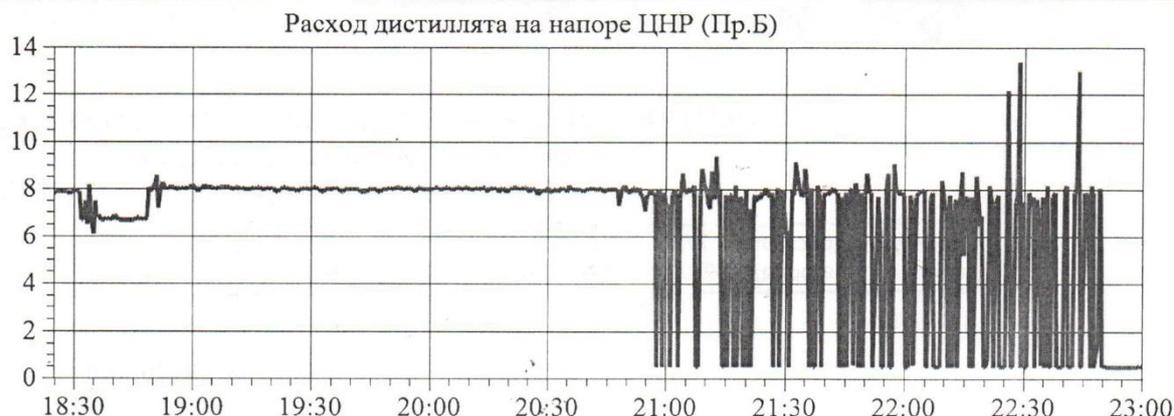


Рис. 7. Изменение показаний расходомера в режиме ремонтного расхолаживания РУ при швартовных испытаниях ПЭБ

Ремонтное расхолаживание РУ

Циркуляционный тракт теплоносителя, рассматриваемый в режиме ремонтного расхолаживания РУ, изображен на рис.8.

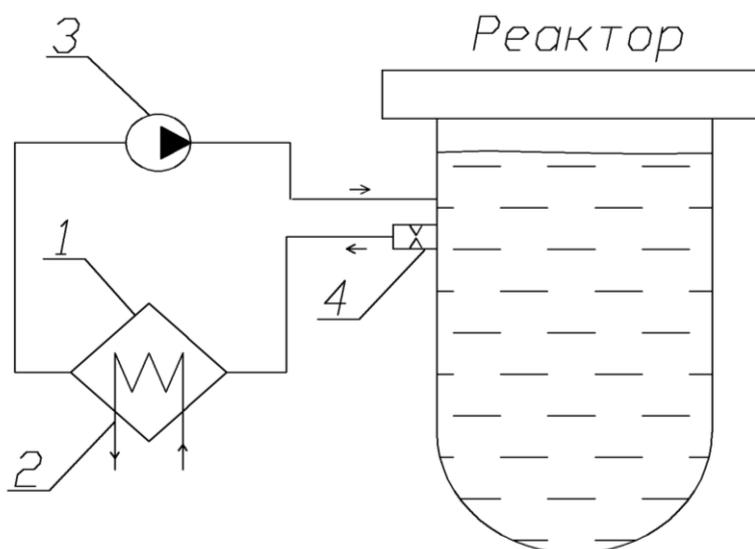


Рис. 8. Схема циркуляции теплоносителя в режиме ремонтного расхолаживания:

- 1 – теплообменник первого-третьего контуров (ТО₁₋₃), 2 – охлаждающая вода ТО₁₋₃,
3 – насос расхолаживания, 4 – сужающее устройство на выходе из реактора

В режиме ремонтного расхолаживания циркуляция осуществляется через контур, в котором основными элементами энергетического оборудования являются: сужающее устройство (СУ), на выходе из реактора предназначенное для снижения скорости истечения теплоносителя при обрыве патрубка реактора к системе расхолаживания, ТО₁₋₃ и циркуляционный насос расхолаживания (ЦНР). Рассматривается случай при расходе в контуре расхолаживания, равном G_p , атмосферном давлении и интервале температур теплоносителя в реакторе до 30 °С.

В данном режиме выполняется оценка объемного газосодержания в теплоносителе на входе в рабочее колесо ЦНР, так как оно влияет на работоспособность насоса. Из экспе-

риментальных исследований работы насосов следует, что при содержании газовой фазы в количестве 4 объемных процентов на входе в насос имеется высокая вероятность его кавитации.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, который находится в реакторе (10):

$$C_P = K(T_P) \cdot (P_P - P_S(T_P)), \quad (10)$$

где $K(T_P)$ – коэффициент Генри для температуры в рассматриваемой точке при T_P – температуре в реакторе в процессе ремонтного расхолаживания; $P_P = P_{\text{атм.}}$ – давление в реакторе при расхолаживании; $P_S(T_P)$ – давление насыщенных паров воды при температуре в рассматриваемой точке.

Для определения места газовыделения в контуре расхолаживания необходимо сравнить предельные концентрации растворенной в теплоносителе воздушной смеси для каждого из элементов энергетического оборудования.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, проходящем через СУ (11):

$$C_{\text{СУ}} = K(T_{\text{СУ}}) \cdot (P_{\text{СУ}} - P_S(T_{\text{СУ}})), \quad (11)$$

где $P_{\text{СУ}} = P_P - \Delta P_{\text{сопр.}} - \Delta P_{\text{скор.}} + \rho g \Delta H$ – давление в СУ при расхолаживании; $\Delta P_{\text{сопр.}}$ – гидравлическое сопротивление, принятое по прототипу при расходе в режиме ремонтного расхолаживания; ρ – плотность теплоносителя; $\Delta P_{\text{скор.}} = (\rho \cdot (G_P)^2 \cdot \nu^2) / S^2 \cdot 2$ – скоростной напор с учетом сужения струи; ν – кинематическая вязкость теплоносителя; S – площадь поперечного сечения наиболее узкого места СУ; ΔH – превышение уровня теплоносителя первого контура в реакторе над соплом; $T_{\text{СУ}} = T_P$ – температура в СУ в процессе ремонтного расхолаживания.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, проходящим через ТО₁₋₃ (12):

$$C_{\text{ТО1-3}} = K(T_{\text{ТО1-3}}) \cdot (P_{\text{ТО1-3}} - P_S(T_{\text{ТО1-3}})), \quad (12)$$

где $P_{\text{ТО1-3}}$ – давление в ТО₁₋₃ при расхолаживании; $T_{\text{ТО1-3}}$ – температура в ТО₁₋₃ в процессе ремонтного расхолаживания.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе на входе в ЦНР (13):

$$C_B = K(T_B) \cdot (P_B - P_S(T_B)), \quad (13)$$

где P_B – давление на входе в ЦНР при расхолаживании; $T_B = T_{\text{ТО1-3}}$ – температура на входе в ЦНР в процессе ремонтного расхолаживания.

Из сравнения равновесных концентраций газа в теплоносителе для различных элементов энергетического оборудования следует, что во всем интервале температур наименьшая равновесная концентрация азота в теплоносителе наблюдается на участке трассы ТО₁₋₃-вход в ЦНР.

Общий объем выделившегося газа при ремонтном расхолаживании определится по формуле (14):

$$V_{\text{г.рем}} = \Delta C_{\text{рем}}, \quad (14)$$

где $\Delta C_{\text{рем}}$ – разность между равновесной концентрацией газа в реакторе и равновесной концентрацией при прохождении элемента с наименьшей равновесной концентрацией азота в теплоносителе.

Объемное газосодержание в теплоносителе на входе в ЦНР (15):

$$x = \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{г}} + V_{\text{в}}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{г}}$ – объем газа на входе в насос; $V_{\text{в}}$ – объем воды на входе в насос.

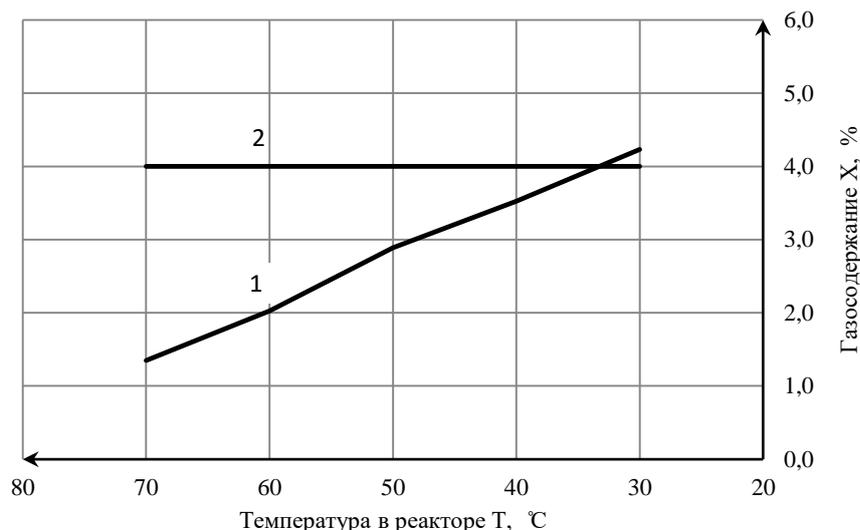


Рис. 9. Зависимость газосодержания на входе в рабочее колесо насоса от температуры в реакторе (1), газосодержание, при котором вероятна кавитация насоса (2)

Из графика следует, что при ремонтном расхолаживании с температурой в реакторе ниже 35 °С возможна кавитация в ЦНР. Для исключения данного явления расхолаживание РУ целесообразно вести поддерживая температуру теплоносителя в реакторе в интервале 40÷70 °С, путем, например, пунктирной работы насоса, снижать гидравлическое сопротивление системы расхолаживания и высотное расположение ЦНР относительно реактора, уменьшать до минимально-возможного расход через ЦНР.

Заключение

При проектировании реакторных установок с ВВР и газовой системой компенсации давления необходимо проводить обстоятельный анализ процессов газопереноса и газовыделения, а также их влияния на надежность работы оборудования первого контура.

Библиографический список

1. Герасимов, В.В. Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. М.: Атомиздат, 1976. – 400 с.
2. Касперович, А.И. Атомная энергия / А.И. Касперович, Н.В. Бычков, В.К. Ширяев, Т. 36, В. 5, 1974. – С. 387-389.
3. Бычков, Н.В. Атомная энергия / Н.В. Бычков, А.И. Касперович, Т. 28, Вып. 4, 1970. – С. 145.
4. Боднар, Ю.Ф. Атомная энергия / Ю.Ф. Боднар, Т. 4, Вып. 5, 1970. – С. 150.
5. Васильев, Н.В. О природе «газового» кризиса кипения / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, В.М. Федуленко, Т. 53, В. 6, 2015. – С. 881-884.
6. Федуленко, В.М. К истории энергетического реактора РБМК и о «газовом кризисе теплоотдачи» / В.М. Феделенко. – М.: ИАЭ, 2012.
7. Зверев, Д.Л. Атомная энергия / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин, Т. 113, В. 6, 2012. – С. 323-328.

*Дата поступления
в редакцию: 10.06.2019*

A.F. Filimonov, V.I. Polunichev, A.E. Pomysukhina

**GAS EMISSION AND GAS TRANSFER IN A FIRST COOLANT LOOP EQUIPMENT
OF THE REACTORS WITH GAS PRESSURE COMPENSATION SYSTEM**

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

Purpose: the article presents the process evaluation performed of gas emission and gas transfer in a first coolant loop equipment of the reactors with gas pressure compensation system.

Methodology: the main investigation method is the analysis of the accessible sources of information related to the scope of the study: articles, conferences proceedings, reports.

Results: the processes of nitrogen saturation of the coolant of the primary circuit of the reactor and the pressure compensator water are considered. A quantitative assessment of the volume of gas released from the coolant for different operating modes of the installation is given.

Findings: the results of the analysis confirm the assumptions about the effect of the gas dissolved in the primary coolant carrier on the performance of the cooling pumps. According to the results, a certain framework has been defined in which the installation must be cooled.

Keywords: normal and maintenance cooling of the reactor, gas pressure compensation system, equilibrium gas concentration, gas emission, gas transfer.

УДК 621.039

А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, А.А. Баринов,
И.А. Коновалов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБОРУДОВАНИИ ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведена серия экспериментов, направленных на отработку методики исследования смешения в стратифицированном потоке теплоносителя. Эксперименты проводились при использовании солевого трассера и кондуктометрической измерительной системы. Обработка экспериментальных данных позволила получить динамические оценки реализаций сигналов, позволяющие судить о характерных масштабах вихрей в зоне смешения для диапазона чисел Re от 10^3 до $15 \cdot 10^3$.

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

Введение

Обеспечение надежности и безопасности современных реакторных установок (РУ) является одной из приоритетных задач атомного машиностроения. Проведение крупномасштабных натурных экспериментов для обоснования безопасности РУ требует колоссальных ресурсных и временных затрат, а в ряде случаев практически нереализуемо. Благодаря высокому уровню развития компьютерных технологий, широкое распространение получили расчеты сложных процессов в оборудовании, частично заменяющие проведение дорогостоящих экспериментов. Вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics, CFD) является одним из современных инструментов расчетного обоснования конструкции. Однако, чтобы применять CFD-коды для задач обоснования безопасности элементов ЯЭУ, необходимо подтверждать достоверность получаемых результатов расчетов. Существует определенный класс задач, характерный для атомной энергетики – процессы смешения неизотермических потоков, и одной из проблем, где эти процессы играют ключевую роль, являются термоциклические нагрузки на конструкционные материалы. Уточненный расчет температурных полей и их пульсаций в потоке является необходимой частью обоснования ресурса термоциклируемых элементов. CFD-коды позволяют детально моделировать процессы гидродинамики в условиях специфической геометрии. Вследствие этого, для верификации программ вычислительной гидродинамики представляется актуальной отработка метода исследования смешения потоков при стратифицированном течении на основе матричного кондуктометрического метода с использованием датчиков разрешением 8×8 точек, ввиду его точности, информативности и наглядности полученных результатов.

Экспериментальный стенд

Экспериментальное изучение гидродинамики стратифицированных потоков производилось на стенде, созданном в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Общая схема стенда (рис. 1) предполагает организацию экспериментального режима с изотермическим смешением в разомкнутом контуре циркуляции (для иссле-

дований с использованием потоков с различной концентрацией примесей) и неизотермическим смешением при использовании потоков с различными температурами. Основными элементами стенда являются: насосы (Н); питательные баки (Б1, Б2); дренажный бак (ДБ); трубопроводы и арматура; экспериментальная модель (ЭМ); контрольно-измерительные приборы.

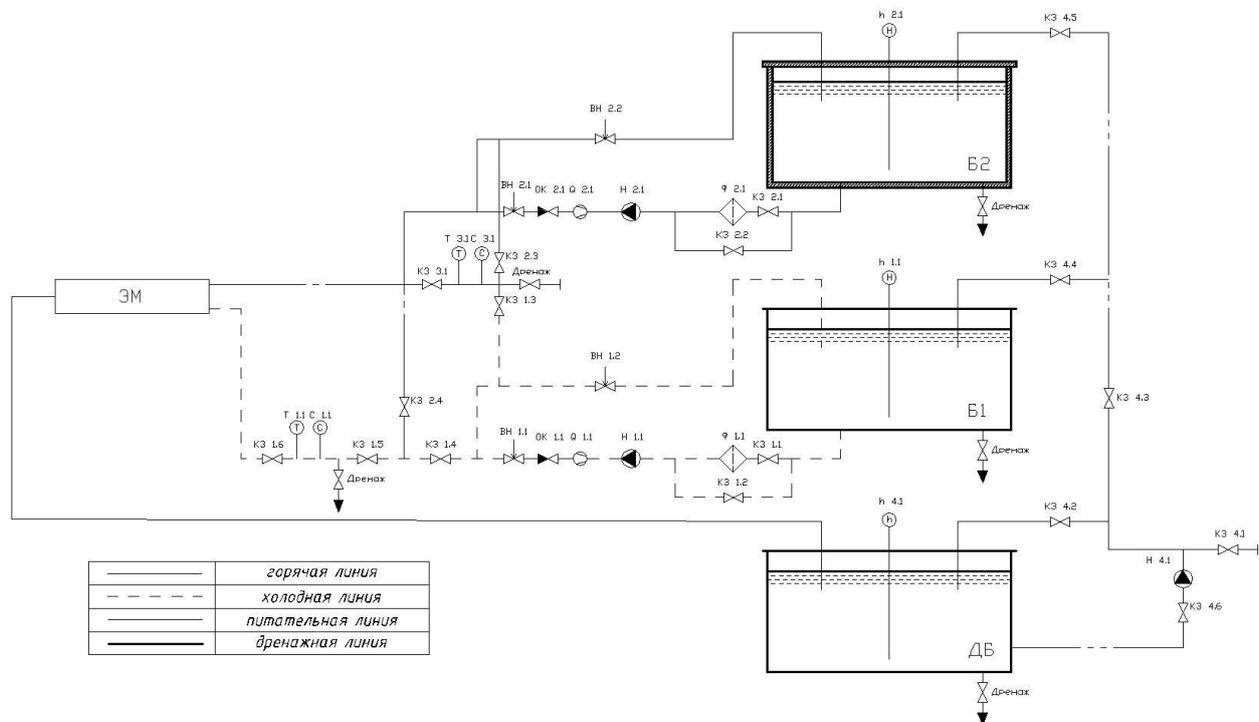


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда

Рабочая среда смешиваемых потоков поступает на всас насосов, прокачивается по подводящей трассе через экспериментальную модель и поступает в дренажный бак. Арматура подводящей трассы предполагает возможность поступления среды каждого бака, как в верхний, так и в нижний патрубки модели, либо поступление среды из одного бака в оба патрубка.

Оборудование стенда позволяет создать как ламинарные, так и турбулентные режимы (при числах Re от 10^3 до $15 \cdot 10^3$) течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Основные характеристики стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Мощность нагревателей (суммарная), кВт	6
Расход через экспериментальную модель, м ³ /час	До 2,9
Температура смешиваемых потоков, °С	10 - 80

Измерительная система

Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, а также исследовательской части, при помощи которой выполняются замеры физических характеристик в области турбулентного смещения потоков, разработанной совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ЛАД-36) [1].

Исследования проводились при помощи метода кондуктометрии с использованием сетчатого датчика (СД) с разрешением 8×8 ячеек и шагом между центрами соседних ячеек 5 мм, что позволило повысить информативность экспериментальных данных [2]. Общий вид датчика представлен на рис. 2.

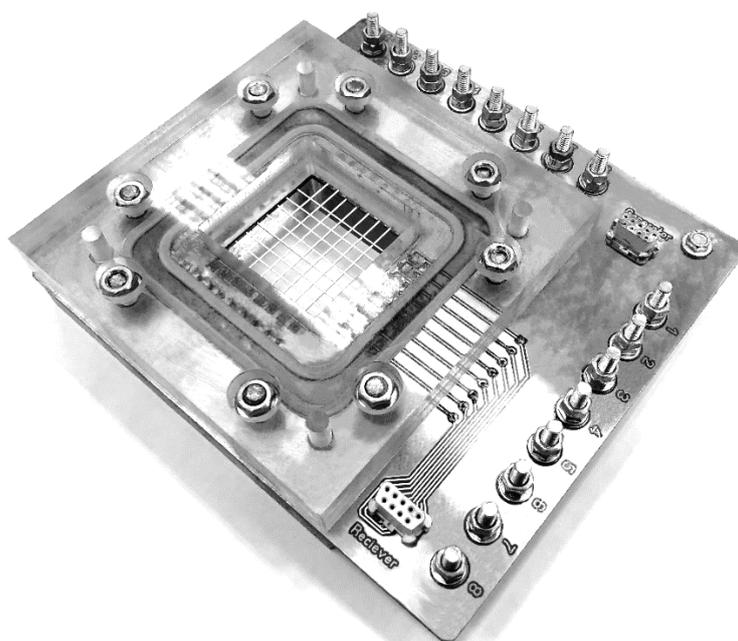


Рис. 2. Сетчатый кондуктометрический датчик

В использованной измерительной системе реализуется принцип частотного разделения сигналов.

В ходе измерения каждый генератор напряжения постоянно подключен к соответствующему электроду возбуждения СД (вертикально расположенные струны), при этом все генераторы настроены на различные точно заданные частоты. Синхронный опрос выходных сигналов приемных электродов (приемников), производимый многоканальным аналого-цифровым преобразователем ЛАД-36ММ, дает для каждого приемника (горизонтально расположенные струны) сумму разночастотных сигналов генераторов, взвешенных с учетом констант измерительной цепи и удельной электропроводности (УЭП) соответствующих кондуктометрических ячеек. Определенные в ходе калибровки константы можно считать постоянными, в то время как УЭП ячеек определяет уровень сигнала определенной частоты в каждый момент времени измерения. Полученные реализации сигналов на приемных электродах подвергаются частотному разделению с получением амплитудно-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот. Далее определяются амплитуды сигналов, соответствующих известным частотам настройки генераторов, которые и используются для определения величины УЭП в каждой ячейке.

Описание проводимых экспериментов

Для проведения исследований и изучения процессов смешения была использована экспериментальная модель квадратного сечения 50x50 мм, на входных участках которой установлены хонейкомбы, предназначенные для получения ровного профиля скорости на входе в модель без крупных вихрей. Раздельное движение потоков во входных участках осуществляется при помощи разделительной перегородки, за которой начинается зона смешения спутных потоков. Также в модели предусмотрена возможность установки сетчатого датчика в двух зонах: сразу после входных участков (для контроля профиля УЭП на входе в модель) и в зоне интенсивного перемешивания, на расстоянии 650 мм от входных участков (рис. 3). Конструкция экспериментальной модели предусматривает применение проставок разной длины, что дает возможность установки датчика на различных расстояниях от входных участков.

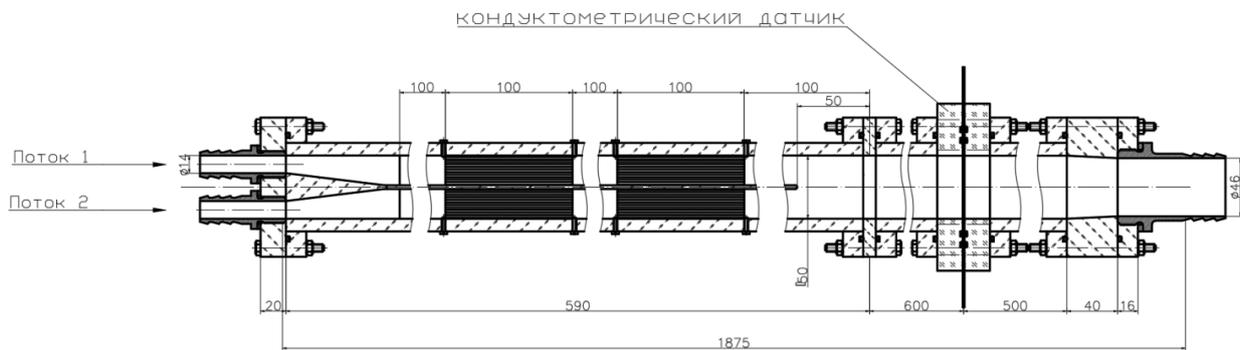


Рис. 3. Экспериментальная модель

Для организации стратифицированных потоков в экспериментальной модели применялись расходомеры повышенной точности, для каждого из которых была проведена индивидуальная градуировка [3]. Расход среды в экспериментах изменялся от 0,12 м³/час ($Re = 10^3$) до 2,9 м³/час ($Re = 15 \cdot 10^3$). Экспериментальные данные включают в себя режимные параметры, профиль относительных концентраций в зоне смешения, длительные нестационарные реализации кондуктометрического датчика. В качестве характерных выбраны точки на пересечении генератора 3 и приемников 1, 3, 4, 7. Параметры экспериментальных режимов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры экспериментальных режимов

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Расход через экспериментальную модель, л/мин	УЭП, мкСм/см (температура, °С) потоков		Длительность реализации, с
		Пресный поток	Соленый поток	
1	2,4	480 (14,2)	943 (15,6)	20
3	9,8	498 (15,7)	841 (15,5)	180
5	17,0	481 (15,7)	837 (15,5)	180
10	32,8	635 (16,0)	1243 (16,1)	180
15	44,3	634 (16,0)	1238 (16,1)	120

Калибровка кондуктометрического датчика проводилась при равномерно распределенной солености в контуре. Режим с $Re = 10^3$ является ламинарным [4], и позволяет произвести оценку разрешающей способности кондуктометрического датчика, так как при данном режиме потоки являются строго стратифицированными и наблюдается четкая граница их раздела (рис. 4).

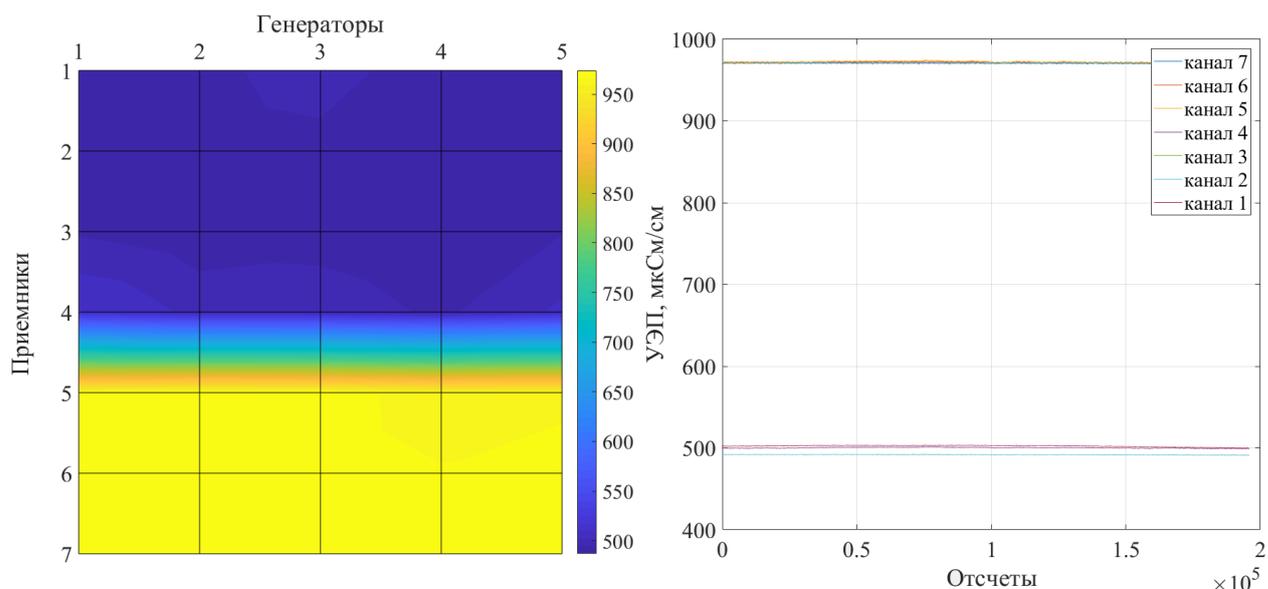


Рис. 4. Визуализация реализаций сетчатого датчика при $Re = 10^3$, шаг между ячейками 5 мм

В экспериментах были задействованы 5 генераторов и 7 приемников. Приемники 1 и 7 соответствуют крайним верхним и нижним ячейкам датчика, соответственно. В качестве характеристик исследуемого процесса смешения при анализе принимались:

- средние значения концентрации в измерительных ячейках датчика;
- дисперсии реализаций измерительного сигнала;
- графики спектральной плотности мощности, автокорреляционные функции и гистограммы распределения реализаций измерительного сигнала.

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

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

где λ_{min} – удельная проводимость пресного потока (удельная проводимость в Б1),

λ_{max} – удельная проводимость соленого потока (удельная проводимость в Б2),

$\lambda_{изм}$ – удельная проводимость, измеренная данной ячейкой кондуктометрического датчика.

Математические ожидания и среднеквадратичные отклонения режимов сведены в табл. 3.

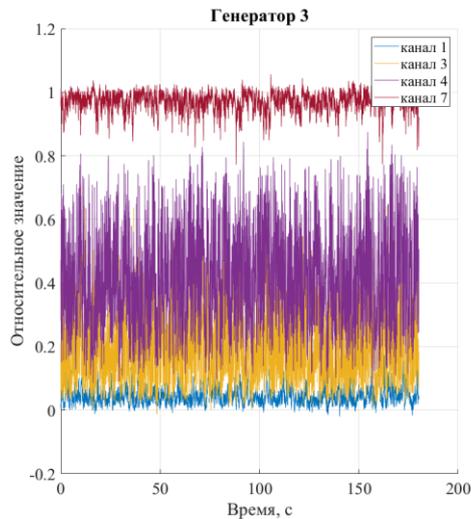
Таблица 3

Сводные статистические данные режимов

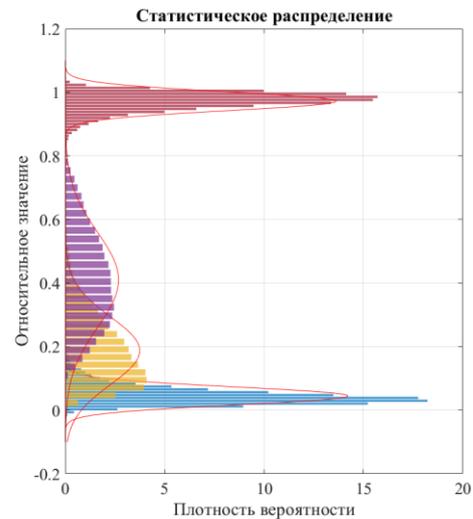
№ приемника	Математическое ожидание, M					Среднеквадратичное отклонение, σ			
	Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$					Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$			
	1	3	5	10	15	3	5	10	15
1	0,02	0,05	0,07	0,08	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03
3	0,01	0,19	0,29	0,29	0,30	0,11	0,10	0,09	0,10
4	0,03	0,41	0,44	0,43	0,44	0,15	0,12	0,10	0,11
7	1,02	0,97	0,97	0,92	0,91	0,03	0,03	0,04	0,03

На рис. 5 представлены распределения плотности вероятности реализаций измерительного сигнала.

Относительная проводимость в характерных точках

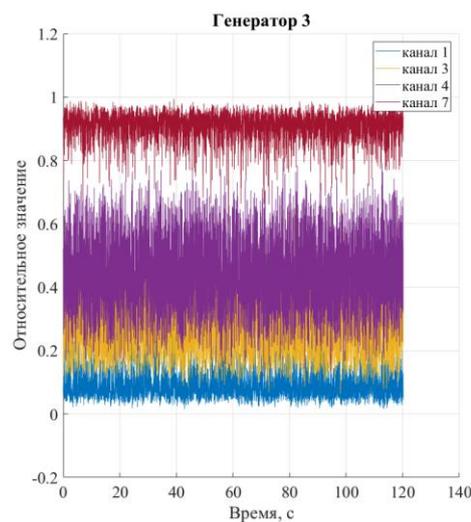


Распределение плотности вероятности в характерных точках

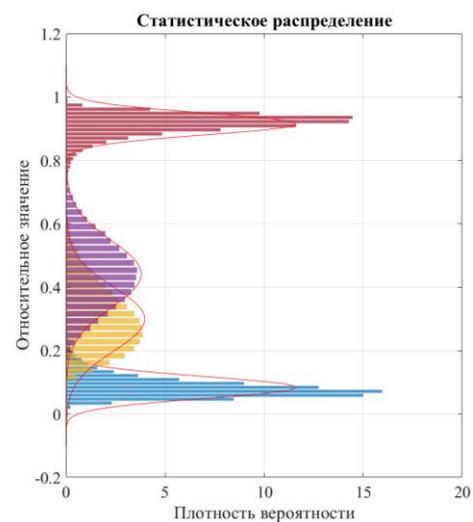


$Re = 3 \cdot 10^3$

Относительная проводимость в характерных точках



Распределение плотности вероятности в характерных точках



$Re = 15 \cdot 10^3$

Рис. 5. Распределение плотности вероятности в характерных точках

Как видно из приведенных выше статистических данных, для ламинарного режима $Re = 10^3$ имеет место систематическая положительная погрешность порядка 2 %, она распространяется на все режимы вплоть до $Re = 15 \cdot 10^3$ и может быть объяснена нагреванием потоков непосредственно в трассе от питательных баков до экспериментальной модели, и, как следствие этого, увеличением удельной электропроводимости проводимости среды.

В режимах с $Re = 10 \cdot 10^3$ и $Re = 15 \cdot 10^3$ наблюдается систематическое снижение проводимости в центре солёного потока и повышение проводимости в центре пресного потока, свидетельствующего о значительной интенсификации турбулентного перемешивания в этих режимах, которое вызывает падение концентрации соли в соленом потоке, и повышение ее в пресном. Нормированная автокорреляционная функция реализаций (рис. 6) может быть использована для вычисления интервала корреляции, как «времени жизни» наиболее крупных вихрей [5] (2):

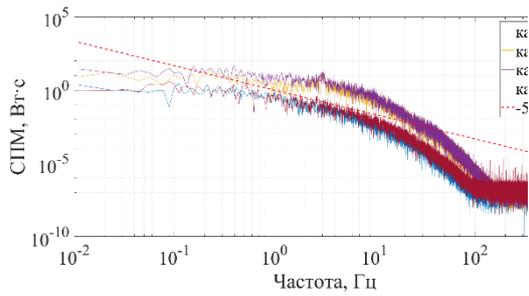
$$\tau_{cor} = \int_0^{\infty} |R(\tau)| d\tau \quad (2)$$

При этом величина, обратная интервалу корреляции, будет соответствовать характерной частоте наиболее крупных вихрей (3):

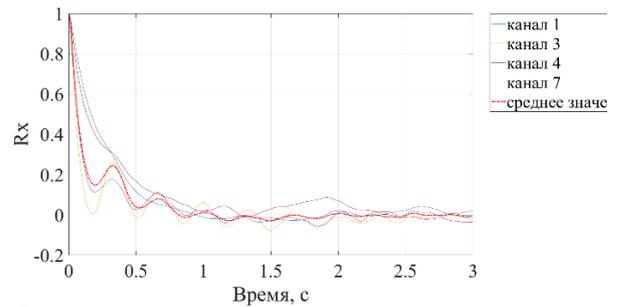
$$f = \frac{1}{\tau_{cor}} \quad (3)$$

Для получения оценок спектральной плотности мощности использовались нормированные центрированные реализации проводимостей в зоне смешения. Сравнительно большая длительность реализации (180 сек.) позволила провести осреднение данных оценок по методу модифицированной периодограммы Уэлча. На приведенных ниже графиках видно, что при низких числах Рейнольдса ($Re = 3 \cdot 10^3$) в центральных точках канала экспериментальной модели (канал 3 и 4) наблюдаются периодические пульсации, соответствующие пику на графике спектральной плотности мощности (СПМ), что объясняется наличием неустойчивости, подобной по характеру неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. При более высоких числах Рейнольдса ($Re = 15 \cdot 10^3$), вследствие воздействия сил инерции характерная частота неустойчивости «размывается» и пик на графике СПМ пропадает.

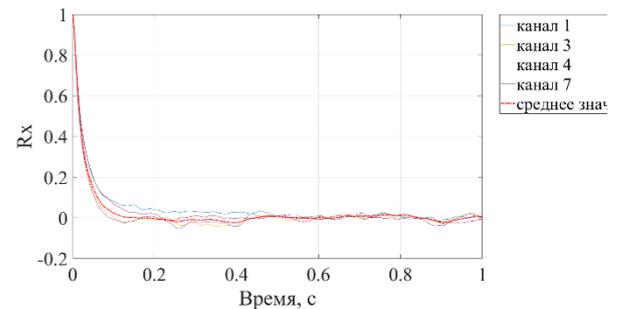
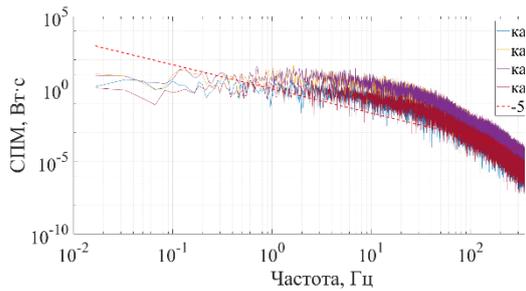
Спектральные плотности мощности в характерных точках



Автокорреляционные функции



$Re = 3 \cdot 10^3$



$Re = 15 \cdot 10^3$

Рис. 6. Оценки спектральной плотности мощности и автокорреляционные функции для $Re = 3 \cdot 10^3$ и $Re = 15 \cdot 10^3$ в характерных точках

Для наглядного представления результатов оценки спектральной плотности мощности, на рис. 7 представлен сводный график СПМ для режимов с $Re = 10^3$, $Re = 3 \cdot 10^3$, $Re = 15 \cdot 10^3$, полученный в результате обработки реализаций измерительного сигнала на пересечении генератора 3 и приемника 3.

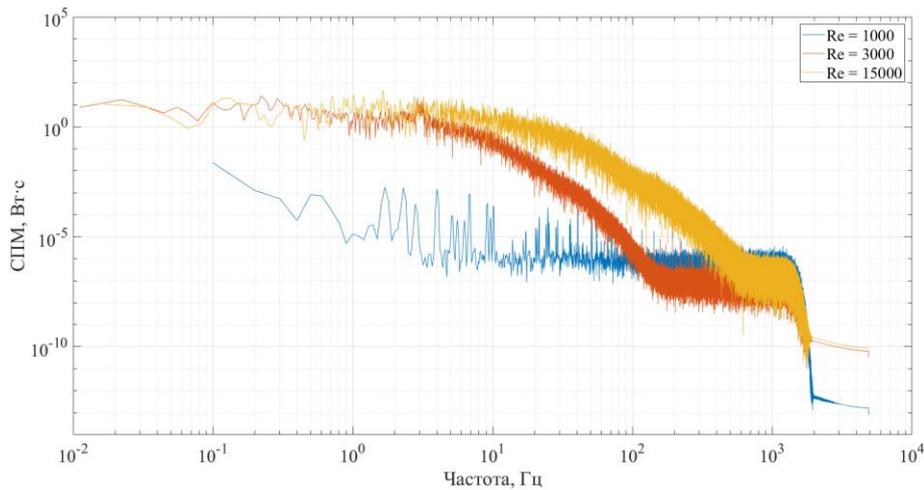


Рис. 7. Сводный график оценок спектральной плотности мощности для режимов с различными числами Рейнольдса

Результаты расчетно-экспериментальных исследований сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сводная таблица аналитических параметров

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Характерная частота вихрей f , Гц	Оценка характерной частоты по критерию Струхала $Sh \approx 0,2$, Гц	Период автокорреляции τ , с
3	0,39	0,25	2,51
5	0,58	0,45	1,74
10	0,91	0,88	1,27
15	1,22	1,18	0,82

Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований

В результате выполненных на данном этапе расчетных и экспериментальных исследований были построены осредненные поля концентрации в области смешения. Спектральный анализ сигналов датчиков позволил оценить диапазон частот основных энергонесущих вихрей и интенсивность каскадного процесса распада вихревых структур. Диапазон характерных частот наиболее крупных вихрей определяется от 0 до 1,22 Гц. Кроме того, с увеличением Re наблюдается увеличение характерных частот основных энергонесущих вихрей и расширение спектра плотности энергии. Показания кондуктометрического датчика, установленного на расстоянии 13 калибров от кромки разделителя, в режимах с Re от $3 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^3$ позволяют судить о наличии турбулентного перемешивания потоков, которое в сравнении с результатами эксперимента GEMIX [6] (датчик установлен на расстоянии 6 калибров), носит более интенсивный характер. Для характерных турбулентных режимов была произведена оценка частот основных энергонесущих вихрей по критерию Струхала: $Sh \approx 0,2$, дающая хорошее согласование с экспериментальными данными.

Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования позволили отработать методику проведения исследования смешения потоков с применением матричного кондуктометрического метода на примере стратифицированного течения. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации программ вычислительной гидродинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

Библиографический список

1. **Баринов, А.А.** Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / А.А. Баринов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – №3.
2. **Prasser, H.M.** A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows / H.M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau // Flow Meas. Instrum. – 1998. – No. 9. – P. 111-119.
3. **Баринов, А.А.** Методика повышения точности измерения расхода жидкости общепромышленными расходомерами / А.А. Баринов, И.А. Коновалов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Международной молодежной научно-техн. конф.; изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, – 2019. – 513 с.
4. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. **Снегирёв, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / А.Ю. Снегирёв. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
6. Uncertainty quantification of the effect of random inputs on computational fluid dynamics simulations of the GEMIX experiment using metamodels / A. Badillo, B. Ničeno, J. Fokken and R. Kapulla / Paul Scherrer Institute, Switzerland, 2017.

*Дата поступления
в редакцию: 05.08.2019*

**A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.A. Barinov, I.A. Konovalov,
A.A. Chesnokov, M.A. Makarov**

RESEARCH OF HYDRODYNAMICS OF STRATIFIED TURBULENT FLOWS FOR VALIDATION OF DESIGNATED APPROACHES TO MODELING THERMAL PROCESSES IN EQUIPMENT OF NUCLEAR POWER PLANTS

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

Purpose: Study of features of the spatial conductometry method for the research of stratified flows in the elements of nuclear power units.

Method of work: To work out the methodology for studying the mixing processes of stratified flows as applied to the calculations of mixing, a series of experiments were carried out using a mesh conductometric sensor.

Findings: Revealed the formation of a periodic instability of the stratification boundary with a pronounced frequency at average expenditures, which disappears with an increase in expenditures.

Conclusions: This work is an experimental basis for the development of methods for conducting computational and experimental studies using spatial conductometric systems. The results can be used to conduct validation experiments on the hydrodynamics of stratified flows.

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.365

В.А. Горелов¹, Б.Б. Косицын¹, А.В. Мирошниченко², А.А. Стадухин¹

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХЗВЕННОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)¹
ОКБ «Техника» (г. Москва)²

Представлен комплекс натурно-математического моделирования, позволяющий проводить имитацию движения транспортного средства в режиме «реального времени» и исследовать динамику двухзвенных гусеничных машин под управлением человека в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Рассматривается аппаратная часть разработанного комплекса, математическая модель динамики двухзвенной гусеничной машины, а также метод генерации среднестатистических трасс и дорожно-грунтовых условий. Представленная методика обработки результатов виртуальных заездов позволяет на этапе проектирования оценить зависимость средней скорости движения от максимальной мощности машины, а также определить требования к характеристикам тяговых электродвигателей, используемых в индивидуальном приводе.

Ключевые слова: двухзвенная гусеничная машина, механическая характеристика, индивидуальный привод, тяговый электродвигатель, натурно-математическое моделирование, виртуальные испытания.

Введение

Широкое распространение двухзвенных гусеничных машин обусловлено их высокими эксплуатационными характеристиками: проходимостью, быстроходностью и грузоподъемностью. Дальнейшее совершенствование подобных транспортных средств может быть достигнуто путем применения индивидуального тягового электропривода ведущих колес, что позволит упростить конструкцию узла сочленения. Помимо этого, применение трансмиссии такого типа позволит избавиться от необходимости передачи механической мощности между секциями и расширит возможности управления поворотом машины, в том числе, при использовании элементов бортового поворота. Однако создание таких машин затруднено в связи с отсутствием методов определения потребных характеристик тяговых электродвигателей, а также статистических данных об их эксплуатации.

Необходимость повышения подвижности боевых двухзвенных гусеничных машин (ДГМ) неизбежно приводит к попыткам использовать тяговый электрический привод в их трансмиссиях. Известно, что работа электрической машины характеризуется режимами, отличающимися длительностью, крутящим моментом, частотой вращения ротора, величиной токов и напряжений и т.д. В известных сферах применения (городской транспорт, привод конвейеров, лифты, тяговый привод карьерной техники и др.) режимы стандартизованы или же приводятся к стандартизованным. В случае тягового привода вездеходных транспортных машин определение длительных и кратковременных режимов работы на этапе проектирования в статистически заданных условиях движения для обеспечения требуемого уровня по-

движности не представляется возможным без использования методов математического моделирования.

Для решения данных проблем был создан комплекс натурно-математического моделирования, выполненный с использованием имитационной математической модели динамики плоского криволинейного движения двухзвенной гусеничной машины [1-7], позволяющий проводить имитацию движения в режиме «реального времени» на ЭВМ под управлением человека (водителя-оператора).

Комплекс натурно-математического моделирования

В имитационной математической модели [7] динамика секции ДГМ рассматривается как движение твёрдого тела в горизонтальной плоскости по ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного вокруг центра масс (рис. 1). Для учета в модели перераспределения нормальных реакций от действия силы сопротивления воздуха, моментов сопротивления качению, ускорения центра масс и силы тяжести применяется принцип возможных перемещений. Связь опорных катков с грунтом – не удержиживающая.

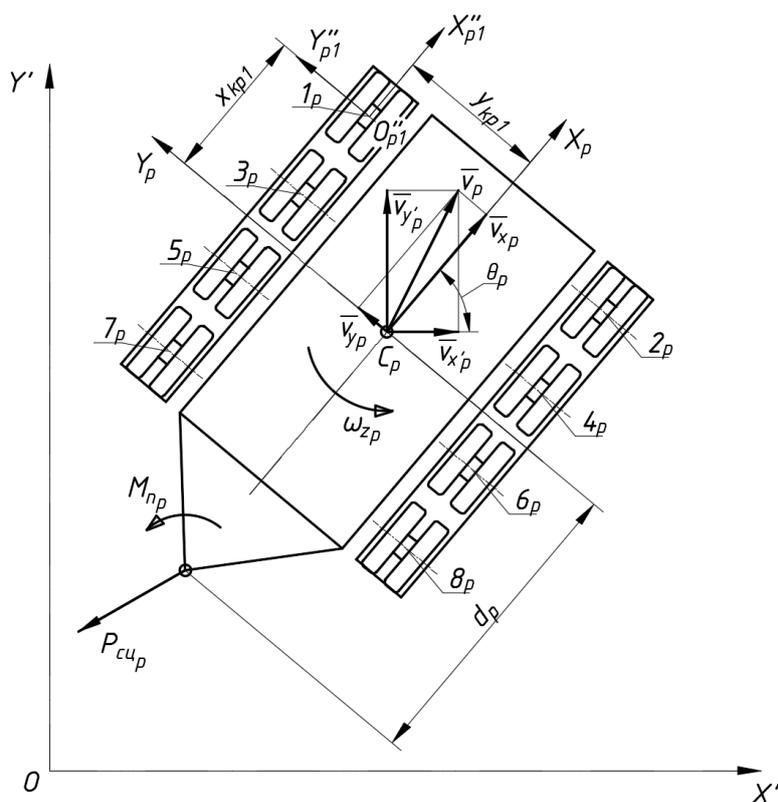


Рис.1. Расчетная схема движения секции ДГМ

В соответствии с представленной расчетной схемой (рис. 1) система уравнений, описывающая плоское движение секции ДГМ, имеет вид (1). Данная система позволяет рассчитать текущие ускорения центра масс по значениям сил и моментов, действующих на секцию ДГМ.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{x_p} = \frac{dv_{x_p}}{dt} - \omega_{z_p} v_{y_p} = \frac{1}{m_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} R_{x_{p,i}} - P_{w_p} + P_{c_{u_{x_p}}} \right); \\ a_{y_p} = \frac{dv_{y_p}}{dt} + \omega_{z_p} v_{x_p} = \frac{1}{m_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} R_{y_{p,i}} + P_{c_{u_{y_p}}} \right); \\ J_{z_p} \frac{d\omega_{z_p}}{dt} = \sum_{i=1}^{n_p} M_p (R_{y_{p,i}}) - \sum_{i=1}^{n_p} M_p (R_{x_{p,i}}) - \sum_{i=1}^{n_p} M_{c_{п_{p,i}}} + M_p (P_{c_{u_p}}) + M_{п_p}; \\ v_{x'_p} = \frac{dx'_p}{dt} = v_{x_p} \cos(\theta_p) - v_{y_p} \sin(\theta_p); \\ v_{y'_p} = \frac{dy'_p}{dt} = v_{x_p} \sin(\theta_p) + v_{y_p} \cos(\theta_p); \\ \omega_{z_p} = \frac{d\theta_p}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где: p – номер секции ДГМ; m_p – масса секции ДГМ; J_{z_p} – момент инерции секции ДГМ относительно вертикальной оси z , проходящей через центр масс секции C_p ; a_{x_p} , a_{y_p} – проекции ускорения центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; v_{x_p} , v_{y_p} – проекции скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; $v_{x'_p}$, $v_{y'_p}$ – проекции скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x' - y'$; $\frac{dv_{x_p}}{dt}$, $\frac{dv_{y_p}}{dt}$ – проекции относительной производной вектора скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; ω_{z_p} – проекция вектора угловой скорости поворота секции ДГМ на вертикальную ось z_p ; θ_p – угол поворота секции ДГМ в неподвижной системе координат; x'_p, y'_p – координаты центра масс секции ДГМ в системе координат $x' - y'$; $R_{x_{p,i}}$ – продольная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности); $R_{y_{p,i}}$ – поперечная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности); $P_{c_{u_{x_p}}}$ – продольная составляющая усилия, реализуемого в сцепном устройстве; $P_{c_{u_{y_p}}}$ – поперечная составляющая усилия, реализуемого в сцепном устройстве; P_{w_p} – проекция вектора силы сопротивления воздуха на ось x_p системы координат $x_p - y_p$; $M_{п_p}$ – поворачивающий момент, обеспечивающий складывание секций и реализуемый при помощи системы рулевого управления ДГМ; $M_{c_{п_{p,i}}}$ – момент сопротивления повороту активного участка гусеницы под i -ым катком вокруг вертикальной оси, проходящей через центр этого участка; n_p – число опорных катков секции ДГМ.

Известно, что распределение нормальных реакций недеформируемого опорного основания по длине опорных ветвей гусениц во многих случаях разрывно [8]. В связи с этим гусеничный движитель моделируется подобно колесному, у которого число опорных катков равно числу колес. Сила взаимодействия движителя с грунтом в плоскости опорного основания определяется при помощи подхода, основанного на представлении об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в точках контакта [9-11].

Величина силы $P_{c_{ц}}$ в сцепном устройстве ДГМ определяется согласно расчетной схеме (рис. 2) как (2):

$$P_{c_{ц}} = c_{c_{ц}} \Delta + \mu_{c_{ц}} d\Delta/dt, \quad (2)$$

где: $c_{c_{ц}}$ – коэффициент жесткости сцепного устройства; $\mu_{c_{ц}}$ – коэффициент потерь в сцепном устройстве; Δ – расстояние между центрами шарниров сцепного устройства секций ДГМ.

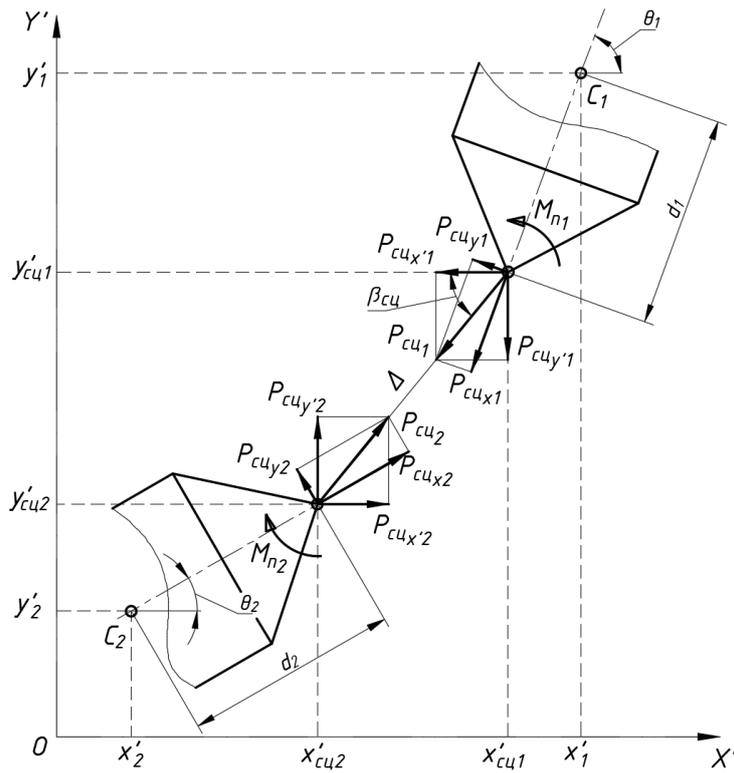


Рис. 2. Расчетная схема сцепного устройства

Поворот машины осуществляется за счет складывания звеньев. Величина поворачивающего момента M_{Π} в зависимости от задаваемой водителем кривизны траектории вычисляется как (3):

$$M_{\Pi} = c_{мп} (\theta_{сцв} - \theta_{сц}) = c_{мп} (\arcsin(d_1 k_{в}) + \arcsin(d_2 k_{в}) - \theta_1 + \theta_2), \quad (3)$$

где $c_{мп}$ – коэффициент, определяющий угол наклона регуляторной характеристики механизма поворота; $\theta_{сцв}$ – угол складывания секций, задаваемый водителем; $\theta_{сц}$ – текущий угол складывания секций; d_1, d_2 – расстояние от центра масс до шарнира сцепного устройства первой и второй секции.

Связь крутящего момента тягового электродвигателя (ТЭД) каждого борта секций ДГМ с величиной параметра управления и частотой вращения ротора описывается следующей системой уравнений (4):

$$M_d(\omega_{эд}, h) = \begin{cases} M_{эд}^{max} \cdot h, & \text{если } \omega_{эд} < N_{эд}^{max} / M_{эд}^{max} \text{ и } \omega_{эд} \geq 0 \\ \frac{N_{эд}^{max} \cdot h}{\omega_{эд}}, & \text{если } \omega_{эд} \geq N_{эд}^{max} / M_{эд}^{max} \text{ и } \omega_{эд} < \omega_{эд}^{max}, \\ 0, & \text{если } \omega_{эд} \geq \omega_{эд}^{max} \end{cases} \quad (4)$$

где $M_{эд}^{max}$ – максимальный тяговый/тормозной момент, создаваемый электромашинной; $N_{эд}^{max}$ – максимальная тяговая/тормозная мощность, развиваемая электромашинной; $\omega_{эд}^{max}$ – предельная частота вращения ротора электромашинной; $\omega_{эд}$ – текущая частота вращения ротора электромашинной; h – величина параметра управления ($h \in [-1, 1]$).

Кроме описанной выше математической модели, комплекс натурно-математического моделирования включает элементы взаимодействия с водителем-оператором: органы управления и графический интерфейс. Внешний вид рабочего места оператора представлен на рис. 3. Графический пользовательский интерфейс программы показан на рис. 4.



Рис. 3. Внешний вид рабочего места оператора комплекса натурно-математического моделирования:
1,2 – органы управления; 3 – устройство вывода графической информации

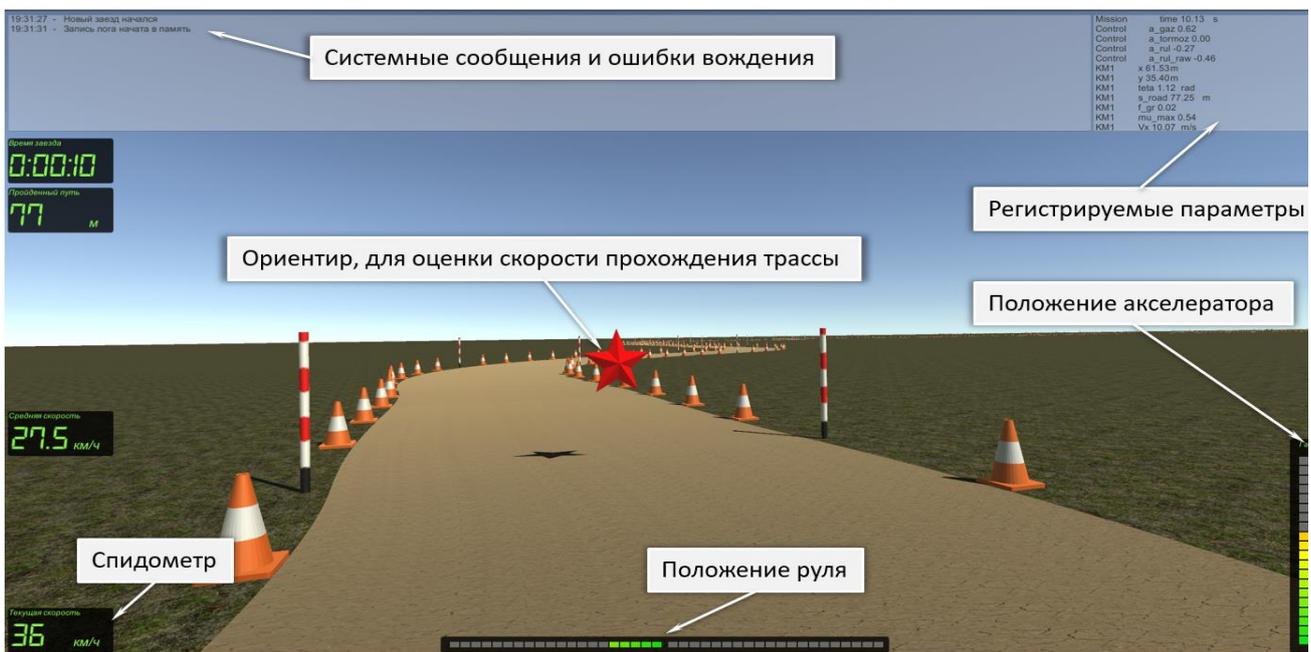


Рис. 4. Визуальная имитация обстановки и приборов в комплексе натурно-математического моделирования

Для определения вероятности работы ТЭД в различных режимах эксплуатации (кратковременный/долговременный) необходимо проводить большое количество вычислительных экспериментов с использованием разработанного комплекса, которые заключаются в выпол-

нении заездов двухзвенной гусеничной машины по статистически заданным трассам в типовых условиях движения под управлением человека (группы водителей-операторов).

При создании таких трасс был применен аппарат математической статистики и известные вероятностные характеристики (корреляционные функции) внешних воздействий, оказывающих влияние на динамику ДГМ. На основе статистических данных о дорожной кривизне k_d , максимальном коэффициенте взаимодействия с ОП μ_{smax} , суммарном коэффициенте сопротивления движению ψ проводился «розыгрыш» перечисленных параметров вдоль трассы при помощи метода неканонических представлений [12-15]. Пример трассы, полученной по реализации случайной функции дорожной кривизны $k_d(s)$, представлен на рис. 5.

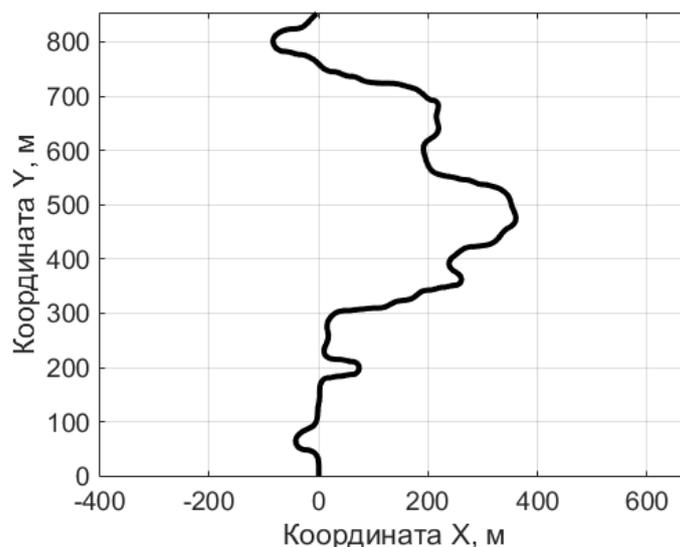


Рис. 5. Пример «разыгранной» трассы

Определение потребной механической характеристики электромашин

Разработанный комплекс натурно-математического моделирования позволяет получать статистические данные о режимах нагружения ТЭД и на их основе определять требуемые механические характеристики электромашин для вездеходных транспортных ДГМ с индивидуальным приводом ведущих колес. В качестве объекта исследования выбрана ДГМ полной массой 25 т (рис. 6) с характеристиками, представленными в табл. 1.

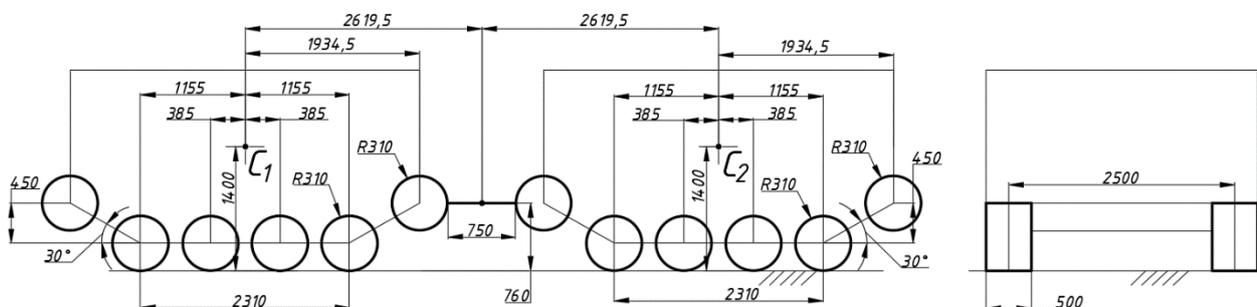


Рис.6. Геометрические параметры ДГМ

Таблица 1

Технические характеристики ДГМ (первая/вторая секция)

Полная масса, кг	12500
База, мм	2310
Колея, мм	2500
Высота центра масс, мм	1400
Момент инерции вокруг вертикальной оси, проходящей через масс, кг.м ²	24140
Радиус ведущего колеса, мм	310
Радиус опорного катка, мм	310
Ширина гусеницы, мм	500
Длина трака, мм	165
Высота расположения узла сцепки, мм	760
Тип трансмиссии	Индивидуальный электропривод ведущих колес каждой секции
Общее количество ТЭД	4
Максимальная скорость, км/ч	70
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,7
Площадь фронтальной проекции, м ²	5,3
Высота центра парусности, мм	1700

Механическая характеристика ТЭД, обеспечивающая заданную подвижность, определяется путем последовательно совершаемых виртуальных заездов по среднестатистическим трассам. Для этого необходимо, изменяя итерационным путем максимальную мощность ТЭД (например, методом «половинного деления»), определить такую $N_{e\max}^{\text{треб}}$, которая позволит обеспечить требуемую среднюю скорость движения машины в заданных условиях. В качестве начального приближения для виртуальных заездов на основании аналитического тягового расчета была получена исходная механическая характеристика ТЭД (рис. 7), выбраны передаточные числа трансмиссии в транспортном (10,02) и технологическом (26,25) диапазонах (предполагается, что рассматриваемая ДГМ оснащена двухдиапазонной трансмиссией, при этом транспортный диапазон предназначен для достижения максимальной скорости, а технологический – для реализации максимальной тяговой силы на движителе [16]). Динамическая характеристика ДГМ с полученной исходной характеристикой ТЭД представлена на рис. 8. КПД механической части трансмиссии принят равным 0,95.

Далее, для определения потребной максимальной мощности и механической характеристики ТЭД, которая обеспечит достижение необходимого уровня подвижности при реальной эксплуатации, применяется комплекс натурно-математического моделирования.

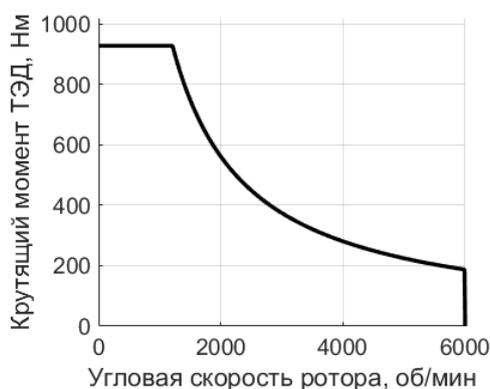


Рис. 7. Исходная механическая характеристика ТЭД ДГМ, полученная при выполнении тягового расчета

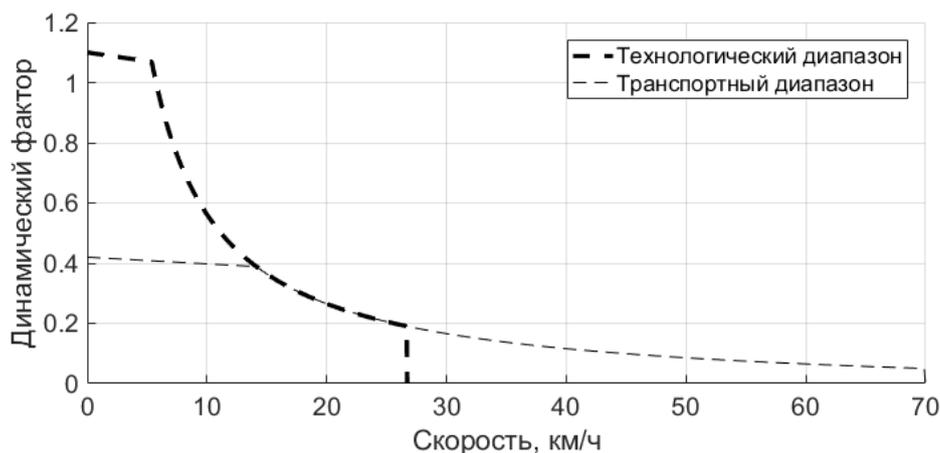


Рис. 8. Динамическая характеристика ДГМ

На первом этапе выбирается диапазон варьирования максимальной мощности электромашин, начиная от минимальной (исходной $N_{e\text{max}}^{\text{треб}}$), которая необходима для обеспечения заданной максимальной скорости, до максимально возможной N_e^{MAX} , исходя из ограничения по максимальному крутящему моменту электродвигателя и предельной угловой скорости ротора (рис. 9).

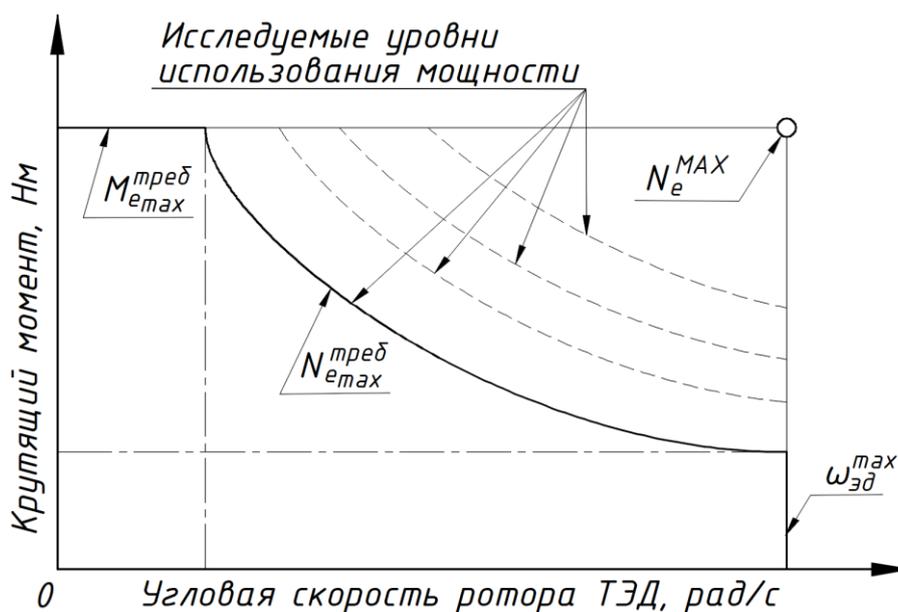


Рис. 9. Диапазон варьирования максимальной мощности ТЭД

В полученном диапазоне выбираются несколько уровней мощности, для каждого из которых проводятся виртуальные испытания в различных дорожно-грунтовых условиях (ДГУ).

Для примера рассмотрим результаты виртуальных заездов ДГМ по опорному основанию типа «разбитая грунтовая дорога». Зависимость средней скорости движения машины по данному типу опорной поверхности от используемой максимальной мощности ТЭД представлена на рис. 10.

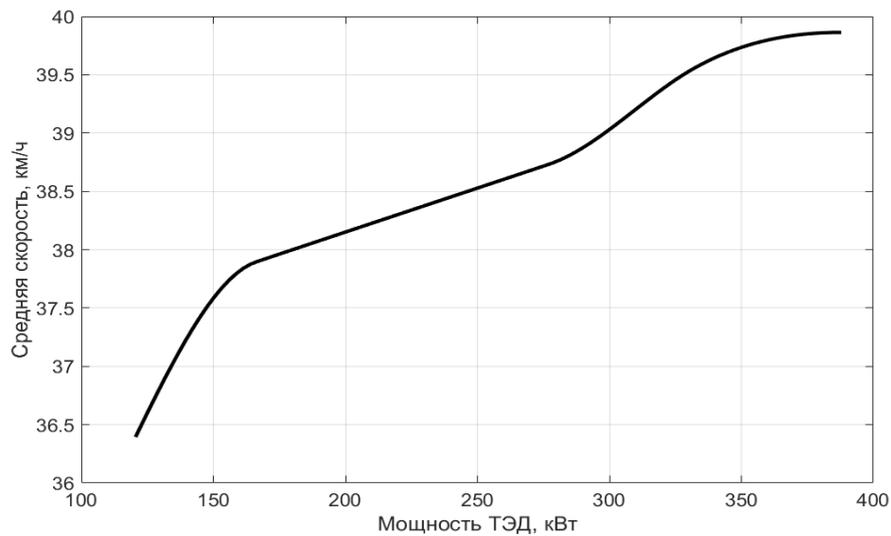


Рис. 10. Зависимость средней скорости движения ДГМ по статистически заданной трассе с опорным основанием типа «разбитая грунтовая дорога» от используемой максимальной мощности ТЭД

Распределение режимов работы ТЭД, а также функции распределения мощности, крутящего момента и угловой скорости ротора, реализованных электромашинной в тяговом режиме, для одного из выполненных виртуальных заездов, представлены на рис. 11, где:

- а) распределение режимов работы ТЭД (режимы движения, относительная длительность которых не превышает 5 % от времени преодоления трассы отсечены);
- б) функция распределения тяговой мощности ТЭД;
- в) функция распределения тягового крутящего момента ТЭД;
- г) функция распределения угловой скорости ротора ТЭД.

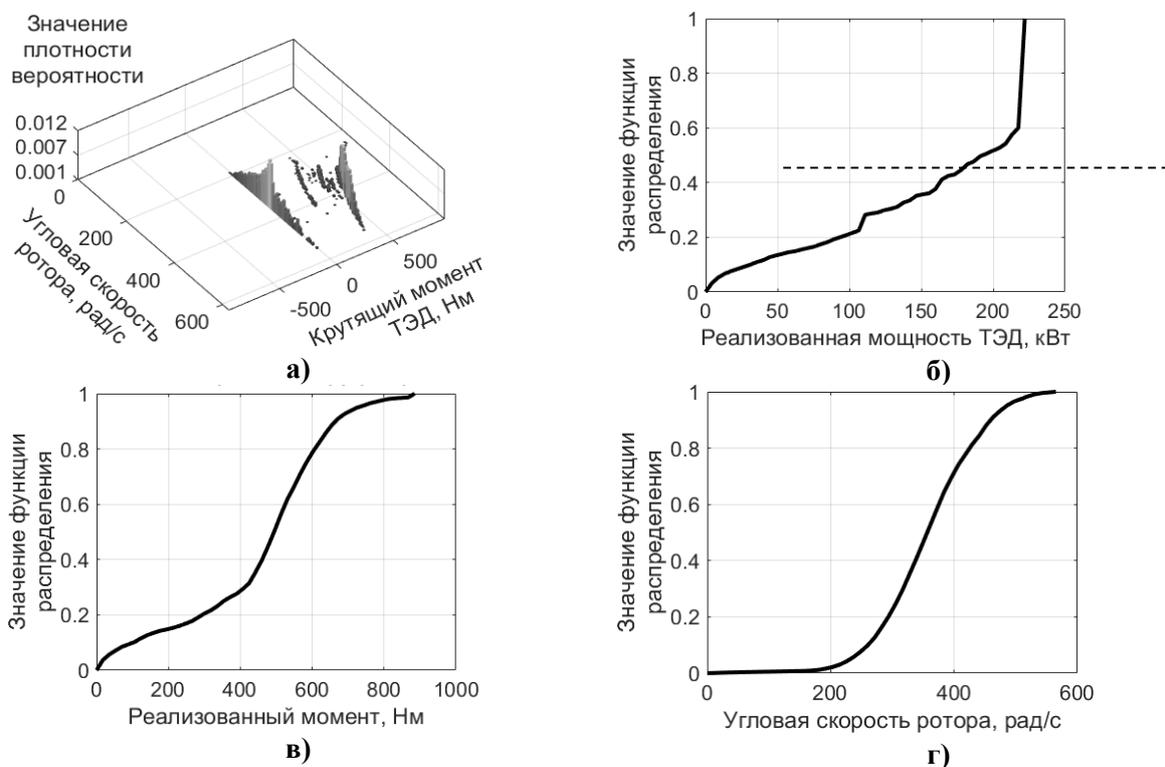


Рис. 11. Результаты виртуальных заездов ДГМ (мощность бортового ТЭД 222 кВт; средняя скорость 38,3 км/ч)

Анализ полученных данных показывает, что при росте максимальной мощности ТЭД снижается вероятность движения машины на внешней механической характеристике электродвигателя. Кроме того, после того как вероятность работы ТЭД на внешней характеристике снижается до ~50-60 % рост средней скорости становится незначительным. Таким образом, при движении ДГМ по ДГУ типа «разбитая грунтовая дорога» увеличивать мощность ТЭД более 222 кВт нерационально (удельная мощность 35,5 кВт/т). По функциям распределения крутящего момента и угловой скорости ротора для выбранного уровня максимальной мощности определяется механическая характеристика электромашины, а по распределению режимов работы ТЭД в тяговом режиме – зона высокого КПД (рис. 12).

Максимальный момент в кратковременном режиме соответствует расчетному $M_{e\max}^{\text{треб}}$ и составляет 928,8 Нм. Максимальный момент в длительном режиме эксплуатации соответствует величине крутящего момента (в данном заезде – 672 Нм), вероятность превышения которого составляет не более 10 %. Величина максимальной мощности в обоих случаях ограничена полученной величиной в 222 кВт. Максимальная длительная мощность ТЭД в режиме работы с максимальной угловой скоростью ротора $\omega_{\text{эд}}^{\text{max}}$ соответствует расчетной $N_{e\max}^{\text{треб}}$, необходимой для обеспечения максимальной скорости машины при прямолинейном движении, и составляет 117,8 кВт. Величина угловой скорости ротора, после которой допускается снижение мощности ТЭД, соответствует величине угловой скорости (в данном заезде 460 рад/с), вероятность превышения которой составляет не более 10 %.

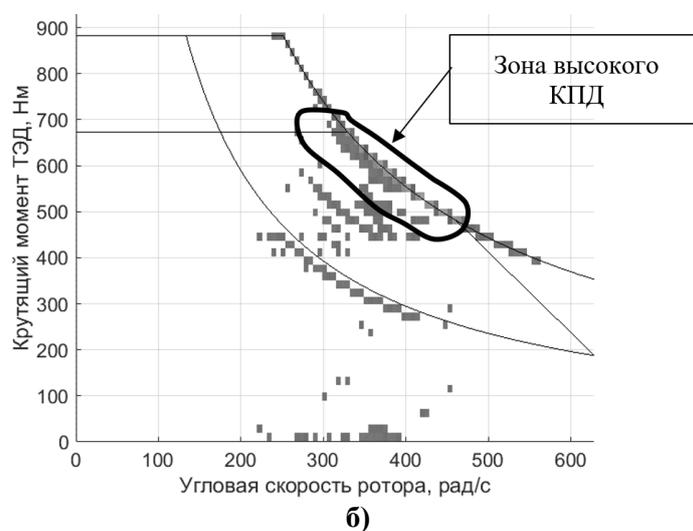
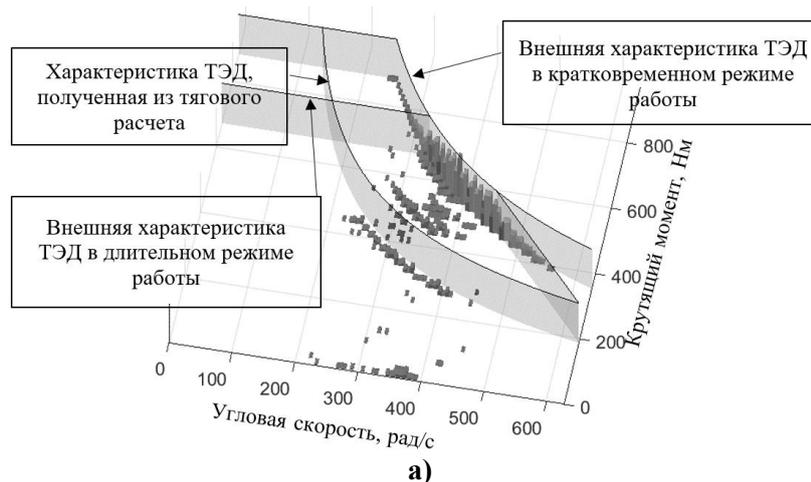


Рис. 12. а) Потребная механическая характеристика ТЭД; б) Зона высокого КПД

Зависимость средних скоростей движения машины от используемой максимальной мощности ТЭД по различным опорным поверхностям представлена на рис. 13.

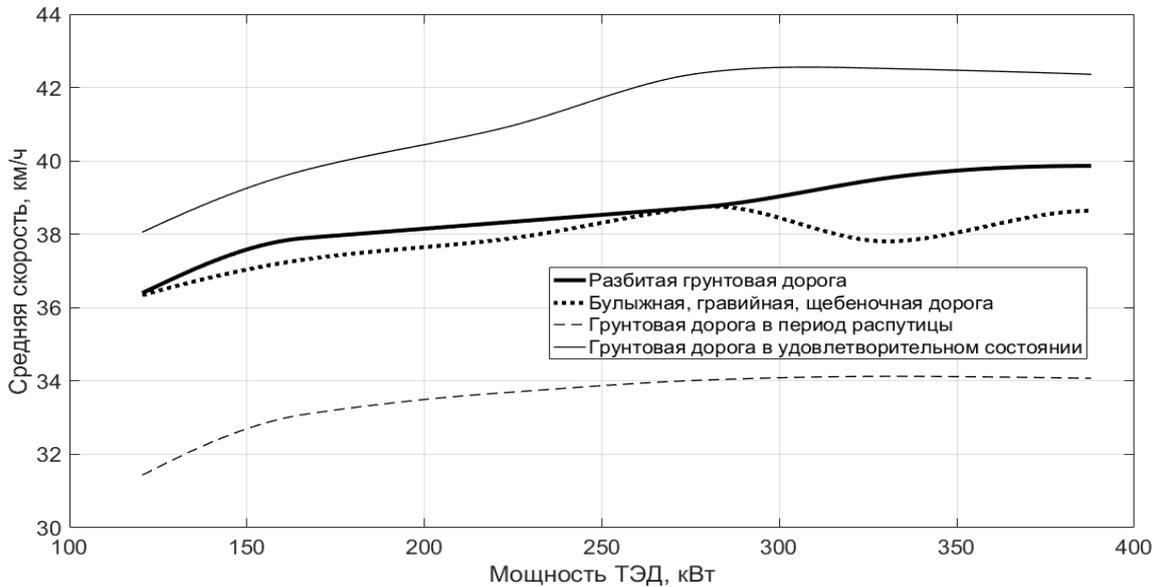


Рис. 13. Зависимость средней скорости движения ДГМ по заданной трассе от используемой максимальной мощности ТЭД

Таким образом, установлено, что при движении ДГМ по опорной поверхности (ОП) типа «булыжная, гравийная, щебеночная дорога» и «грунтовая дорога в период распутицы», увеличивать мощность ТЭД более 166 кВт нерационально. В случае движения по ОП «разбитая грунтовая дорога» мощность ТЭД не следует увеличивать свыше 222 кВт. В случае движения по ОП «грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии» мощность ТЭД не имеет смысла повышать, более чем до 277 кВт.

По результатам натурно-математического моделирования получены потребные механические характеристики ТЭД для каждого типа ОП, которые (в силу их качественного сходства), наиболее удобно представить в виде рис. 14 и табл. 2.

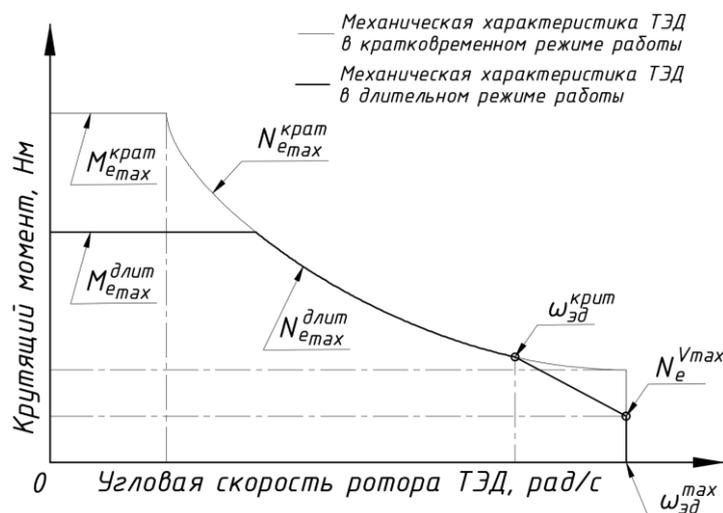


Рис. 14. Общий вид типовых механических характеристик ТЭД в длительном и кратковременном режиме работы

$N_{e_{max}}^{крат}$, $N_{e_{max}}^{длит}$ – максимальная мощность ТЭД в кратковременном и длительном режиме работы соответственно;

$M_{e_{max}}^{крат}$, $M_{e_{max}}^{длит}$ – максимальный крутящий момент ТЭД в кратковременном и длительном режиме работы соответственно;

$\omega_{эд}^{max}$ – максимальная угловая скорость ротора ТЭД;

$\omega_{эд}^{крит}$ – угловая скорость ТЭД, после которой максимальная реализуемая мощность электромашин может быть снижена;

$N_e^{v_{max}}$ – мощность ТЭД, необходимая для реализации максимальной скорости на твердом опорном основании.

Таблица 2

Параметры, описывающие кратковременные и длительные характеристики ТЭД ДГМ для различных типов ОП

№ ОП	$N_{e_{max}}^{крат} = N_{e_{max}}^{длит}$ кВт	$M_{e_{max}}^{крат}$ Нм	$M_{e_{max}}^{длит}$ Нм	$\omega_{эд}^{max}$, рад/с	$\omega_{эд}^{крит}$, рад/с	$N_e^{v_{max}}$, кВт
1	166	928,8	566	628	444	117,8
2	277		761		500	
3	222		672		460	
4	166		601		378	

- 1 – булыжная, гравийная и щебеночная дорога;
- 2 – грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии;
- 3 – разбитая грунтовая дорога;
- 4 – грунтовая дорога в период распутицы.

Таким образом, результирующая механическая характеристика ТЭД в длительном и кратковременном режиме работы для ДГМ определяется путем суммирования полученных характеристик для каждого из типов ДГУ с учетом вероятности возникновения дорожных условий [17]. Результирующая характеристика ТЭД ДГМ представлена на рис. 15 и в табл. 3 (удельная мощность 36,5 кВт/т).

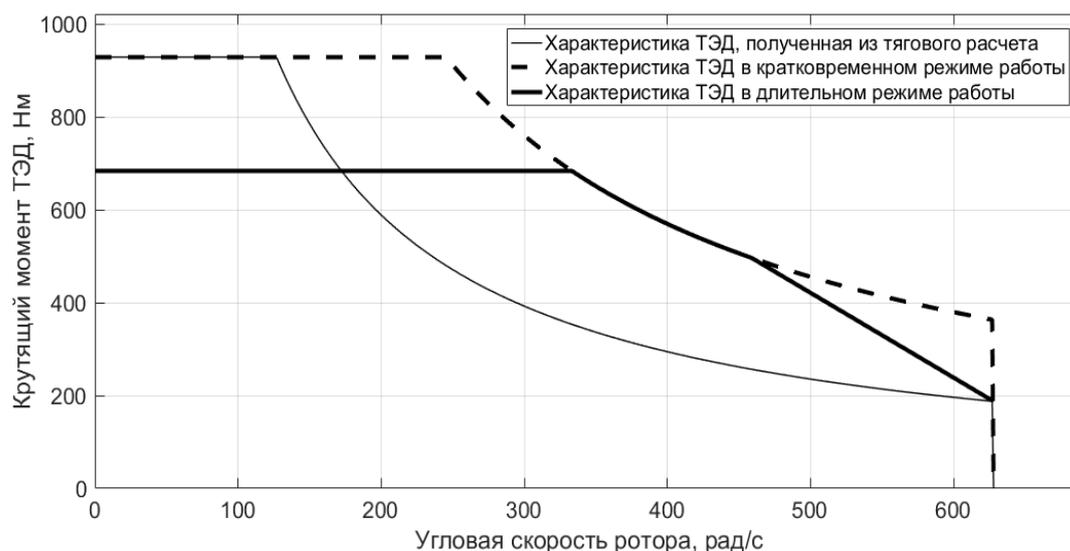


Рис. 15. Результирующая механическая характеристика ТЭД ДГМ

Таблица 3

**Параметры, описывающие результирующую характеристику ТЭД ДГМ
в кратковременном и длительном режиме работы**

$N_{e_{max}}^{крат\Sigma} = N_{e_{max}}^{длит\Sigma}$, кВт	$M_{e_{max}}^{крат\Sigma}$, Нм	$M_{e_{max}}^{длит\Sigma}$, Нм	$\omega_{эд}^{max\Sigma}$, рад/с	$\omega_{эд}^{крит\Sigma}$, рад/с	$N_e^{v_{max}}$, кВт
227,9	928,8	683,9	628	458,8	117,8

Вывод

Установлено, что зависимость средней скорости движения машины по трассе от используемой максимальной мощности ТЭД имеет насыщение (по достижению некоторого уровня максимальной мощности средняя скорость движения по трассе перестает увеличиваться или растет незначительно). Полученный результат позволяет выбрать наибольшую рациональную мощность ТЭД для рассматриваемой машины при движении в заданных дорожно-грунтовых условиях или их совокупности. По полученным в процессе виртуальных заездов статическим данным определены механические характеристики электромашины в длительном и кратковременном режиме эксплуатации. В случае длительного режима максимальная требуемая мощность электромашины может быть снижена в зоне крутящих моментов и угловых скоростей ротора, вероятность превышения которых при движении машины составляет менее 10 %. Предельная механическая мощность электромашины при этом может быть определена из условия соответствия вероятности работы ТЭД на внешней характеристике ~50-60 % при движении машины по заданным ДГУ или их совокупности под управлением водителя-оператора.

Кроме того, получено, что электродвигатель наиболее вероятно работает в области средних угловых скоростей вращения роторов (350-450 рад/с) при максимальной мощности, что требует высокого КПД ТЭД в данной зоне механической характеристики. Виртуальные заезды показали, что поворот, осуществляемый с помощью складывания звеньев, обладает значительной инерционностью (запаздыванием) независимо от мощности привода складывания звеньев, что не позволяет изменять траекторию движения ДГМ достаточно быстро и усложняет управление машиной на высоких скоростях. Указанный недостаток может быть устранен путем применения комбинированного способа поворота (за счет одновременного складывания секций и изменения скорости перематывания гусениц), что нуждается в дополнительном исследовании.

Библиографический список

1. **Котиев, Г.О.** Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №2. – С. 34-39.
2. **Котиев Г.О.** Математическая модель движения вездеходного транспортного средства / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.А. Бекетов // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – №1. – С. 50-54.
3. **Котиев, Г.О.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники, 2016. – С. 76-86.
4. **Котиев, Г.О.** Разработка высокоподвижных бронированных колесных и гусеничных машин нового поколения / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3 (15). – С. 30.
5. **Котиев, Г.О.** Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – № S5. – С. 39-58.

6. **Котиев, Г.О.** Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 12. – С. 11.
7. **Шмаков, А.Ю.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения сочлененных гусеничных машин: дисс. ...канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 121 с.
8. **Красненьков, В.И.** Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины / В.И. Красненьков, С.А. Харитонов // Труды МВТУ. – 1980. – №339. – С. 3-67.
9. **Эллис, Д.Р.** Управляемость автомобиля / Д.Р. Эллис. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
10. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.
11. **Дик, А.Б.** Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: дис. ...канд. техн. наук. – Омск: САДИ. 1988. – 224 с.
12. **Котиев, Г.О.** Комплексное подрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 184 с.
13. **Чернецкий, В.И.** Анализ точности нелинейных систем управления / В.И. Чернецкий. – М.: Машиностроение. 1968. – 246 с.
14. **Расшепляев, Ю.С.** Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления / Ю.С. Расшепляев, В.Н. Фандиенко. – М.: Энергия. 1981. – 144 с.
15. **Шалыгин, А.С.** Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1986. – 320 с.
16. **Котиев, Г.О.** Определение скоростных диапазонов многоцелевых колесных и гусеничных машин с электромеханической трансмиссией / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадучин // Труды НАМИ. – 2017. – № 3 (270). – С. 51-55.
17. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение. 1986. – 296 с.

*Дата поступления
в редакцию: 05.06.2019*

V.A. Gorelov¹, B.B. Kositsyn¹, A.V. Miroshnichenko², A. A. Stadukhin¹

CHARACTERISTIC DETERMINATION METHOD FOR ELECTRIC DRIVE OF INDEPENDENTLY ACTUATED CATERPILLAR ARTICULATED VEHICLE

Bauman Moscow state technical university¹,
OKB «Tekhnika» (Moscow)²

Purpose: the wide distribution of articulated tracked vehicles due to their high performance, such as maneuverability, high speed and load capacity. Further improvement of such vehicles can be achieved through the use of individual traction electric drive wheels, which will simplify the design of the articulation unit. In addition, the use of this type of transmission will eliminate the need to transfer mechanical power between the sections and expand the ability to control the rotation of the machine, including the use of tank style steering. However, the creation of such machines is difficult due to the lack of methods for determining the required traction motors characteristics, as well as statistical data on their operation.

Design/methodology/approach: to solve the presented problem, a complex of natural-mathematical modeling has been developed. It allows vehicle real-time simulating and investigating the dynamics of articulated tracked vehicles under human control in conditions close to actual operation. The article discusses the hardware of the developed complex, a mathematical model of the dynamics of a articulated tracked vehicle, as well as a method for generating roads and soil conditions.

Findings: the method of results processing the of virtual runs presented in this paper allows, at the design stage, to evaluate the dependence of the average speed on the maximum power of the machine, as well as to determine the requirements for the characteristics of the traction motors used in an individual drive.

Research limitations/implications: the study is limited to considering turning only by folding sections and without using driver assistance systems, which is the direction of further research.

Originality/value: the newly developed method is useful in the development of articulated tracked vehicles.

Keywords: articulated vehicle, electric drive, traction calculation, real-time driving simulator, propulsion motor, mechanical characteristic.

УДК 629.365

Б.Б. Косицын¹, Г.О. Котиев¹, А.В. Мирошниченко², Б.В. Падалкин¹, А.А. Стадухин¹**МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ
КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕДУЩИХ КОЛЕС**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана¹
ОКБ «Техника» (Москва)²

Анализируется возможность применения индивидуального электропривода ведущих колес колесных, гусеничных, а также двухзвенных гусеничных машин, а также необходимость разработки новых научных методов обеспечения их подвижности на этапе проектирования. Предложен метод определения основных характеристик привода, основывающийся на аналитическом тяговом расчете с последующим исследованием подвижности с помощью комплекса натурно-математического моделирования, позволяющий проводить имитацию движения машины в режиме «реального времени» под управлением водителя-оператора. В процессе аналитических расчетов определяются максимальная потребная сила тяги, передаточные числа двухдиапазонной трансмиссии машины, а также мощность тяговых электродвигателей, необходимая для обеспечения максимальной скорости. В дальнейшем результаты аналитического расчета используются в качестве исходных данных для исследования транспортных машин с помощью комплекса натурно-математического моделирования. С целью обеспечения заданной подвижности (средней скорости движения по трассе) мощность электродвигателей уточняется путем многократных виртуальных заездов. По результатам обработки данных моделирования могут быть определены моментные и скоростные характеристики кратковременных и длительных режимов работы тяговых электродвигателей, а также необходимые зоны высокого КПД.

Ключевые слова: транспортные средства, колесные машины, гусеничные машины, двухзвенные машины, электропривод, тяговый расчет, натурно-математическое моделирование, тяговый электродвигатель, механическая характеристика.

Введение

Схема электромеханической трансмиссии (ЭМТ) с индивидуальным приводом ведущих колес (ВК) является распространенной для колесных и гусеничных машин, а также перспективной для двухзвенных гусеничных машин. Главными преимуществами применения индивидуального привода ВК на транспортной машине являются простота механической части трансмиссии, легкость ее автоматизации и гибкость управления. При этом ограничения индивидуального привода проявляются в режимах с неравномерной загрузкой тяговых электродвигателей. Для колесных машин (КМ) таковым является преодоление подъема с характерной неравномерной нагрузкой на оси, а для гусеничной машины (ГМ) – поворот (с неравномерным распределением нагрузки на ведущие колеса забегающего и отстающего бортов). В связи с этим, для быстроходных транспортных машин целесообразно применение, по меньшей мере, двух диапазонов в трансмиссии. Высший диапазон предлагается использовать для транспортных задач, а низший – для движения в тяжелых условиях и выполнения технологических операций. Даже для такой тривиальной электромеханической трансмиссии современные научные методы обеспечения подвижности колесных и гусеничных машин на этапе проектирования в настоящее время отсутствуют. В настоящей статье предлагается метод, суть которого состоит в определении основных параметров привода с применением комплекса натурно-математического моделирования, использованием известных аналитических зависимостей тягового расчета и последующим уточнением характеристик тяговых электродвигателей.

Метод выбора потребной механической характеристики тягового электродвигателя транспортной машины

Выбор потребной механической характеристики тягового электродвигателя (ТЭД) предлагается проводить следующей последовательностью действий.

1. Исходя из заданной в техническом задании массы машины, необходимо определить потребную мощность ТЭД для обеспечения максимальной скорости при прямолинейном движении. Для этого применяется зависимость [1] (1):

$$N_{e_{max}} = \frac{(P_{\psi} + P_w)v_{max}}{\eta_{тр}k_{пот}n_{ТЭД}}, \quad (1)$$

где P_{ψ} – сила сопротивления движению машины со стороны опорной поверхности; P_w – сила сопротивления воздуха; v_{max} – требуемая максимальная скорость; $\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия (КПД) трансмиссии машины; $k_{пот}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности во вспомогательных агрегатах (для КМ 0,75...0,95 [1], для ГМ 0,83...0,9 [2]); $n_{ТЭД}$ – количество тяговых электродвигателей.

В данном случае, силу P_{ψ} необходимо выбирать исходя из таких условий эксплуатации, в которых предполагается движение машины со скоростью v_{max} (для КМ $P_{\psi} = 0,03 \cdot mg$ [1], для ГМ и ДГМ $P_{\psi} = 0,05 \cdot mg$ [2], где m – масса машины; g – ускорение свободного падения).

2. Предполагается, что первый диапазон трансмиссии исследуемых транспортных машин служит для преодоления максимально сопротивления движению (движение на крутой подъем, буксировка подобной машины или прицепа), а второй обеспечивает динамику машины при выполнении транспортной задачи и достижение максимальной скорости [3] (рис. 1).

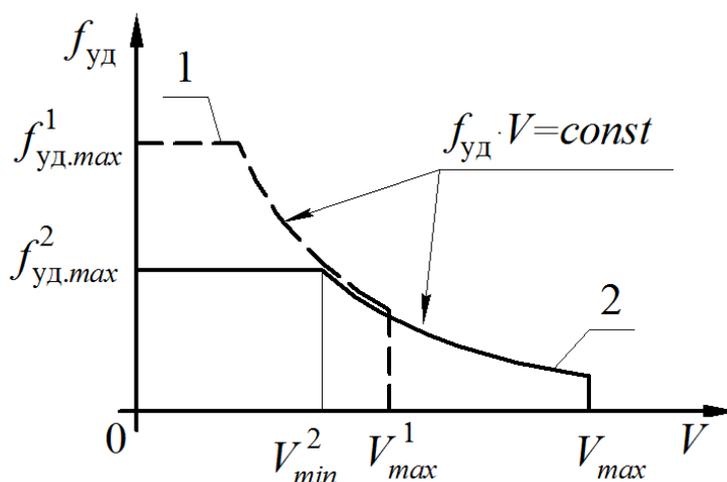


Рис. 1. Зависимость удельной силы тяги от скорости машины (1 – технологический диапазон; 2 – транспортный диапазон)

Тогда, задавшись максимальной угловой скоростью ротора ТЭД, определим передаточное отношение высшей передачи $i_{тр}^B$ следующим образом (2):

$$i_{тр}^B = \frac{\omega_{эд}^{max} \cdot r_{вк}}{v_{max}}, \quad (2)$$

где $\omega_{эд}^{max}$ – максимальная угловая скорость ротора ТЭД (для современных ТЭД, используемых на транспортных машинах, $\omega_{эд}^{max} = 6000-6500$ об/мин); $r_{вк}$ – радиус ведущего колеса (в случае КМ допускается использовать динамический радиус колеса при номинальной нагрузке).

ке).

3. При движении машины на высшей передаче электродвигатель должен обеспечивать возможность преодоления максимального дорожного сопротивления в транспортном диапазоне. Тогда потребный крутящий момент ТЭД $M_{e_{max}}^{треб}$, для каждого из рассматриваемых типов машин (ГМ, КМ и ДГМ), определяется по формуле (3):

$$M_{e_{max}}^{треб} = \frac{P_{\psi_{ТЭД}}^{max} r_{вк}}{i_{тр}^B \eta_{тр} k_{пот}}, \quad (3)$$

где $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ – максимальная сила дорожного сопротивления в транспортном диапазоне (приходящаяся на один ТЭД).

3.1 В случае ГМ максимальная сила сопротивления движению $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ определяются потребной тяговой силой на забегавшем борту P_2 , действующей при повороте в наиболее сложных условиях (поворот на «дернистом грунте») с максимальной дорожной кривизной $0,12 \text{ м}^{-1}$ [4], что соответствует фактическому радиусу поворота $R_f^{min} = 8,33 \text{ м}$ (4):

$$P_{\psi_{ТЭД}}^{max} = P_2 = \frac{mg}{2} \left(f_{гр} + \frac{\mu_{пL}}{2B} \right), \quad (4)$$

где $f_{гр}$ – коэффициент сопротивления прямолинейному движению ГМ (для случая «дернистого грунта» $f_{гр} = 0,07$ [5]); $\mu_{п}$ – коэффициент сопротивления повороту; L – база машины; B – колея машины.

Коэффициент сопротивления повороту определяется по формуле А.О. Никитина [6] (5):

$$\mu_{п} = \frac{\mu_{пmax}}{0,925 + 0,15 \frac{R_t'}{B}}, \quad (5)$$

где $\mu_{пmax}$ – максимальный коэффициент сопротивления повороту ГМ для данной опорной поверхности (в случае «дернистого грунта» $\mu_{пmax} = 0,85$ [5]); R_t – теоретический радиус поворота ГМ.

Теоретический R_t и фактический радиус поворота R_f ГМ связаны зависимостью [7] (6):

$$R_t \approx R_f \frac{B}{L}. \quad (6)$$

В итоге, для ГМ величина $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ определяется по формулам (4), (5) и (6).

3.2 Для транспортных КМ высокой проходимости силу $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ оценим следующим образом. Примем, что движение в сложных дорожных условиях, таких как преодоление снежной целины, крутого подъема или заболоченной местности, осуществляется в технологическом диапазоне, тогда максимально возможный коэффициент сопротивления качению КМ при выполнении транспортной задачи может быть реализован при движении по «грунтовой дороге в период распутицы» или по «песчаному грунту» и составляет $f_{грmax} = 0,15$ [5]. При этом, даже в случае движения по горному типу рельефа, с вероятностью 90 % угол преодолеваемого подъема не превысит $\alpha_{грmax} = 13^\circ$ [8]. Тогда максимально возможная сила сопротивления движению (воспринимаемая одним ТЭД) при выполнении транспортной задачи $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ определяется из решения уравнения (7):

$$mg \left(f_{грmax} \cos(\alpha_{грmax}) + \sin(\alpha_{грmax}) \right) = \sum_{i=1}^{n_{ТЭД}} \min(P_{\psi_{ТЭД}}^{max}, R_{zi} \mu_{smax}), \quad (7)$$

где R_{zi} – нормальные реакции, воспринимаемые колесами КМ; μ_{smax} – максимальный коэффициент взаимодействия (коэффициент сцепления) движителя с опорным основанием (в случае движения КМ по «грунтовой дороге в период распутицы» μ_{smax} достигает величины

0,4). Величина $f_{гр\max} \cos(\alpha_{гр\max}) + \sin(\alpha_{гр\max}) = 0,371$ для случая КМ меньше величины $\mu_{s\max} = 0,4$ в случае «грунтовой дороги в период распутицы», что подтверждает возможность движения и реализации силы сопротивления $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$, исходя из сцепных свойств шины с опорной поверхностью.

3.3 Для случая ДГМ величина $P_{\psi_{ТЭД}}^{max}$ определяется, исходя из условия обеспечения раздельного движения секций в случае принудительного расцепления или возможности преодоление максимального дорожного сопротивления по аналогии с КМ.

При движении ДГМ на подъем пренебрежем перераспределением нормальных реакций между секциями, тогда, исходя из формул (4) и (7), получим (8):

$$\begin{aligned}
 P_{\psi_{ТЭД}}^{max} &= \max(P_{\psi_{ТЭД\mu_1}}^{max}, P_{\psi_{ТЭД\mu_2}}^{max}, P_{\psi_{ТЭД\alpha_{гр}}}^{max}), \\
 P_{\psi_{ТЭД\mu_1}}^{max} &= \frac{m_1 g}{2} \left(f_{гр} + \frac{\mu_{п1} L_1}{2B_1} \right), \quad P_{\psi_{ТЭД\mu_2}}^{max} = \frac{m_2 g}{2} \left(f_{гр} + \frac{\mu_{п2} L_2}{2B_2} \right), \\
 mg \left(f_{гр\max} \cos(\alpha_{гр\max}) + \sin(\alpha_{гр\max}) \right) &= \\
 &= 2 \min \left(P_{\psi_{ТЭД\alpha_{гр}}}^{max}, \frac{m_1 g \mu_{s\max}}{2} \cos(\alpha_{гр\max}) \right) \\
 &+ 2 \min \left(P_{\psi_{ТЭД\alpha_{гр}}}^{max}, \frac{m_2 g \mu_{s\max}}{2} \cos(\alpha_{гр\max}) \right),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где m_1, m_2 – массы первой и второй секции; $\mu_{п1}, \mu_{п2}$ – коэффициент сопротивления повороту первой и второй секции для случая поворота с минимальным радиусом R_f^{min} по «дернистому грунту» (определяется по формулам (5)5) и (6)6)); $f_{гр}$ – коэффициент сопротивления прямолинейному движению ДГМ по «дернистому грунту»; L_1, L_2 – база первой и второй секции ДГМ; B_1, B_2 – колея первой и второй секции ДГМ; $P_{\psi_{ТЭД\mu_1}}^{max}, P_{\psi_{ТЭД\mu_2}}^{max}$ – сила, необходимая для обеспечения раздельного движения первой и второй секции ДГМ в случае расцепления (приходящаяся на один ТЭД секции ДГМ); $P_{\psi_{ТЭД\alpha_{гр}}}^{max}$ – сила, необходимая для преодоления максимального дорожного сопротивления по аналогии с КМ (приходящаяся на один ТЭД ДГМ).

Величины $\alpha_{гр\max}$ для случая КМ и ДГМ допускается принять одинаковыми. Коэффициент $f_{гр\max}$ для ДГМ определим по аналогии с КМ (для случая движения по «сухому песчаному грунту» $f_{гр\max} = 0,2$ [5]). Величина $(f_{гр\max} \cos(\alpha_{гр\max}) + \sin(\alpha_{гр\max})) = 0,42$ для случая ДГМ меньше величины $\mu_{s\max}$, достигающей 0,5 в случае «сухого песчаного грунта» [5], что подтверждает возможность движения и реализации силы сопротивления $P_{\psi_{ТЭД\alpha_{гр}}}^{max}$, исходя из сцепных свойств гусеницы с опорной поверхностью.

4. При движении машины на низшем диапазоне трансмиссии, ТЭД должен обеспечивать возможность преодоление максимально возможного дорожного сопротивления, исходя из технического задания. Для оценки такого сопротивления целесообразно использовать величину требуемой максимальной удельной силы тяги $f_{уд\max}$. Для полноприводных КМ высокой проходимости требуемую $f_{уд\max}$ примем равной $f_{уд\max} = 0,7$ [9]. Для ГМ и ДГМ, с целью обеспечения возможности буксировки себе подобных машин, $f_{уд\max} = 1,1$ [3]. Тогда передаточное отношение низшего диапазона $i_{тр}^H$ целесообразно определить как (9):

$$i_{тр}^H = \frac{f_{уд\max} \cdot mg \cdot r_{вк}}{M_{e\max}^{треб} \cdot \eta_{тр} n_{ТЭД} k_{пот}}. \tag{9}$$

5. Полученную при помощи тягового расчета величину $N_{e\max}^{треб}$ необходимо скорректировать, исходя из условия обеспечения требуемой средней скорости движения по среднестатистическим трассам. Область поиска требуемой тяговой характеристики может быть полу-

чена в следующем виде (рис. 2).

Для решения поставленной задачи используется подход, описанный в [10] и заключающийся в применении комплекса натурно-математического моделирования, который позволяет проводить имитацию движения исследуемых типов машин в режиме «реального времени» под управлением человека.

Разработанный комплекс, состоит из программной части, в которой реализованы математические модели динамики рассматриваемых типов машин и аппаратной части, включающей:

- ЭВМ, служащую для решения дифференциальных уравнений динамики, формирования трехмерного изображения и регистрации данных виртуального заезда;
- органы управления, служащие задания управляющих воздействий водителя;
- дисплей с пользовательским интерфейсом для обеспечения водителя-оператора информацией о прохождении трассы.

Математические модели основаны на представлении движения корпуса транспортной машины в виде плоского движения твердого тела. Одним из допущений является предположение об отсутствии вертикальных колебаний корпуса. Данное допущение позволяет получить информацию о предельных режимах работы ТЭД в связи с отсутствием ограничений скорости движения, связанных с влиянием системы подрессоривания. Основные уравнения и подходы, используемые в моделях, изложены в [11,12].

Таким образом, осуществляя виртуальные заезды по среднестатистическим трассам, необходимо, изменяя итерационным путем максимальную мощность ТЭД, определить такую $N_{e_{max}}^{треб}$, которая позволит обеспечить требуемую среднюю скорость движения машины в заданных условиях (рис. 3).

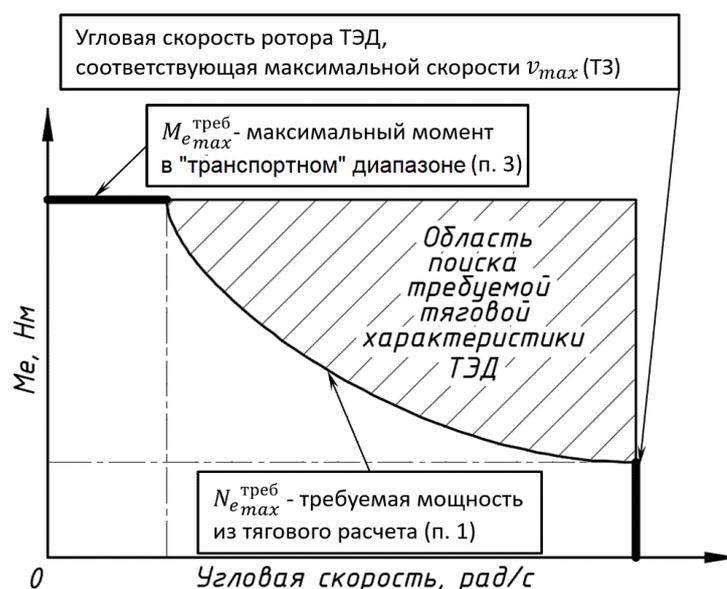


Рис. 2. Область поиска потребной тяговой характеристики

На рис. 3 показано ограничение средней скорости, следовательно, максимальной мощности ТЭД, связанное с безопасностью движения и обусловленное существованием критической скорости ТС в повороте по «заносу» и «опрокидыванию».

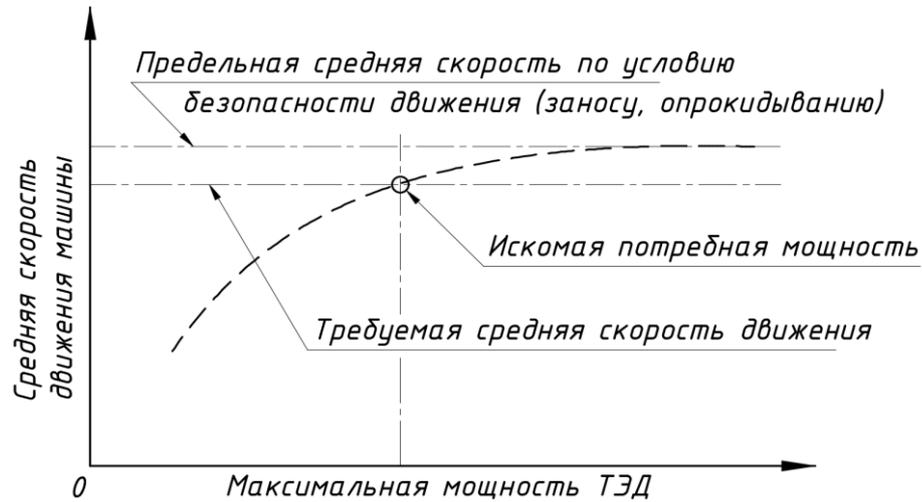


Рис. 3. Качественная зависимость средней скорости движения машины от максимальной мощности ТЭД

Заезды необходимо проводить по трассе, протяженность которой позволит обеспечить приближение средней скорости движения машины к некоторому установившемуся значению. Как показывает практика использования комплекса натурно-математического моделирования, для оценки средней скорости движения ТС на каждой итерации по мощности ТЭД следует проводить не менее трех заездов, с целью снижения влияния влияния ошибок при вождении (съезд с трассы и т.д.) Полученная таким образом величина $N_{e_{max}}^{треб}(\omega)$ является искомой максимальной мощностью ТЭД, требуемой для обеспечения заданной средней скорости.

Трассы для виртуальных испытаний создаются на основе статистических данных о дорожной кривизне k_d , максимальном коэффициенте взаимодействия с опорной поверхностью $\mu_{s_{max}}$, коэффициенте сопротивления движению $f_{гр}$. Реализация рассмотренных параметров по пути проводилась при помощи метода неканонических представлений [13-16]. Таким образом, при исследованиях всегда существует возможность создать трассу незнакомую для водителя. Фрагмент одной из «разыгранных» трасс показан на рис. 4.

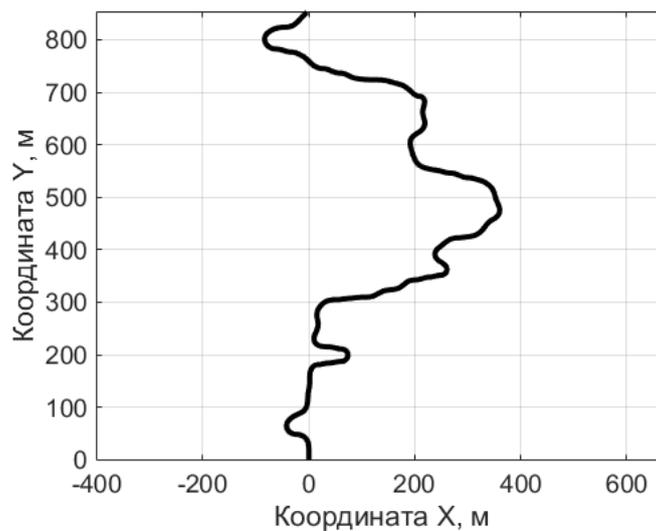


Рис. 4. Фрагмент «разыгранной» трассы для комплекса натурно-математического моделирования

По временным зависимостям крутящих моментов и угловых скоростей роторов ТЭД, полученным во время имитации движения, строится гистограмма, отражающая долю от общего времени работы электродвигателя в различных режимах при движении по трассе. Выделив на гистограмме наиболее вероятные режимы, можно экспертным методом сформировать требования к зоне высокого КПД электромашины в тяговом и генераторном режимах, а также к внешней механической характеристике ТЭД (отличной от кривой постоянной мощности) в длительном и кратковременном режиме работы (рис. 5).

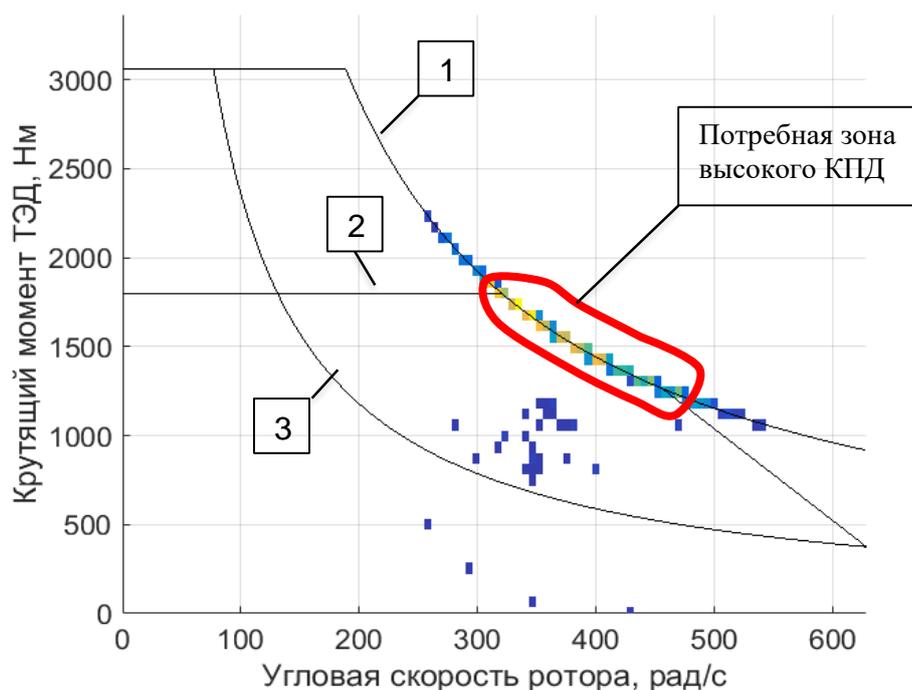


Рис. 5. Выбор зоны высокого КПД для гусеничной машины:

- 1 – внешняя характеристика ТЭД в кратковременном режиме;
- 2 – внешняя характеристика ТЭД в длительном режиме;
- 3 – характеристика ТЭД, полученная из тягового расчета

Таким образом, предлагаемый метод позволяет исходя из требуемой средней скорости определить необходимые характеристики тяговых электродвигателей ГМ, КМ и ДГМ с индивидуальным электроприводом ведущих колес. Общий вид блок-схемы метода приведен на рис. 6.

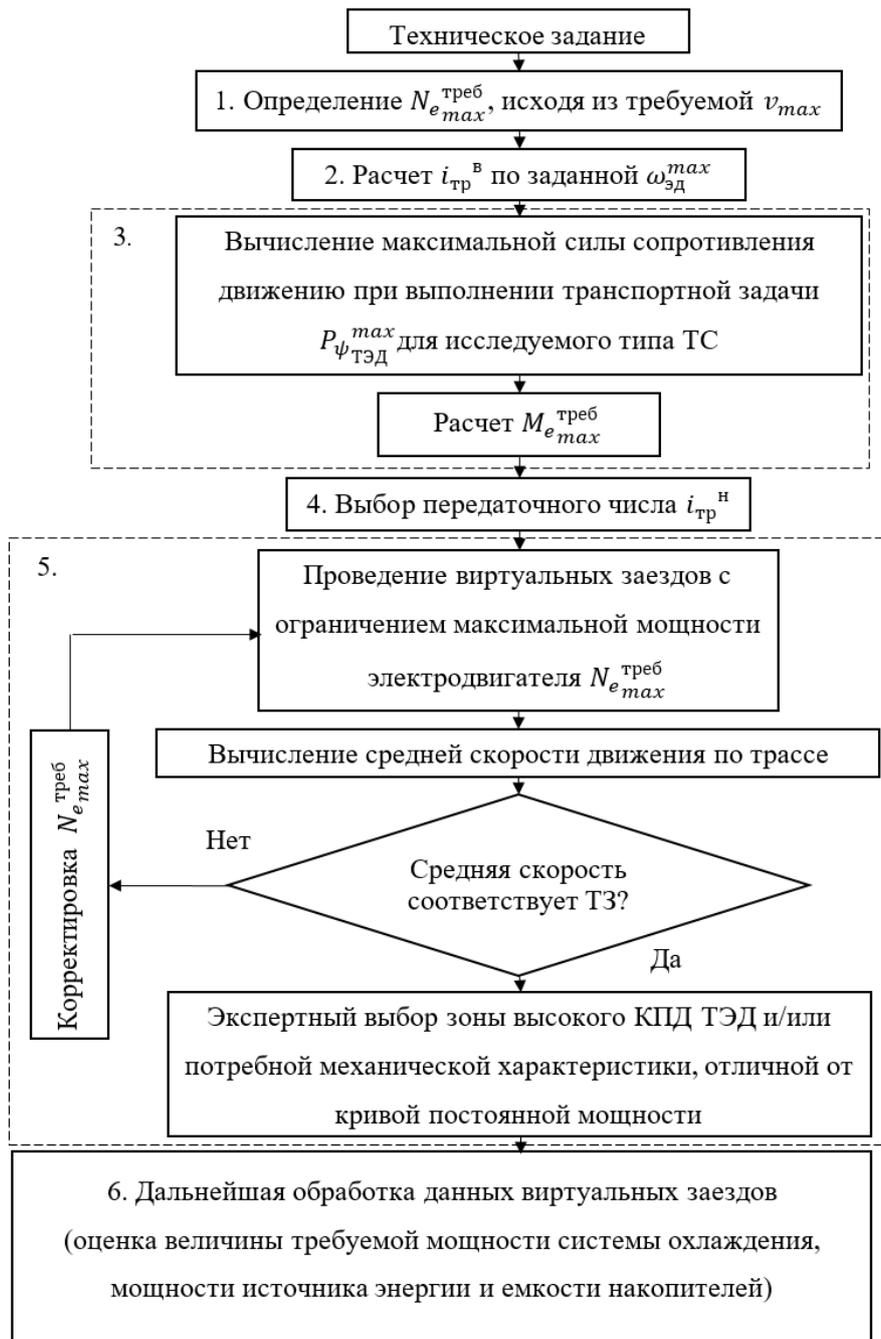


Рис. 6. Блок-схема метода определения требуемых характеристик индивидуального электропривода транспортных средств

Вывод

Представленный метод позволяет получить требуемую механическую характеристику ТЭД для транспортной машины в кратковременных и длительных режимах работы. Получаемые параметры могут являться требованиями к вновь разрабатываемому ТЭД, позволяющими определить конструкцию электромашины. При этом, существует возможность оценить характеристики механических тормозов, предназначенных для обеспечения режимов замедления, которые не способен реализовать ТЭД [12]. Дальнейшая обработка результатов натурно-математического моделирования позволяет (при необходимости) оценить требуемую мощность системы охлаждения и источника энергии транспортного средства, а также емкость накопителей электрической энергии.

Библиографический список

1. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: В 3 т. Т. 2 / Б.А. Афанасьев, Л.Ф. Жеглов, В.Н. Зузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. – 528 с.
2. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение. 1967. – 356 с.
3. **Котиев, Г.О.** Определение скоростных диапазонов многоцелевых колесных и гусеничных машин с электромеханической трансмиссией / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадухин // Труды НАМИ. – 2017. – № 3 (270). – С. 51-55.
4. **Савочкин, В.А.** Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин / В.А. Савочкин, А.А. Дмитриев. – М.: Машиностроение. 1993. – 320 с.
5. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение. 1986. – 296 с.
6. **Никитин, А.О.** Теория танка / А.О. Никитин. – М.: Типография Военной ордена Ленина академии бронетанковых войск, 1962. – 584 с.
7. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение. 1970. – 176 с.
8. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка / П.П. Исаков // Параметры внешней среды, используемые в расчете танков. Т.8. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
9. **Яковлев, А.И.** Конструкция и расчет электромотор-колес / А.И. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1970. – 240 с.
10. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка / П.П. Исаков // Основы систем управления развитием военных гусеничных машин. Т.1. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
11. **Горелов, В.А.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники. 2016. – С. 76-86.
12. **Горелов, В.А.** Математическая модель электромеханического тормозного управления колесной машины / В.А. Горелов, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 2 (73). – С. 38-43.
13. **Котиев, Г.О.** Комплексное поддрессирование высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 184 с.
14. **Шалыгин, А.С.** Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
15. **Расщепляев, Ю.С.** Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления / Ю.С. Расщепляев, В.Н. Фандиенко. М.: Энергия. 1981. – 145 с.
16. **Чернецкий, В.И.** Анализ точности систем управления / В.И. Чернецкий. – М., 1968. – 247 с.

*Дата поступления
в редакцию: 25.06.2019*

B.B. Kositsyn¹, G.O. Kotiev¹, A.V. Miroshnichenko², B.V. Padalkin¹, A.A. Stadukhin¹

THE METHOD OF ENSURING THE MOBILITY OF WHEELED AND TRACKED VEHICLES WITH INDIVIDUAL ELECTRIC DRIVE AT THE DEVELOPMENT STAGE

¹Bauman Moscow State Technical University

²OKB «Tekhnika» (Moscow)

Purpose: Nowadays, individual electric drives are widely used on wheeled and tracked vehicles, and this type of drive is also an attractive option for articulated tracked vehicles, which makes it necessary to develop new scientific methods to ensure their mobility at the design stage.

Design/methodology/approach: The authors propose a method for determination of the main characteristics of the drive based on analytical traction calculation followed by mobility studies using a driving simulator, which allows a real-time simulation of the vehicle under the control of the driver-operator. In the course of analytical calculations, the maximum required traction force, the gear ratios of the two-range transmission, as well as the power of the traction motors required to ensure maximum speed are determined. On the next step, the results of the analytical calculations are used as the input for the study of transport vehicles using a driving simulator. In order to ensure a required mobility (vehicle average speed on the route), the power of the electric motors is corrected based on multiple virtual runs.

Findings: The results of the virtual runs are used for the calculation of the moment and speed characteristics of the short-term and long-term operating modes and the necessary zones of high efficiency of the traction motors.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in electric drive for wheeled and tracked vehicles.

Originality/value: The proposed scientific method allows to obtain the parameters of the electric driveline for advanced tracked and wheeled vehicles.

Keywords: vehicles, wheeled vehicles, tracked vehicles, articulated vehicle, electric drive, traction calculation, real-time driving simulator, propulsion motor, mechanical characteristic.

УДК 629.113.01-585

В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, А.В. Тумасов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСМИССИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена конструкция двигателя модернизированной модели ГАЗон Next 10, более мощная по сравнению с существующими аналогами: пятиступенчатая коробка передач заменяется на шестиступенчатую, предполагается установка двух вариантов главной передачи с передаточными числами 3,9 и 4,55. Изменение параметров двигателя и трансмиссии оказало влияние на показатели модели ГАЗон Next 10. В качестве главных задач исследования определены разработка методики определения показателей тягово-скоростных свойств грузового автомобиля и установление зависимостей между величинами конструктивных параметров трансмиссии и показателями тягово-скоростных свойств исследуемого автомобиля. Определение названных показателей выполнено на основе решения графическим методом уравнения прямолинейного движения автомобиля с построением графиков силового и мощностного балансов, динамической характеристики, ускорений, времени и пути разгона. Установлено, что снижение передаточного числа главной передачи с 4,55 до 3,9 (на 17 %) повысило максимальную скорость автомобиля с пятиступенчатой коробкой передач на 16%, автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач – на 10%; с увеличением передаточного числа главной передачи с 3,9 до 4,55 максимальный уклон дороги, преодолеваемый автомобилем, линейно возрастает с 31,8 % до 37 %, а максимальные ускорения разгона увеличиваются на всех передачах коробки передач: на I – на 2,3 %, на II – на 10,2 %, на III – на 17 %, на IV – на 19,8 %, на V – на 26 %, на VI – на 40 %; удельная мощность автомобиля 12,5 кВт/т. Проведенные исследования позволяют более обоснованно подойти к выбору параметров трансмиссии модернизируемого грузового автомобиля ГАЗон Next 10.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, трансмиссия автомобиля, механическая ступенчатая коробка передач, главная передача, тягово-скоростные свойства автомобиля, показатели тягово-скоростных свойств.

Обоснование необходимости и цели работ

В сентябре 2014 г. Группа ГАЗ в Нижнем Новгороде приступила к серийному производству семейства среднетоннажных грузовых автомобилей пятого поколения ГАЗон Next грузоподъемностью 5 т и полной массой 8,7 т. Семейство состоит из трех групп: универсальной, городской и внедорожной. На автомобилях универсальной группы, пришедшим на замену модели ГАЗ-3307, установлены колеса с камерными шинами 8.25R20. На автомобилях городской группы с целью снижения погрузочной высоты платформы предусмотрена установка колёс с низкопрофильными бескамерными шинами 265/70R19,5. Группа внедорожных автомобилей с колесной формулой 4×4, оснащенных шинами повышенной проходимости, пришла на смену армейскому автомобилю ГАЗ-3308 «Садко». На всех моделях семейства ГАЗон Next был установлен отечественный дизельный двигатель с турбонаддувом ЯМЗ-5344 максимальной мощностью 109,5 кВт (148,9 л.с.) и модернизированная пятиступенчатая коробка передач, способная передавать к ведущим колесам крутящий момент до 500 Н·м.

С учетом трехлетнего опыта эксплуатации семейства автомобилей ГАЗон Next предприятие в 2018 г. приступило к разработке более совершенной модели ГАЗон Next 10. С целью повышения производительности и снижения себестоимости перевозок грузоподъемность модернизированной модели увеличена до 6,2 т, в результате чего полная масса возросла до 10 т. Для обеспечения движения автомобиля с максимальной скоростью до 105 км/ч потребовалась установка дизельного двигателя ЯМЗ-53445 максимальной мощностью 125 кВт (170 л.с.) и максимальным крутящим моментом 650 Н·м. Предполагается замена пятиступенчатой коробки передач на шестиступенчатую с шестой повышающей ступенью и установка двух вариантов главной передачи с передаточными числами 3,9 и 4,55. На неполноприводных моделях

предусмотрена установка низкопрофильных шин 265/70R19,5. Изменение параметров двигателя, трансмиссии и шин неизбежно должно оказать влияние на показатели тягово-скоростных свойств модернизированной модели. Соответственно, основными задачами исследования были определены:

- 1) разработка методики определения показателей тягово-скоростных свойств исследуемого грузового автомобиля;
- 2) установление зависимостей между величинами конструктивных параметров трансмиссии и показателями тягово-скоростных свойств исследуемого автомобиля.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортоориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства» по договору №03.G25.31.0270 от 29.05.2017г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218).

Методика выполнения работы

В качестве объекта исследования принят грузовой автомобиль ГАЗон Next 10, являющийся, согласно международной и отечественной классификации, транспортным средством категории N₂. Для проведения исследования были использованы исходные данные, предоставленные конструкторами Группы ГАЗ:

- полная масса $m_a = 10000$ кг;
- двигатель дизельный с турбонаддувом ЯМЗ-53445-20, максимальная стендовая мощность $P_{\text{emax}}^c = 125$ кВт (170 л.с.) при частоте вращения $n_{ep} = 2300$ об/мин, максимальный стендовый крутящий момент двигателя $T_{\text{emax}}^c = 650$ Н·м при частоте $n_{eT} = 1200 \dots 1600$ об/мин;
- коэффициент коррекции стендовой характеристики двигателя $k_c = 0,95$;
- коробка передач механическая ступенчатая с двумя вариантами передаточных чисел:

вариант 1 – пятиступенчатая с передаточными числами $u_{кI} = 6,555$; $u_{кII} = 3,933$; $u_{кIII} = 2,376$; $u_{кIV} = 1,442$; $u_{кV} = 1,000$;

вариант 2 – шестиступенчатая с передаточными числами $u_{кI} = 6,555$; $u_{кII} = 3,933$; $u_{кIII} = 2,376$; $u_{кIV} = 1,442$; $u_{кV} = 1,000$; $u_{кVI} = 0,782$;

- главная передача с двумя вариантами передаточных чисел: *вариант 1* – $u_0 = 3,9$; *вариант 2* – $u_0 = 4,55$.

- коэффициент полезного действия трансмиссии $\eta_{TP} = 0,87$;
- шины бескамерные низкопрофильные 265/70R19,5, статический радиус колес $r_{ст} = 0,421$ м, динамический радиус колес $r_d = 0,421$ м, радиус качения колёс $r_k = 0,438$ м;
- коэффициент сопротивления качению при скорости, близкой к нулю, $f_0 = 0.01$;
- коэффициент, учитывающий влияние скорости на потери при качении, $k_f = 0,0001$ с/м;
- параметры обтекаемости: коэффициент обтекаемости $c_x = 0,7$; плотность воздуха $\rho_B = 1,225$ кг/м³; площадь миделя $A_B = 4,15$ м²; фактор обтекаемости $W = 1,78$ (Н·с²)/м²;

- момент инерции вращающихся частей двигателя $J_e = 2,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, колеса $J_k = 9,36 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, число колес $n_k = 6$.

Для оценки тягово-скоростных свойств автомобиля были использованы единичные показатели, содержащиеся в нормативных документах [1-5];

- 1) максимальная скорость v_{amax} ;
- 2) время разгона на заданном пути 400 м и 1000 м t_{400} и t_{1000} ;
- 3) время разгона до заданной скорости 80 км/ч t_{80} ;
- 4) максимальный преодолеваемый автомобилем уклон дороги i %;
- 5) максимальные ускорения разгона автомобиля на низшей и высшей ступенях коробки передач a_{amaxI} , a_{amaxV} , a_{amaxVI} ;
- б) удельная мощность автомобиля $P_{\text{уд}}$.

Определение названных показателей выполнено на основе решения графическим методом уравнения прямолинейного движения автомобиля, изложенным в учебниках по теории автомобиля [6-9]. Были рассчитаны и построены графики: 1) силового баланса; 2) мощностного баланса; 3) динамической характеристики; 4) ускорений разгона; 5) времени разгона; 6) пути разгона с пяти- и шестиступенчатой коробками передач при дискретных значениях передаточных чисел главной передачи $u_0 = 3,9; 4,1; 4,3; 4,55$. На всех перечисленных графиках наносят численные значения скорости автомобиля (км/ч), которую рассчитывают по формуле (1):

$$v_a = \frac{0,378 n_e r_k}{u_k u_d u_0}, \quad (1)$$

где n_e – частота вращения вала двигателя, об/мин; r_k – радиус качения ведущих колес, м; u_k , u_d , u_0 – передаточные числа коробки передач, дополнительной и главной передач соответственно.

Силовой (тяговый) баланс автомобиля показывает, как распределяется полная тяговая сила на ведущих колёсах по отдельным видам сопротивления движению.

Уравнение силового баланса (Н):

- в общем виде (2)

$$F_T = F_f + F_i + F_B + F_a + F_{cx}; \quad (2)$$

- в развернутом виде при отсутствии буксования ведущих колес (3)

$$\frac{k_c T_e^c u_k u_d u_0 \eta_{\text{тр}}}{r_d} = f G_a \cos \alpha + G_a \sin \alpha + \frac{W v_a^2}{12,96} + \delta m_a a_a + F_{cx}, \quad (3)$$

где F_T – тяговая сила на ведущих колёсах, Н; F_f – сила сопротивления качению, Н; F_i – сила сопротивления подъему, Н; F_B – сила сопротивления воздуха, Н; F_a – сила сопротивления разгону, Н; F_{cx} – сила сопротивления прицепа, Н; k_c – коэффициент коррекции стендовой характеристики двигателя; T_e^c – эффективный стендовый крутящий момент двигателя, Н·м; u_k , u_d , u_0 – передаточные числа коробки передач, дополнительной и главной передач соответственно; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; r_d – динамический радиус колес, м; f – коэффициент сопротивления качению; G_a – вес автомобиля, Н; α – угол продольного уклона дороги, рад или град; W – фактор обтекаемости автомобиля, (Н·с²)/м²; v_a – скорость автомобиля, км/ч; δ – коэффициент учета вращающихся масс; m_a – масса автомобиля, кг; a_a – ускорение разгона автомобиля, м/с².

Мощностной баланс показывает, как распределяется тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам автомобиля, по отдельным видам сопротивления движению.

Уравнение мощностного баланса (кВт):

- в общем виде (4)

$$P_T = P_f + P_i + P_B + P_a + P_{cx}; \quad (4)$$

- в развернутом виде (5)

$$k_c P_e^c \eta_{\text{тр}} (1 - s_6) = \frac{f G_a v_a \cos \alpha + G_a v_a \sin \alpha + W v_a^3 / 12,96 + \delta m_a a_a v_a + F_{cx} v_a}{3600}, \quad (5)$$

где P_e^c – эффективная стендовая мощность двигателя, кВт; s_6 – коэффициент буксования ведущих колес.

Динамической характеристикой называют зависимость динамического фактора от скорости автомобиля на всех передачах трансмиссии. Динамический фактор автомобиля:

- в общем виде (6)

$$D = \frac{F_{\text{св}}}{G_a} = \frac{F_T - F_B}{m_a g}; \quad (6)$$

- в развернутом виде (7)

$$D = \frac{\frac{k_c T_e^c u_{\text{к}} u_{\text{д}} u_0 \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{д}}} - \frac{W v_a^2}{12,96}}{m_a g} \quad (7)$$

График ускорений представляет зависимость ускорений разгона от скорости автомобиля на всех передачах коробки передач. При движении автомобиля по горизонтальной поверхности дороги ускорения разгона рассчитывают по формуле (м/с²) (8):

$$a_a = \frac{(D - f)g}{\delta}, \quad (8)$$

где D – динамический фактор; f – коэффициент сопротивления качению; g – ускорение свободного падения, м/с²; δ – коэффициент учета вращающихся масс.

Время разгона автомобиля (с):

- в i -м интервале изменения скорости (9)

$$\Delta t_i = \frac{\Delta v_{ai}}{3,6 a_{\text{aicp}}} = \frac{v_{ai} - v_{a(i-1)}}{1,8(a_{a(i-1)} - a_{ai})}, \quad (9)$$

- на j -й передаче (10)

$$t_j = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (10)$$

- общее от минимальной до максимальной скорости (11):

$$t = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \Delta t_i + \sum_{j=1}^{m-1} t_{\text{п}}, \quad (11)$$

где Δv_{ai} – i -й интервал скоростей, км/ч; a_{aicp} – среднее ускорение в i -м интервале скоростей, м/с²; $v_{a(i-1)}$ и v_{ai} – скорости в начале и конце i -го интервала, км/ч; i – порядковый номер интервала изменения скорости; n – число интервалов скоростей на j -й передаче; m – число передач в коробке передач; $t_{\text{п}}$ – время переключения с одной передачи на другую.

Аналогично рассчитывают путь разгона автомобиля. В качестве примера на рис. 1 представлена динамическая характеристика автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач и главной передачей с передаточным числом 3,9, на рис. 2 и 3 – графики времени и пути разгона

автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач при передаточных числах главной передачи 4,55; 4,3; 4,1; 3,9.

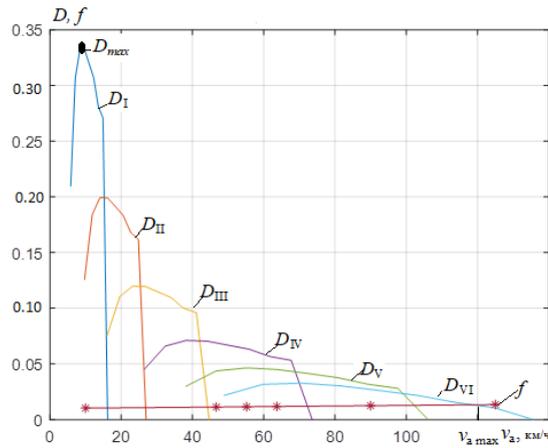


Рис. 1. Динамическая характеристика автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач и главной передачей с передаточным числом 3,9

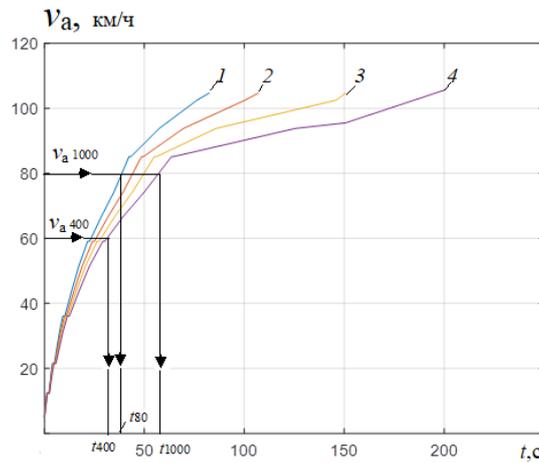


Рис. 2. Время разгона автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач при передаточных числах главной передачи: 1 – 4,55; 2 – 4,3; 3 – 4,1; 4 – 3,9

По графику мощностного баланса в точке пересечения кривых тяговой мощности на ведущих колёсах P_T и суммы мощностей, затрачиваемых на преодоление сил сопротивления качению и воздуха, $P_f + P_B$.

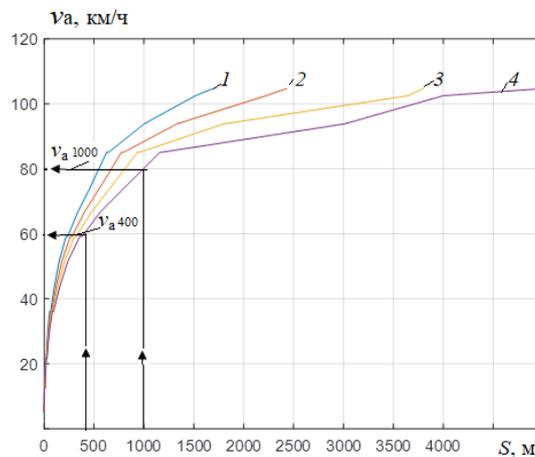


Рис. 3. Путь разгона автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач при передаточных числах главной передачи: 1 – 4,55; 2 – 4,3; 3 – 4,1; 4 – 3,9

Наличие 48 графиков позволило в полной мере выявить влияние параметров трансмиссии на перечисленные выше показатели тягово-скоростных свойств автомобиля ГАЗон Next 10. Максимальную скорость автомобиля определяют по одному из графиков:

- по графику силового баланса в точке пересечения кривых полной тяговой силы на ведущих колесах F_T и суммы сил сопротивления качению и воздуха $F_f + F_b$;
- по графику динамической характеристики (рис. 1) в точке пересечения кривых динамического фактора D_{VI} и коэффициента сопротивления качению f ;
- по графику ускорений разгона в точке пересечения кривой ускорения с осью абсцисс.

Время разгона на заданном пути определяют на горизонтальном участке длиной 400 м и 1000 м (t_{400} и t_{1000}). Для их определения в начале по графику пути разгона (рис. 3) находят скорости v_{a400} и v_{a1000} , достигаемые на этих отрезках пути, а затем по графику времени разгона (рис. 2) при этих скоростях искомые значения времени разгона t_{400} и t_{1000} .

Для грузовых автомобилей полной массой свыше 3,5 т время разгона определяют до заданной скорости 80 км/ч (t_{80}) по графику времени разгона (рис. 2).

Максимальный угол преодолеваемого автомобилем подъема (град) рассчитывают по формуле (12):

$$\alpha_{\max} = \arcsin \left[\frac{D_{\max} - f \sqrt{1 - D_{\max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \right], \quad (12)$$

где D_{\max} – максимальный динамический фактор на низшей ступени коробки передач; f – коэффициент сопротивления качению при скорости, соответствующей D_{\max} .

Численные значения D_{\max} берут с графика динамической характеристики (рис. 1), коэффициент сопротивления качению принимают равным $f_0 = 0,01$.

Максимальный уклон дороги (%), преодолеваемый автомобилем, находят по выражению (13):

$$i_{\max} = 100 \operatorname{tg} \alpha_{\max} \quad (13)$$

Максимальные ускорения разгона на низшей и высшей ступенях коробки передач определяют по графику ускорений разгона $a_a = f(v_a)$.

Удельную мощность автомобиля (кВт/т) находят по выражению:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{e \max}^c}{m_a}, \quad (14)$$

где $P_{e \max}^c$ – максимальная стендовая мощность двигателя, кВт; m_a – полная масса автомобиля, т.

Результаты исследования

На рис. 4 представлена зависимость максимальной скорости автомобиля с пяти- и шестиступенчатой коробками передач от передаточного числа главной передачи.

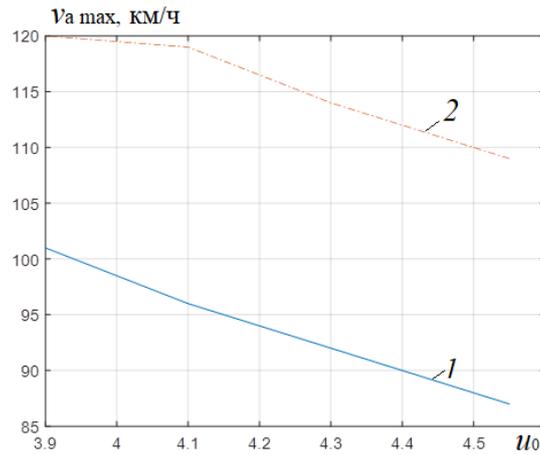


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости автомобиля от передаточного числа главной передачи с коробками передач: 1 – пятиступенчатой; 2 – шестиступенчатой

В табл. 1 и 2 показаны зависимости времени разгона на пути 400 м и 1000 м и времени разгона до скорости 80 км/ч от параметров трансмиссии.

Таблица 1

Зависимость времени разгона на пути 400 м и 1000 м от параметров трансмиссии

Количество ступеней в коробке передач	Передаточное число главной передачи	4,55	4,3	4,1	3,9
Пять	Время разгона на пути 400 м, с	32,5	32,5	32,5	32,5
	Время разгона на пути 1000 м, с	–	–	63	63
Шесть	Время разгона на пути 400 м, с	32	32	32	–
	Время разгона на пути 1000 м, с	64	65	65	–

Таблица 2

Зависимость времени разгона до скорости 80 км/ч от параметров трансмиссии

Количество ступеней в коробке передач	Передаточное число главной передачи	4,55	4,3	4,1	3,9
Пять	Время разгона до скорости 80 км/ч, с	41	41,2	41	41
Шесть	Время разгона до скорости 80 км/ч, с	39	40	41	41,5

Зависимость максимального преодолеваемого автомобилем уклона дороги (%) от передаточного числа главной передачи может быть аппроксимирована уравнением: $i = 31,8 + 8,0(u_0 - 3,9)$.

Рис. 5 иллюстрирует влияние передаточного числа главной передачи на максимальные ускорения разгона на I ... VI ступенях коробки передач.

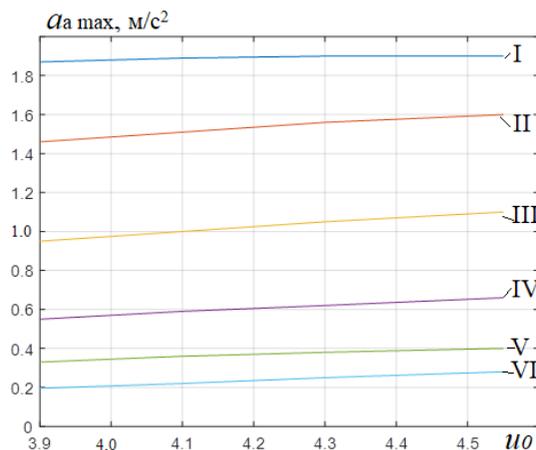


Рис. 5. Зависимость максимальных ускорений разгона от передаточного числа главной передачи на всех ступенях коробки передач

Выводы

1. При уменьшении передаточного числа главной передачи максимальная скорость автомобиля возрастает. Снижение передаточного числа главной передачи с 4,55 до 3,9 (на 17 %) повысило максимальную скорость автомобиля с пятиступенчатой коробкой передач с 87 км/ч до 101 км/ч (на 16 %), автомобиля с шестиступенчатой коробкой передач – с 109 км/ч до 120 км/ч (на 10 %).
2. Изменение передаточного числа главной передачи не оказывает влияния на время разгона автомобиля на пути 400 м и 1000 м и на время его разгона до скорости 80 км/ч.
3. С увеличением передаточного числа главной передачи с 3,9 до 4,55 максимальный уклон дороги, преодолеваемый автомобилем, линейно возрастает с 31,8 % до 37 %.
4. Повышение передаточного числа главной передачи с 3,9 до 4,55 приводит к увеличению максимальных ускорений разгона на всех ступенях шестиступенчатой коробки передач: на первой передаче на 2,3 %, на второй – на 10,2 %, на третьей – на 16,7 %, на четвертой – на 19,2 %, на пятой – на 26 %, на шестой – на 40 %.
5. Удельная мощность автомобиля 12,5 кВт/т.
6. Выполненное исследование позволит предприятию более обоснованно подойти к выбору параметров трансмиссии модернизируемой модели грузового автомобиля ГАЗон Next 10.

Библиографический список

1. Правила ЕЭК ООН № 68. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств в отношении измерения максимальной скорости. – Введ. 01.09.96. – Швейцария, Женева: ЕЭК ООН, 1996. – 16 с.
2. ГОСТ 22576 – 90 (СТ СЭВ 6893 – 89). Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 22576 – 77; введ. 1992 – 01 – 01. – М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Изд-во стандартов, 1992. – 14 с.
3. ГОСТ 4. 401 – 88. Автомобили грузовые. Номенклатура показателей. – Взамен ГОСТ 4.401 – 85; введ. 1989 – 01 – 01. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.
4. ГОСТ Р 52280 – 2004. Автомобили грузовые. Общие технические требования. – Введ. 2007 – 01 – 01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – III, 9 с.
5. **Кравец, В. Н.** Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств: учеб. пособие / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 157 с.

6. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля: учеб. для вузов / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 478 с.
7. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колёсных машин: учеб. / В.В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.
8. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
9. Автомобили: теория эксплуатационных свойств: учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / А.М. Иванов, А.Н. Нарбут. А.С. Паршин [и др.]; под ред. А.М. Иванова. – М.: ИЦ «Академия», 2013. – 176 с.

V.N. Kravets, R.A. Musarsky, A.V. Tumasov

INFLUENCE OF TRANSMISSION PARAMETERS ON THE INDICATORS OF THE TRAFFIC-SPEED PROPERTIES OF THE TRUCK CAR

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

Purpose: Development of methods for determining indicators of traction - speed properties and the establishment of dependencies between the values of the design parameters of the transmission and indicators of traction - speed properties of a truck.

Design/methodology/approach: Determination of indicators of traction-speed properties of the studied truck is made on the basis of solving the equation of its rectilinear motion by graphical method with the construction of graphs of force and power balances, dynamic characteristics, accelerations, time and way of speed up of the car.

Findings: The influence of the number of gearbox steps and the transmission number of the main gear on the main indicators of traction-speed properties of the truck is shown.

Research limitations/implications: Using a graphical method to solve the equation of rectilinear motion of the car required a large amount of computational work and construction of 48 graphs, but allowed to obtain reliable results due to the use of real characteristics and parameters of the vehicle.

Originality/value: The originality of the results is due to the fact that the object of the research is a new model of the family of medium - tonnage vehicles of the GAZ group. The study will allow the company to more reasonably approach the choice of parameters for the transmission of the car GAZon Next 10.

Key words: truck, car transmission, manual speed gearbox, main gear, traction and speed properties of the car, indicators of traction and speed properties.

УДК 629.113

С.И. Малеев, С.М. Огороднов, Е.В. Степанов, А.В. Пинчин

**ОПТИМИЗАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРЕДНИХ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС
АВТОМОБИЛЯ ГАЗЕЛЬ NEXT**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена методика определения оптимальных значений кинематических характеристик поворотного устройства передних управляемых колес автомобиля с учетом вероятностного характера их изменения при случайном возмущении микропрофиля дороги. Установлено, что деформации упругого элемента подвески и обусловленные ими вертикальные перемещения колеса приводят к изменению кинематических характеристик установки управляемого колеса (угла развала и схождения). Проектирование поворотного узла (механизма) управляемого колеса автомобиля с учетом диапазона изменения кинематических характеристик при случайном возмущении микропрофиля поверхности дороги позволяет выбрать оптимальные значения углов установки управляемого колеса и увеличить долговечность шин.

Ключевые слова: угол развала, схождение, шина, колесо, качение, скольжение, возмущение, микропрофиль, дорога.

Значительную долю стоимости владения транспортным средством составляют расходы, связанные с приобретением шин, а также их сезонной смены. Помимо этого, качество и состояние шин оказывает непосредственное влияние на показатели активной безопасности: управляемость, курсовую и траекторную устойчивость, а также на проходимость автомобиля. Кинематические характеристики (угол развала и схождение) поворотного устройства передних управляемых колес существенно влияют на износ шин. При этом большее значение имеют не величины этих параметров, а их соответствие, обеспечивающее качение шины колеса без скольжения по опорной поверхности. Особую актуальность обретает в данном контексте задача выбора и обоснования оптимальных кинематических характеристик поворотного устройства и установки колеса. При ее решении должен быть выполнен анализ: соответствия углов установки колеса по условиям качения шины без относительного скольжения с учетом бокового увода шины при статической нагрузке; влияния динамических возмущений при движении в реальных дорожных условиях на кинематические характеристики подвески (изменение углов установки и колеи управляемых колес в диапазоне наиболее вероятных деформаций подвески).

В настоящей статье представлена методика определения оптимальных значений кинематических характеристик поворотного устройства передних управляемых колес автомобиля с учетом вероятностного характера их изменения при случайном возмущении микропрофиля дороги.

Соответствие углов установки колеса (развала и схождения) при выполнении условия качения шины без скольжения относительно опорной поверхности при статической нагрузке в прямолинейном движении определяется в соответствии с выражением (1):

$$\Delta u_{\alpha} = -\Delta u_{\gamma}, \quad (1)$$

где Δu_{α} – деформация шины вдоль оси Y при вращении колеса за счет «схождения» колес (рис. 1); Δu_{γ} – кинематический увод, обусловленный деформацией шины при вращении колеса за счет «угла развала» колес (рис. 2), α – «угол схождения» (рис. 1), γ – угол развала (рис. 2).

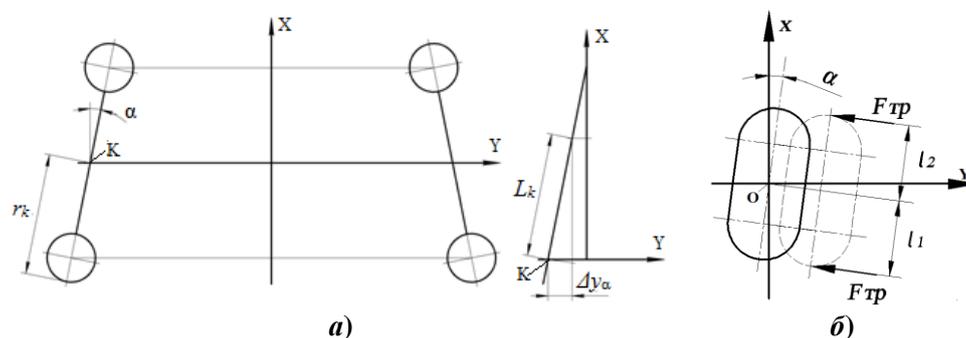


Рис. 1. Схема установки управляемых колес со сходимом:
а) – деформация шины, б) – действующие силы

Деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес со «сходимом», при отсутствии относительного скольжения шины по опорной поверхности (рис. 1б), определяются в соответствии с выражениями (2):

$$\Delta y_\alpha = L_k \alpha, \quad \alpha = \arcsin \frac{(B-A)}{4r_k}, \quad L_k = 2\pi r_k, \quad (2)$$

где L_k – расстояние, на которое переместится точка K контакта колеса с опорной поверхностью за один оборот колеса; α – «угол сходимом»; A, B – расстояния, определяемые при измерении сходимом колес; r_k – радиус качения колеса; X – продольная ось автомобиля; Y – ось передних колес автомобиля.

При этом в контакте колеса с опорной поверхностью, за счет смещения пятна контакта вдоль оси X и изменения соотношения плеч l_1, l_2 сил трения $F_{тр}$, возникает момент, поворачивающий колесо (пятно контакта) относительно вертикальной оси по часовой стрелке (рис. 1б).

Деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес с развалом равна (3):

$$\Delta y_\gamma = L_k \frac{\gamma}{k_\gamma}, \quad (3)$$

где Δy_γ – деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес с углом развала; γ – угол развала; k_γ – коэффициент сопротивления боковому уводу шины колеса; $k_\gamma=4...6$.

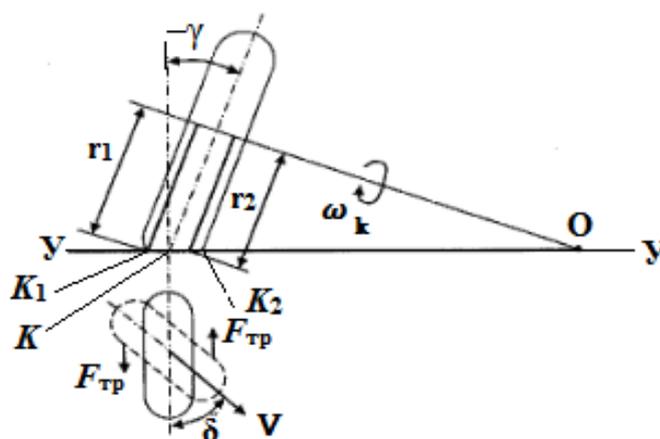


Рис. 2. Схема увода управляемого колеса, установленного с развалом

В контакте колеса с опорной поверхностью, установленного в соответствии с технической характеристикой автомобиля с отрицательным углом развала $-\gamma$, (рис. 2) возникает

момент, поворачивающий отпечаток относительно плоскости вращения колеса на угол δ , против часовой стрелки и компенсирующий поворот отпечатка контакта за счет угла схождения.

Допустимые значения углов схождения, обеспечивающие качение колеса без скольжения, в соответствии с выражениями (1), (3) определяются зависимостью (4):

$$\Delta y_{\alpha} = -\Delta y_{\gamma}, \quad \alpha = \frac{-Y}{k_{\gamma}}. \quad (4)$$

Расчетные значения угла схождения при возможных значениях угла развала γ при выполнении по условию качения колеса без осевой деформации (скольжения) и с учетом вариативности коэффициента сопротивления боковому уводу шины колеса k_{γ} ($k_{\gamma} = 4 \dots 6$) определяются в соответствии с выражениями (5), (6):

$$\alpha_{\text{дmin1}} = \frac{\gamma_{\text{min}}}{k_{\gamma_{\text{min}}}}, \quad \alpha_{\text{дmin2}} = \frac{\gamma_{\text{min}}}{k_{\gamma_{\text{max}}}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{дmax1}} = \frac{\gamma_{\text{max}}}{k_{\gamma_{\text{min}}}}, \quad \alpha_{\text{дmax2}} = \frac{\gamma_{\text{max}}}{k_{\gamma_{\text{max}}}}, \quad (6)$$

Где $\alpha_{\text{дmin1}}$, $\alpha_{\text{дmin2}}$ – минимальные значения допустимых углов схождения при минимальном значении угла развала γ_{min} и соответственно минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу шины $k_{\gamma_{\text{min}}}$, $k_{\gamma_{\text{max}}}$, $\alpha_{\text{дmax1}}$, $\alpha_{\text{дmax2}}$ – максимальные значения допустимых углов схождения при максимальном значении угла развала γ_{max} и соответственно минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу шины $k_{\gamma_{\text{min}}}$, $k_{\gamma_{\text{max}}}$.

Например, конструктивные значения углов установки управляемых колес $\alpha_{\text{к}}$ и $\gamma_{\text{к}}$, с учетом допустимых предельных отклонений, приведенные в технической документации автомобиля Газель Next составляют: угол развала $\gamma_{\text{к}} = (0^{\circ}20' \pm 15')$, $\gamma_{\text{max}} = (0^{\circ}35')$, $\gamma_{\text{min}} = (0^{\circ}05')$, угол схождения $\alpha_{\text{к}} = (0 \dots 7')$. Выбранные для указанного автомобиля кинематические параметры установки колес приводят к быстрому износу шин.

Расчетные допустимые значения углов схождения α по условию качения колеса без скольжения, формулы (1) – (4) при конструктивно заданных минимальном и максимальном значениях угла развала и вариациях значений коэффициентов сопротивления боковому уводу шины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные допустимые значения углов схождения $\alpha_{\text{д}}$ автомобиля ГАЗель Next
(по условию качения колеса без скольжения)

Обозначение	Значения параметров									
	0°5'		0°35'		– 0°20'		– 0°30'		– 0°40'	
γ	0°5'		0°35'		– 0°20'		– 0°30'		– 0°40'	
k_{γ}	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
$\alpha_{\text{д, мин}}$	-0°1'15''	-0°0'50''	-0°8'45''	-0°5'50''	0°5'	0°3'20''	0°7'30''	0°5'	0°10'	0°6'40''

В соответствии с результатами расчетов выполнены построения границ области расчетных допустимых значений углов схождения $\alpha_{\text{д}}$, в пределах которой качение колеса осуществляется без скольжения, при конструктивно установленных значениях минимальных $\gamma_{\text{кmin}}$, максимальных $\gamma_{\text{кmax}}$ и рекомендованном $\gamma_{\text{р}}$ значениях углов развала и минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу (рис. 3).

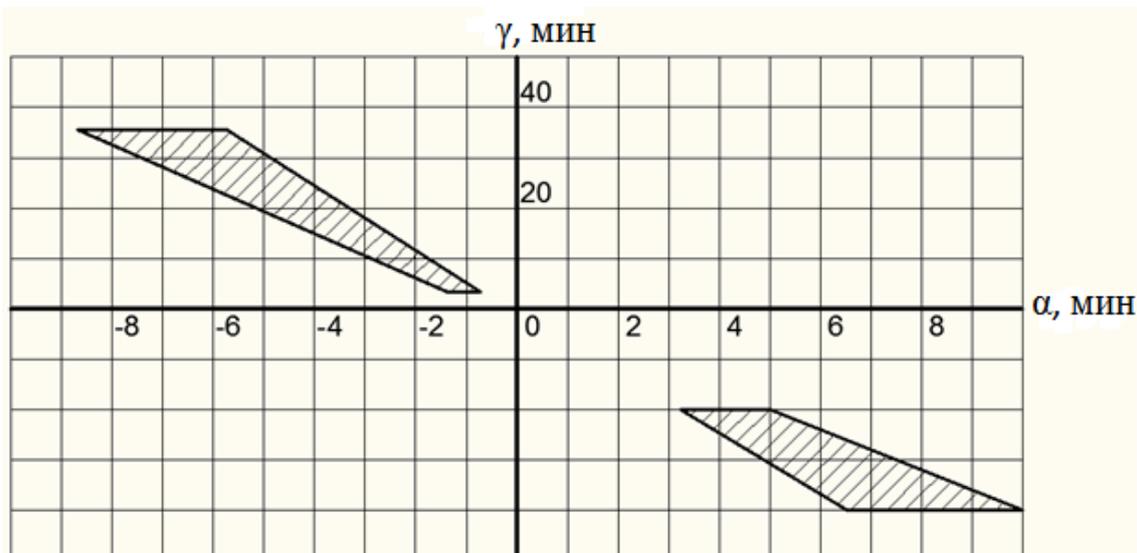


Рис. 3. Области расчетных допустимых значений углов схождения и развала:
1 - $k_{\gamma\max}$, 2 - $k_{\gamma\min}$

В результате расчетов установлено:

- условие качения колеса без скольжения при положительных значениях угла развала γ выполняется только для отрицательных значений угла схождения α , что не соответствует конструктивно заданным значениям $\alpha = (0 \dots 7/)$;
- условие качения колеса без скольжения выполняется для конструктивно заданных значений $\alpha = (0 \dots 7/)$ только при отрицательных значениях угла развала γ и для ограниченного диапазона изменения угла схождения α ;
- диапазон изменения угла схождения α , обеспечивающий выполнение условий качения колеса, расширяется при увеличении угла развала γ .

Для исследования характера изменения угла развала при деформации упругого элемента подвески в пределах от снаряженной нагрузки $f_{\text{сн}}$ до максимального динамического «прогиба» f_{max} был разработан алгоритм и реализована программа, позволяющая выполнить расчет массива параметров γ и α при первоначально установленных значениях угла развала при расчетной статической нагрузке $\gamma = -20^\circ$ с последующим увеличением его значения и интерпретировать массив графически.

На рис. 4 (кривая 1) показан график зависимости величины угла развала γ при первоначальном (конструктивно заданном) его значении под расчетной статической нагрузке $\gamma_{\text{ст}} = 20^\circ$. В этом случае с учетом возможных и наиболее вероятных деформаций упругого элемента подвески при движении по дороге отклонения угла развала от установленного для статического положения будут преимущественно находиться в области положительных значений, не соответствующих условиям качения колеса без скольжения. В случае первоначального положительного значения угла развала γ его знак меняется лишь при достаточно больших деформациях, значительно превосходящих статическую. Поэтому можно предположить, что при случайном возмущении от микропрофиля дороги существенную часть времени или пути движения значения углов развала не будут принадлежать области оптимальных значений. При отрицательных значениях угла развала имеет место тенденция сохранения отрицательного значения угла развала при колебаниях деформаций относительно положения под статической нагрузкой. В этом случае можно предположить, что условие качения колеса без скольжения (сохранение отрицательного значения угла развала γ при заданных положительных значениях угла схождения α) будет сохраняться в большем диапазоне колебаний деформации подвески относительно положения при статической нагрузке (рис. 4, кривая 2).

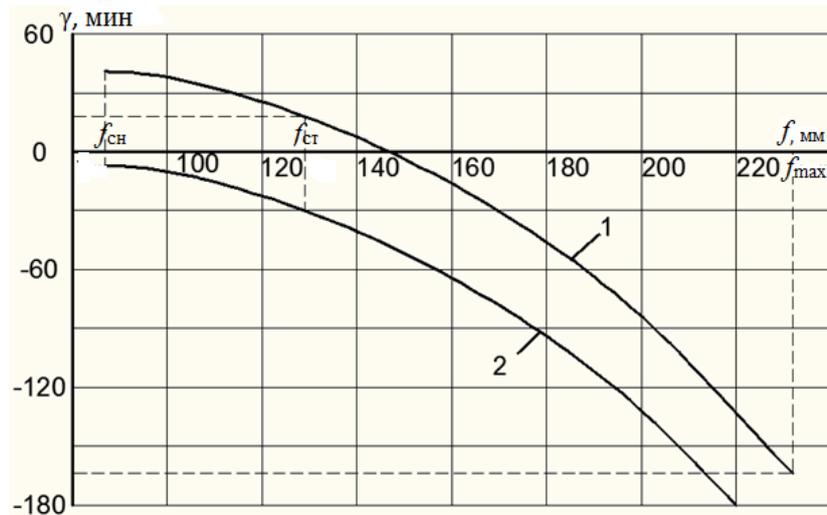


Рис. 4. Зависимость угла развала колеса от деформации подвески:
1 - $\gamma_{ст} = 20'$, 2 - $\gamma_{ст} = -30'$

При движении по дорогам со случайными характеристиками микропрофиля наиболее вероятные средние значения кинематических параметров и характеристик определяются с учетом действующего возмущения микропрофиля опорной поверхности, вызывающего изменения величин нормальной реакции и деформации подвески. Необходимо отметить, что экспериментальные выборочные реализации процессов изменения нормальной реакции, действующей в пятне контакта шины колеса с опорной поверхностью на переднем колесе легкого коммерческого грузовик ГАЗель с дизельным двигателем CUMMINS ISF 2.8, однозначно определяют процессы изменения деформации упруго элемента и моментные функции случайных выборочных реализаций перемещений колеса.

Испытания проводились на полигоне ООО «Автомобильный завод «ГАЗ» при полной загрузке автомобиля на дороге с асфальтобетонным покрытием (асфальт) и булыжной дороге ровного замощения (булыжник) с различными скоростями. Установлено, что распределения случайных величин нормальных реакций, при движении автомобиля по дорогам удовлетворительно описываются нормальным законом. Средние значения величин приведенных деформаций подвески и нормальной реакции в этом случае рассматриваются как наиболее вероятные для заданных эксплуатационных режимов, и в первом приближении могут считаться соответственно равными статическим величинам приведенной деформации подвески и нагрузке на ось (колесо). Отклонения нормальной реакции (силы) N_z от среднего значения описываются с помощью средних квадратических величин. С вероятностью $P = 0,9973$ значения нормально распределенной случайной величины « x » стандартного отклонения « s », полученные в результате обработки выборки лежат в интервале $(\bar{x} - 3s; \bar{x} + 3s)$ (6):

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2}, \quad (6)$$

где s – стандартное отклонение; n – число измерений значений непрерывного процесса при обработке выборочной реализации; σ – среднее квадратическое значение выборочной реализации.

С учетом вида функции плотности вероятности нормально распределенной случайной величины, отклонения случайной величины от среднего значения в пределах $\pm 1\sigma$ составляют от 68,2 до 72 % и считаются наиболее вероятными. В табл. 1 приведены значения средних квадратических величин (СКВ) нормальной реакции σ_{R_z} , полученные экспериментально при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ и соответствующие им расчетные значения СКВ приведенных деформаций подвески σ_f .

Наиболее вероятные значения углов развала при отклонении случайной величины приведенной деформации подвески от среднего значения в пределах $\pm \sigma_f$ определяются в соответствии с зависимостью угла развала колеса от деформации подвески, полученной при моделировании положения элементов направляющего устройства (рис. 4).

Расчет вероятных максимальных значений угла развала, соответствующих отклонениям угла развала γ от среднего значения m_γ (при статическом положении) в пределах средних квадратичных значений приведенной деформации $\pm 1\sigma_f$, выполняются графически. В табл. 2 приведены значения граничных величин области вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ. Расчетные вероятные максимальные значения углов развала, полученные для режимов движения с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные вероятные максимальные значения углов развала

Скорость, км/ч	Булыжник			Асфальт		
	30	40	50	60	75	90
СКВ σ_f , м	0,0389	0,0430	0,0452	0,0109	0,0145	0,0152
Вероятные границы угла развала γ , мин	-12,5; -77,5	-12,5; -81,3	-12,5 -91,3	-22,5; -41,3	-20,0 -43,8	-17,5; -45,0

На рис. 5 приведены границы области наиболее вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ.

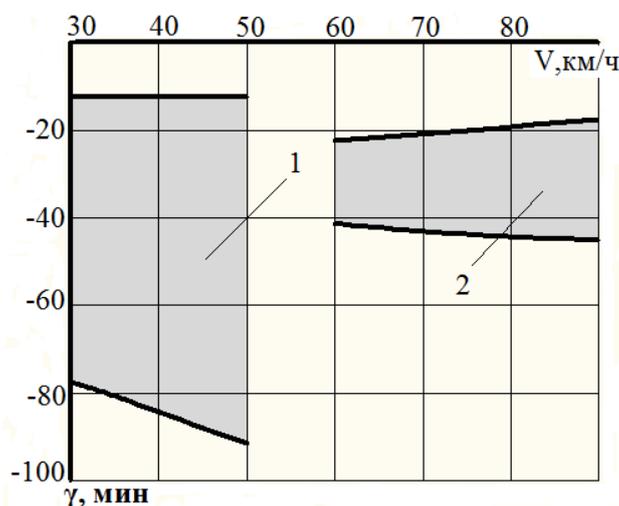


Рис. 5. Расчетные вероятные максимальные значения углов развала γ :
 1 – скорость 30-50 км/ч, булыжник,
 2 – скорость 60-90 км/ч, асфальт

Наиболее вероятные максимальные значения углов развала определяются при отклонении случайной величины приведенной деформации подвески в пределах $\pm \sigma_f$ от среднего значения m_γ , приблизительно равном приведенной деформации при статическом положении.

Расчет вероятных максимальных значений угла развала, соответствующих его отклонениям от среднего пределах средних квадратичных значений приведенной деформации \pm

$1\sigma_f$, выполняются графически. На рис. 5 приведены границы области наиболее вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ и при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ. В табл. 3 приведены значения средних квадратических величин (СКВ) нормальной реакции σ_{Rz} , полученные экспериментально при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ и соответствующие им расчетные значения СКВ приведенных деформаций подвески σ_f . Приведенная к колесу деформация подвески определяется как отношение вертикальной (нормальная) силы N_z , действующей на колесо со стороны опорной поверхности к приведенной к колесу жесткости подвески (7):

$$f_{пр} = \frac{N_z}{C_{пр}}, \quad (7)$$

где $f_{пр}$ – приведенная к колесу деформация подвески; N_z – нормальная реакция опорной поверхности; $C_{пр}$ – приведенная к колесу жесткость подвески.

Таблица 3

Значения средних квадратических величин нормальной реакции σ_{Rz}
и приведенных деформаций σ_f подвески

Наименование	Значения параметров					
	Булыжник			Асфальт		
Тип покрытия	Булыжник			Асфальт		
Скорость, км/ч	30	40	50	60	75	90
СКВ σ_{Rz} , Н	1745,2	1931,1	2029,7	488,2	649,1	682,0
СКВ σ_f , м	0,0389	0,0430	0,0452	0,0109	0,0145	0,0152

На рис. 6 приведены границы области вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ.

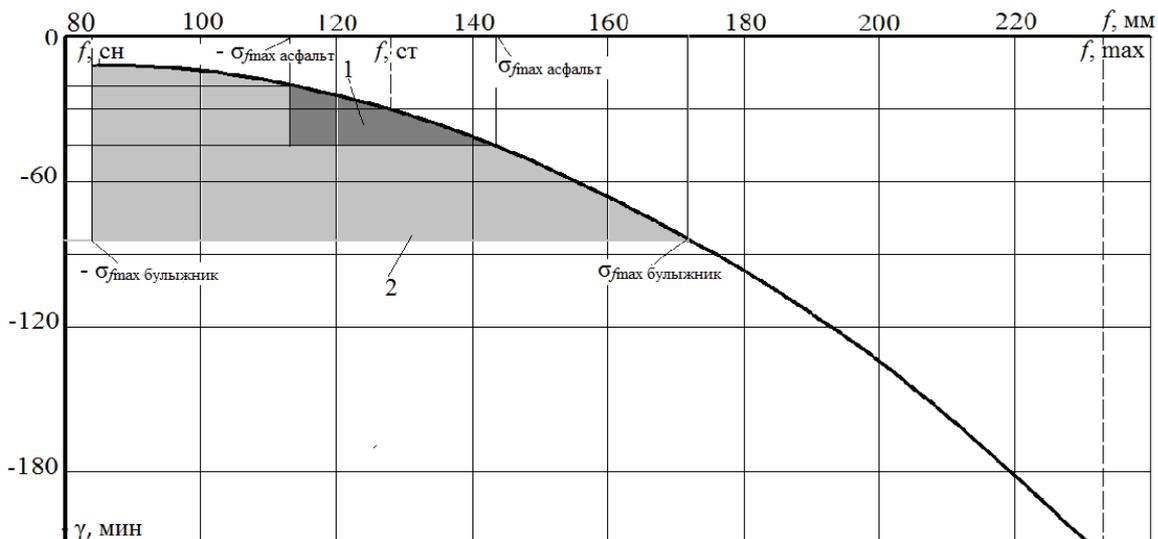


Рис. 6. Вероятные границы области значений углов развала γ в пределах приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, $\gamma_{ст} = -30'$ при движении по дороге:
1 – скорость 60-90 км/ч, асфальт; 2 – скорость 30-50 км/ч, булыжник

Основные выводы по результатам выполненной работы:

- деформации упругого элемента подвески и обусловленные ими вертикальные перемещения колеса приводят к изменению кинематических характеристик установки управляемого колеса (угла развала и схождения);
- проектирование поворотного узла (механизма) управляемого колеса автомобиля с учетом диапазона изменения кинематических характеристик при случайном возмущении микропрофиля поверхности дороги позволяет выбрать оптимальные значения углов установки управляемого колеса и увеличить долговечность шин.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.012 – 90. Вибрационная безопасность. Общие требования / Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 46 с.
2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
3. Мусарский, Р.А. Математические модели колесных экипажей / Р.А. Мусарский. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2008. – 164 с.
4. Кравец, В.Н. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
5. Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств / Утвержден постановлением Правительства РФ №720 от 10.09.2009.
6. Исследование и определение характеристик микропрофиля автомобильных дорог автотрека Горьковского Автозавода / Отчет № гос. регистрации 78055862, научный руководитель к.т.н. С.В. Руквишников, Горький, 1978.

*Дата поступления
в редакцию: 13.05.2019*

S.I. Maleev, S.M. Ogorodnov, E.V. Stepanov, A.V. Pinchin

OPTIMIZATION OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE ROTARY DEVICE OF THE FRONT DRIVEN WHEELS OF THE CAR GAZELLE NEXT

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

Purpose: to study the parameters of optimization of the kinematic characteristics of the rotary device of the front driven wheels of the car Gazelle Next.

Methodology: this article presents a method for determining the optimal values of the kinematic characteristics of the rotary device of the front driven wheels of the car, taking into account the probabilistic nature of their changes in the random disturbance of the microprofile of the road.

Findings: 1) deformation of the elastic element of the suspension and the resulting vertical movement of the wheel lead to a change in the kinematic characteristics of the installation of the driven wheel (camber and convergence); 2) design of the rotary unit (mechanism) of the driven wheel of the car, taking into account the range of kinematic characteristics in case of accidental perturbation of the microprofile of the road surface allows you to choose the optimal values of the angles of installation of the driven wheel and increase the durability of tires.

Keywords: camber angle, convergence angle, tire, wheel, wheel rolling, slip, microprofile, road.

УДК 629.113

Д.С. Тесленко¹, В.Ф. Лянг², В.В. Беляков³, В.С. Макаров³, С.С. Дралкин²,
Д.А. Мартынов², К.И. Зайцев², К.П. Захаркина²

МЕТОД ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОГРУЖЕННЫХ В СНЕГ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт¹
Московский политехнический университет²
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Представлен метод выбора рациональной формы погруженных в снег корпусных частей автотранспортного средства (АТС) с точки зрения снижения сопротивления движению в глубоком снегу. Метод описан в виде алгоритма. Набором исходных данных для его работы служит база значений сопротивлений для различных геометрических форм и различных типов снега. Значения коэффициента сопротивления формы рассчитываются при помощи дискретно-элементного метода (DEM). Алгоритм по исходным данным пользователя определяет характерные точки на форме погруженных в снег частей АТС и соединяет их теми формами из базы, значения сопротивления которых минимально для данного типа снега. Коэффициенты сопротивления пересчитываются пропорционально размерам форм, усредненная рекомендуемая форма создается на основе статистики о частоте встречи каждого типа снега. Продемонстрирована программная реализация данного алгоритма в виде программного модуля с использованием интерфейса прикладного программирования (API) в САПР Autodesk Inventor. В качестве тестового объекта для демонстрации работы модуля выбран автомобиль повышенной проходимости ГАЗ-64. Разработанный метод может применяться в фирмах, проектирующих АТС повышенной проходимости для нужд народного хозяйства.

Ключевые слова: снег, подвижность, сопротивление движению, оптимизация, автотранспортное средство, дискретно-элементный метод.

Современные автотранспортные средства (АТС) прошли длительный путь развития, устойчивыми тенденциями которого являются надежность, снижение себестоимости и расширение диапазона применения в различных отраслях народного хозяйства [1]. В то же время, многие аспекты их эксплуатационных показателей нуждаются в усовершенствовании. Одним из них является подвижность по слабонесущим грунтам, в частности – по снегу [2]. Данная проблема подробно изучена с точки зрения взаимодействия движителя АТС со снегом [3-7], в то время как в отношении взаимодействия корпусных частей АТС остается малоисследованной.

Для моделирования взаимодействия корпусных частей (мостов, раздаточных коробок, защиты картера двигателя, днища и т.д.) существуют методы, позволяющие в первом приближении определить сопротивление АТС при движении в снегу. При этом чисто аналитический подход [8-9], весьма неточен, так как днище здесь рассматривается как плоская пластина. В реальности она сложна: имеет место обилие форм корпусных деталей. Влияние формы объекта на его сопротивление при движении в снегу, а также его ориентация, имеют значение [10]. Конечно-элементные (finite element method, FEM) решения, характерные для работ по взаимодействию движителя со снегом, также нецелесообразны [11], поскольку не учитывают величину сопротивления со стороны снега, уже разрушенного АТС и налипающего на конструкции АТС, либо трущегося по поверхностям АТС. Следовательно, также отсутствует и возможность заранее спрогнозировать форму погруженных элементов, наиболее рациональную с точки зрения снижения сопротивления движению.

Предлагаемый метод оптимизации формы шасси с учетом снижения затрат мощности на взаимодействие элементов кузова и трансмиссии основывается на принципе разбиения

корпуса АТС по зонам, предложенном в статье [11]. При этом для каждой зоны предполагается провести исследование величины сопротивления различных простейших геометрических форм при их буксировке в снегу, затем – выбрать наиболее оптимальную форму для данных условий эксплуатации.

Существующие методы расчета сопротивления с учетом формы предлагаются в аэродинамике, дорожно-строительной технике, гляциологии, судостроении, но для решения данной задачи они неприменимы. Аэродинамические и гидродинамические методы, несмотря на перспективную идею коэффициентов сопротивления тел разной формы, не приспособлены для террамеханических расчетов: даже разрушенный снег все же является твердым телом, и его течение отлично от течения жидкости. Традиционные террамеханические расчеты предназначены для оптимизации формы отвалов строительного-дорожного машин и колес, гусениц, их грунтозацепов; они не рассматривают АТС целиком, фокусируясь на отдельных его элементах довольно простой формы. Инженерная гляциология, с одной стороны, решает задачу, прямо обратную искомой: повышение сопротивления лавиноудерживающих конструкций снежной массе. С другой стороны, ее методы еще более просты, чем у террамеханики и учитывают лишь элементы плоской формы – стены, сетки, бетонные блоки.

По этой причине был выбран относительно новый метод [12-13], предполагающий использование дискретно-элементной (DEM) модели снега совместно с твердотельной моделью буксируемого в виртуальном грунтовом канале тела. Выбор был обусловлен, прежде всего, широкими возможностями DEM по моделированию движения и свойств не только ненарушенного, но и уже подвергшегося разрушению снежного покрова, а также его взаимодействием с поверхностью АТС. Помимо этого, DEM позволяет имитировать эффект налипания снега и даже процессы теплопередачи между телом и снегом, влияющие на обмерзание поверхности. Замена испытаний реальных тел в реальном снегу компьютерными экспериментами, как и предлагалось ранее [14-19], позволила значительно снизить затраты на эксперименты. Такой эффект достигался благодаря отсутствию потребности изготавливать реальные модельные тела и проводить натурные испытания в реальном масштабе.

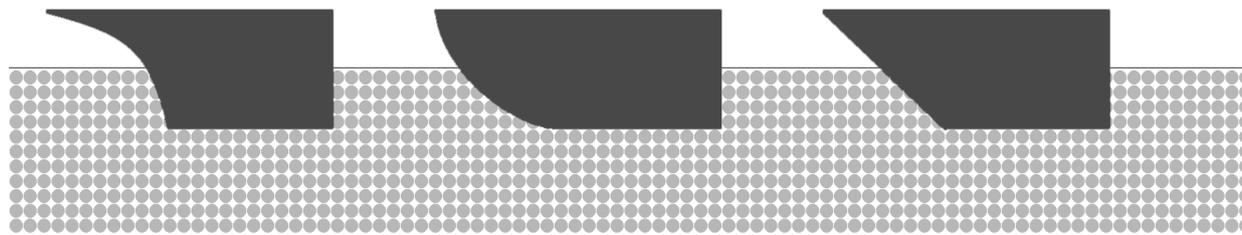


Рис 1. Тестовые тела

В качестве тестовых тел (рис. 1) использовались прямоугольные объекты длиной 200 мм, высотой и шириной 100 мм, с различными типами носовых оконечностей. Протестированы как клиновидные оконечности с углом от 0 до 90° с шагом в 10°, так и радиусные с центром радиуса внутри объекта и снаружи объекта (радиусы от 100 до 1000 мм с шагом в 100 мм). Материалом выбрана углеродистая сталь как наиболее характерный материал для конструкций АТС. Модели испытывались в виртуальном грунтовом канале [20] на скорости 5 км/ч. Программным пакетом для реализации испытаний был выбран DEM Solutions EDEM [13], так как продукт данной компании обладает удобным и наглядным интерфейсом. Специально для этого исследования была получена академическая лицензия у компании-издателя ПО. Моделировалось движение в наиболее распространенных видах снега [16]. С целью упрощения работы были выбраны четыре вида, наиболее часто встречающихся в Нижегородской области [21].

На основе данных экспериментов была создана база данных, описывающая зависимость сопротивления от формы. Главным параметром, характеризующим форму, является коэффициент сопротивления формы C_f , по аналогии с коэффициентом C_x , применяемым в аэро- и гидродинамике [22]. Расчет сопротивления объектов с размерами, большими чем имеющиеся в базе, производится пропорциональным пересчетом. В базе содержатся значения сопротивления форм, сопоставленные типам снега.

Выбор оптимальной формы частично основывается на разработанных критериях, описывающих погружение АТС в снег [11]. Исходными данными для работы алгоритма являются сагиттальное и фронтальное (совмещенная площадь по передней и задней оси) сечения АТС, подготавливаемые пользователем в виде эскиза в САД-системе. Если количество осей АТС больше 2, либо днище имеет выступы, сопоставимые размерами с осями, строятся дополнительные фронтальные сечения. Координатная система выбирается согласно ISO 4130:1978 [23] с точкой начала координат, лежащей в центре оси передних колес. Ось абсцисс связанной с АТС системы координат устанавливается против хода движения АТС, ординат – влево по ходу, аппликат – вертикально по нормали к плоскости грунта.

На сагиттальном сечении в координатах X , Z пользователем строятся полилиния (polyline), показывающая очерк погруженных в снег элементов АТС (яркая черная линия на рис. 2). Важно отметить, что линия не продлевается дальше задней оси, но имеет продолжение за переднюю ось, так как вклад заднего свеса в сопротивление минимальный, но вклад передней части весьма весом (так называемое бульдозерное сопротивление) [9]. Также строится линия, показывающая максимально возможный уровень погружения в снег (тонкая серая линия на рис. 2). Исходя из соображений, рассмотренных ранее [11], за этот уровень принимается пол кабины. В качестве наглядной иллюстрации работы алгоритма взяты чертежи полноприводного двухосного автомобиля ГАЗ-64 [24].

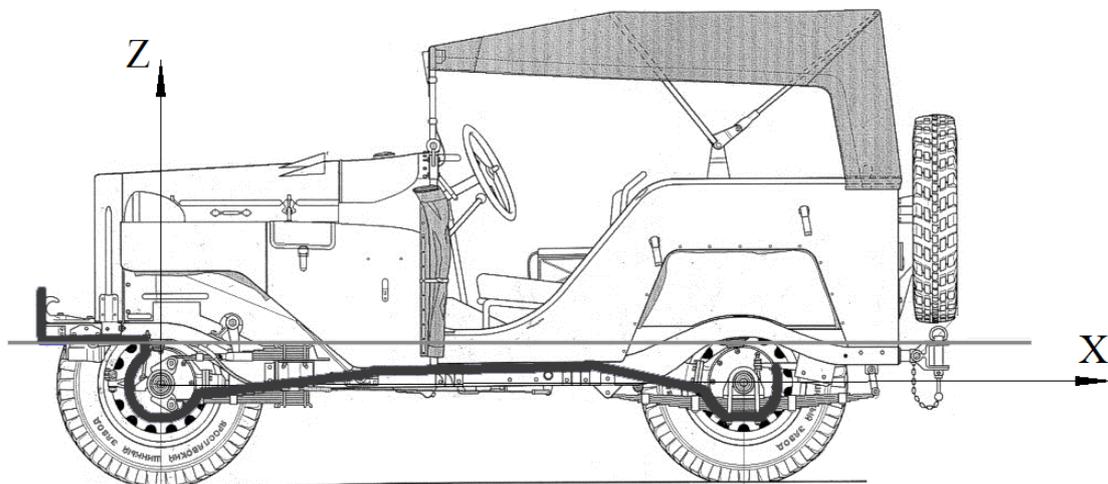


Рис. 2. Исходные данные – сагиттальное сечение АТС

Аналогичная операция проводится с фронтальным сечением в координатах Y , Z (рис. 3). Для наглядности и простоты изложения показано комpositное сечение, содержащее информацию и по передней и по задней оси.

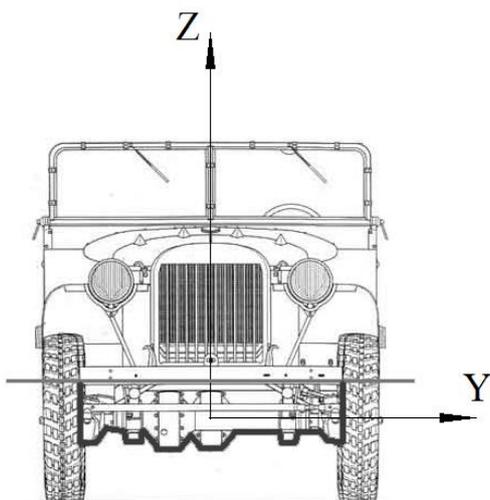


Рис. 3. Исходные данные – фронтальное сечение АТС

Следующим этапом работы алгоритма является определение координат характерных точек 1-3 на сагиттальном сечении (рис. 4). Данная операция выполняется автоматически. Точка 1 определяется как имеющая наименьшую отрицательную координату по оси X и наименьшую положительную – по Z. Точка 2 определяется как имеющая наименьшую координату по оси Z, 3 – как следующая за точкой 2 в порядке возрастания по координате Z. Характерные точки необходимы для привязки семейств кривых, описывающих форму днища.

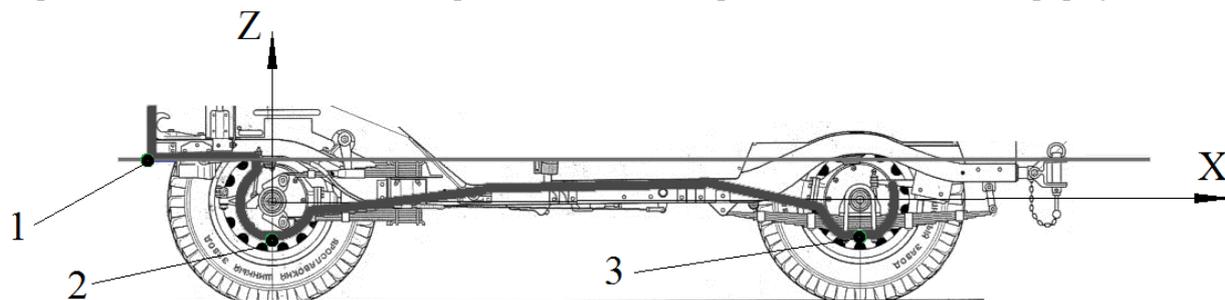


Рис. 4. Поиск характерных точек на сагиттальном сечении

На фронтальном сечении находятся точки с наименьшей координатой по Y (точка 4 на рис. 5), с наибольшей координатой по Y (точка 7), с наименьшей координатой по Z. Точка 5 определяется как имеющая наименьшую координату по оси Z, 6 – как следующая за точкой 5 в порядке возрастания по координате Z.

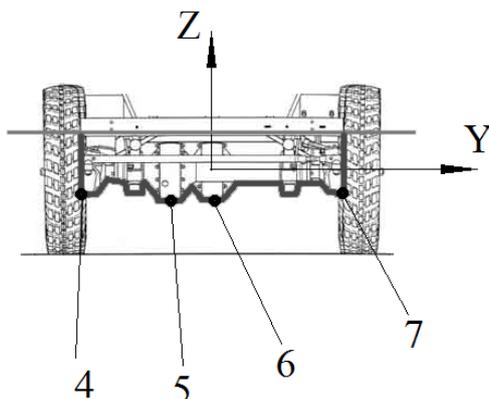


Рис. 5. Поиск характерных точек на фронтальном сечении

Затем точки, полученные на предыдущем этапе, соединяются линиями. Их форма выбирается из вышеупомянутой базы по критерию наименьшего C_f . Для каждого типа снега будет получена своя кривая. На их семейства кривых строится некая средняя кривая, при этом учитывается «вес» исходных кривых, пропорциональный вероятности [21] появления в реальных дорожных условиях конкретного типа снега, соответствующего данной кривой. Расчет повторяется для сагиттального и для фронтального сечений (рис. 6 и 7), в случае необходимости – для промежуточных сечений модели. На основе средних кривых строится результирующая рекомендуемая поверхность.

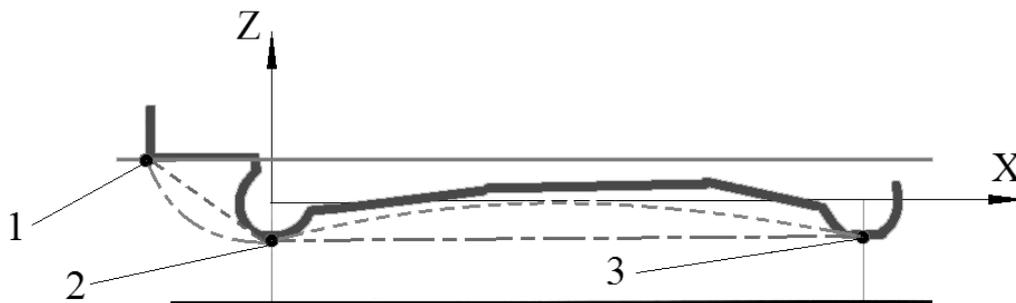


Рис. 6. Построение кривых для двух видов снега на сагиттальном сечении

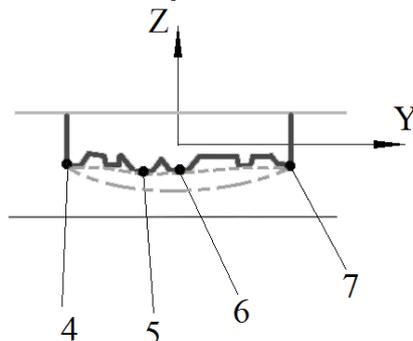


Рис. 7. Построение кривых для двух видов снега на фронтальном сечении

Вышеописанный алгоритм был реализован в виде программного модуля с использованием интерфейса прикладного программирования (API) в САПР Autodesk Inventor (рис. 8), база форм – в MS Excel (табл. 1). Последовательность работы в модуле начинается с создания пользователем в Inventor документа с 2 сечениями – сагиттальным и фронтальным. Сечения строятся пользователем вручную по чертежам либо по 3D-модели АТС. Затем пользователь выбирает данный документ и файл базы форм в окне программы и отдает программе команду начать расчет. Алгоритм находит характерные точки сечений согласно вышеуказанной методике (рис. 9) и соединяет их кривыми, оптимальными для данного типа снега (рис. 10). Полученные кривые аппроксимируются с учетом весов из базы на отдельном эскизе (рис. 11). На основе полученных кривых строится поверхность днища АТС, оптимальной для снижения сопротивления формы (рис. 12).

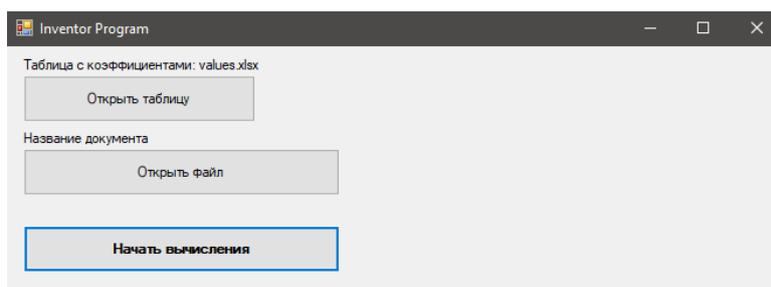


Рис. 8. Диалоговое окно программы

Таблица 1

База форм (фрагмент)

T12	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T23	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T34	Snow_1	Snow_2	Snow_3
line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5
line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8
convexArc_10	10	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8
convexArc_80	11	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9
concaveArc_10	10	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1
concaveArc_80	11	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2
T45	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T56	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T67	Snow_1	Snow_2	Snow_3
line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5
line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8
convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8
convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9
concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1
concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2

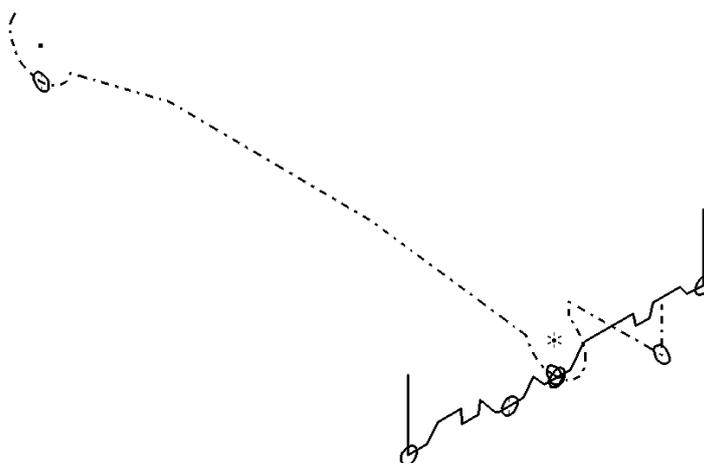


Рис. 9. Обнаруженные характерные точки



Рис. 10. Построенные кривые для различных типов снега

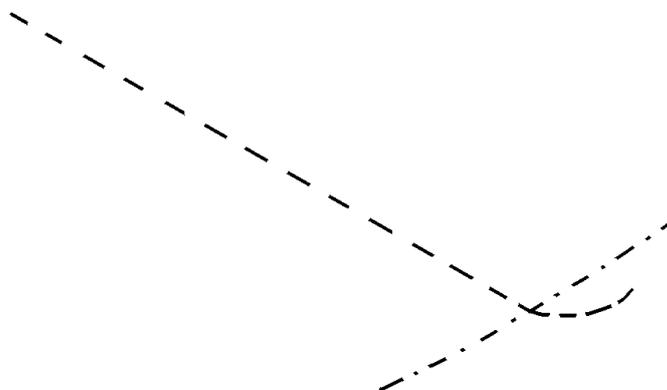


Рис. 11. Полученная аппроксимация кривых

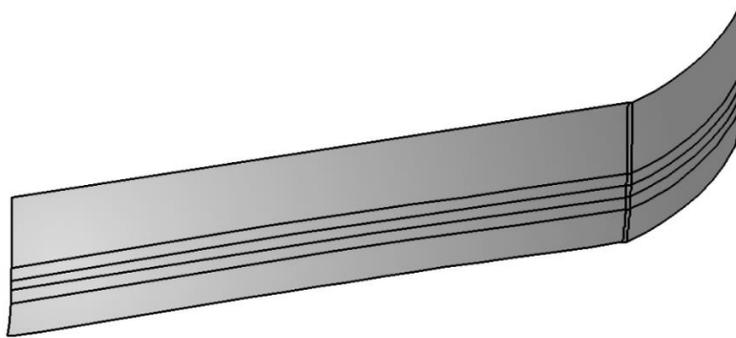


Рис. 12. Результат работы алгоритма – рекомендуемая поверхность

Предлагаемый метод достаточно прост в реализации, удобен и нагляден для конструктора. Результатом работы алгоритма являются не численные значения и коэффициенты, а оптимальная с точки зрения снижения сопротивления движению в снегу поверхность днища, находящаяся непосредственно в пространстве моделирования САД-системы, в контексте сборки. Конструктор может либо непосредственно использовать эту поверхность в последующем процессе конструирования днища АТС, либо пользоваться ей как ориентиром при компоновке АТС и построении поверхностей защиты картера, днища и прочих элементов, погруженных в снег.

Основным недостатком метода является то, что он представляет форму нижней поверхности АТС весьма упрощенно. Также не учитывается эффект взаимного влияния отдельных элементов, вес и его распределение по осям АТС, что может значительно сказаться на величине сопротивления движению [10].

Решить первую проблему можно, применяя дискретно-элементный метод не на отдельные фрагменты, а на АТС в целом. Это потребует значительных вычислительных мощностей, но взамен даст реальную картину обтекания всех элементов снегом. Более того, такой подход даст возможность учитывать изменение свойств снега в зависимости от глубины, реализовать достоверное моделирование взаимодействия с настовой доской. Вторая проблема не является принципиально сложной, поскольку существует класс программных пакетов динамики многих тел (multi-body dynamics (MBD)), предназначенных для решения таких задач. Применение MBD даст возможность учитывать не только вес и его распределение, но и работу подвески. Добавление в эту связку FEM – пакета для моделирования характеристик движителя – сделало бы модель движения АТС по снегу или любому другому грунту полностью достоверной.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3(100). – С. 145-175.
2. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин / В.В. Беляков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
4. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу / В.В. Беляков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992.
5. **Беляков, В.В.** Экспериментальные исследования многоколесной машины / В.В.Беляков, К.О. Гончаров, В.С. Макаров // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2010. – № 12. – С. 10.

6. **Беляков, В.В.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21-24.
7. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2013. – №1 – С. 155-160.
8. **Аникин, А.А.** Анализ сопротивления движению гусеничных машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов // Наука и образование (электронное издание). – 2010. – № 8.
9. **Аникин, А.А.** Теория передвижения колесных машин по снегу / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
10. **Шишкин, В.В.** Проходимость лыж / В.В. Шишкин // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: НАМИ, 1950.
11. **Тесленко, Д.С.** Экспресс-метод сравнительной оценки влияния элементов корпуса и других агрегатов на подвижность колесных машин при движении по снегу / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.Е. Колотилин // Труды НАМИ. – 2017. – № 2. – С. 28-36.
12. **Тесленко, Д.С.** Моделирование рабочего процесса плужной снегоуборочной машины при помощи метода дискретных элементов / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 10. – С. 29-33.
13. **Тесленко, Д.С.** Применение метода дискретных элементов для решения задачи повышения проходимости автомобильного транспорта / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Материалы 99 международной научно-технической конференции 20-22 апреля 2017. – С. 270-281.
14. **Тушинский, Г.К.** Инженерная гляциология. / Г.К. Тушинский. – М.: Издательство Московского университета, 1971.
15. **Сазонов, К.Е.** Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег / К.Е. Сазонов. – СПб: РГГМУ, 2004.
16. **Войтковский, К.Ф.** Механические свойства снега / К.Ф. Войтковский. – М.: Наука, 1977.
17. **Москалев, И.Д.** Руководство по снеголавинным работам (временное) / И.Д. Москалев [и др.] – Л: Гидрометеиздат, 1965.
18. **Кондратьев, А.С.** Физико-механические свойства снега и их использование в аэродномном и дорожном строительстве / А.С. Кондратьев, И.В. Крагельский, А.А. Шахов. – М.: АН СССР, 1945.
19. **Вейнберг, Б.П.** Снег, иней, град, ледники / Б.П. Вейнберг. – М.: ОНТИ, 1936.
20. **Тесленко, Д.С.** К вопросу физического моделирования взаимодействия корпуса машины со снегом / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков // Сборник материалов XV международной молодежной научно-технической конференции, 2016. С. 225-226.
21. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № № 1 (102). – С. 136-141.
22. **Евграфов, А.Н.** Аэродинамика автомобиля / А.Н. Евграфов. – М.: МГИУ, 2010.
23. ISO 4130:1978 Транспорт дорожный. Трехмерная система координат и контрольные точки дорожных транспортных средств. Термины и определения. 1978.
24. Газ-64. – Режим доступа: <http://denisovets.ru/gaz/gazpages/gaz64.html> (дата обращения 22.02.2019).
25. **Рукавишников, С.В.** Снегоходные машины / С.В. Рукавишников, Л.В. Барахтанов, А.П. Куляшов, В.И. Ершов. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1986.
26. **Карташов, С.Н.** Физико-механические свойства и процессы формирования снежно-фирнового покрова Восточной Антарктиды / С.Н. Карташов. – М.: АН СССР, 1962.
27. **Кузьмин, П.П.** Физические свойства снежного покрова / П.П. Кузьмин. Л: Гидрометеиздат, 1957.
28. **Анисимов, М.Г.** Снег и снежные обвалы. / М.Г. Анисимов. – М.: АН СССР, 1958.

*Дата поступления
в редакцию: 01.06.2019*

**D.S. Teslenko¹, V.F. Lyang², V.V. Belyakov³, V.S. Makarov³, S.S. Dralkin²,
D.A. Martynov², K.I. Zaycev², K.P. Zakharkina²**

**A METHOD OF SELECTING THE RATIONAL SHAPE OF SNOW-IMMERSED
WHEELED VEHICLE ELEMENTS IN ORDER TO REDUCE
RESISTANCE TO MOVEMENT**

FSUE «NAMI» State Research Center of the Russian Federation¹
Moscow Polytechnic university²
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev³

The method of selecting a rational form of snow-immersed vehicle body parts from the point of view of reducing resistance to movement in deep snow is presented. The method is described as an algorithm. The set of initial data for its work is a database of resistance values for different geometric shapes and different types of snow. The form resistance coefficient values are calculated using the discrete element method (DEM). The algorithm determines the characteristic points on the form of snow-immersed parts of the PBX and connects them with those forms of the base, the values of resistance which are the minimum for this type of snow. Then the resistance coefficients are recalculated proportionally to the size of the forms and an average recommended form is created on the basis of statistics on the frequency of each type of snow. The software implementation of the given algorithm in the form of the program module with use of interface of applied programming (API) in CAD Autodesk Inventor is shown. As a test object for demonstration of the module's work, a GAZ-64 cross-country vehicle was chosen. The developed method can be applied in the firms designing the cross-country vehicles.

Key words: snow, mobility, resistance to movement, optimization.

УДК 629.016

М.Г. Черевастов¹, Ю.И. Молев²

ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ АВТОМОБИЛЯ, ПРЕДСТАВЛЕННОГО ЛИНЕЙНОЙ РАСЧЕТНОЙ ДВУХМАССОВОЙ МОДЕЛЮ

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассмотрена плоская двухмассовая линейная расчетная модель автомобиля. Уравнения движения транспортного средства представлены в форме «производных устойчивости» и приведены к безразмерной форме. Получено характеристическое уравнение автомобиля, определяющее поведение последнего при протекании переходного процесса, вызванного мгновенным изменением положения управляемых колес. Выведены выражения для передаточной и переходной функций автомобиля, определяющих его динамические свойства.

Ключевые слова: управляемость автомобиля, «производные устойчивости» автомобиля, уравнения движения автомобиля.

Исследование плоской одномассовой расчетной модели транспортного средства [1-7] предполагает в качестве последующего этапа построения теории криволинейного движения автомобиля усложнение расчетной модели и переход к двухмассовой. Автомобиль в данном случае рассматривается как система, состоящая из подрессоренной и неподрессоренной масс, которые, в свою очередь, формируют его общий вес. При этом подрессоренная масса может совершать колебания относительно оси крена. При исследовании полагается, что поступательная скорость движения колесной машины остается постоянной, коэффициенты сопротивления боковому уводу шин не изменяются по величине, имеется малость углов их увода и поворота управляемых колес, тяговое усилие на задних ведущих колесах распределено поровну и остается постоянным. В сущности, речь идет о плоской линейной расчетной модели. Как уже неоднократно было отмечено [1,2] данные допущения оправданы при умеренных боковых ускорениях до $0,3g$. При составлении уравнений движения автомобиля учитывались только возмущения от управления.

В настоящей статье приняты следующие обозначения:

a – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней оси [м];

b – расстояние от центра тяжести автомобиля до задней оси [м];

l – колесная база автомобиля [м]; $l = a + b$;

g – ускорение силы тяжести $\left[\frac{м}{с^2} \right]$;

h – расстояние от центра тяжести неподрессоренных масс до оси крена [м];

p – угловая скорость крена относительно оси x $\left[\frac{1}{с} \right]$;

θ – угол поворота управляемых колес [рад];

ω – угловая скорость поворота автомобиля относительно вертикальной оси z $\left[\frac{1}{с} \right]$;

ϖ – безразмерная форма ω равная $\varpi = \tau\omega$;

μ – число Фруда, безразмерная форма V , определяемое выражением $\mu = \frac{V}{\sqrt{l \cdot g}}$;

s – оператор Лапласа;

τ – постоянная времени [с]; $\tau = \sqrt{\frac{l}{g}}$;

C_1 – коэффициент сопротивления уводу шин передних колес $\left[\frac{H}{\text{рад}} \right]$;

C_2 – коэффициент сопротивления уводу шин задних колес $\left[\frac{H}{\text{рад}} \right]$;

D – оператор дифференцирования в безразмерной форме; $D = \tau \frac{d}{dt}$;

J_z – момент инерции автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести $\left[\text{кг} \times \text{м}^2 \right]$;

J_x – момент инерции подрессоренной массы относительно оси x $\left[\text{кг} \times \text{м}^2 \right]$;

J_{xz} – центробежный момент инерции автомобиля относительно осей x и z $\left[\text{кг} \times \text{м}^2 \right]$;

L – момент относительно оси x $\left[H \cdot \text{м} \right]$;

M – масса автомобиля $\left[\text{кг} \right]$;

M_n – подрессоренная масса автомобиля $\left[\text{кг} \right]$;

N – поворачивающий момент относительно оси z $\left[H \cdot \text{м} \right]$;

V – поступательная скорость автомобиля $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$;

Y – сила, действующая вдоль оси y $\left[H \right]$.

Производные устойчивости:

$Y_\beta = \frac{\partial Y}{\partial \beta}$ – коэффициент боковой силы, вызванной наличием увода колес автомобиля $\left[\frac{H}{\text{рад}} \right]$;

$Y_\omega = \frac{\partial Y}{\partial \omega}$ – коэффициент боковой силы, вызванной поворотом автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести $\left[H \cdot \text{с} \right]$;

$Y_\theta = \frac{\partial Y}{\partial \theta}$ – коэффициент боковой силы, вызванной поворотом управляемых колес $\left[\frac{H}{\text{рад}} \right]$;

$Y_\varphi = \frac{\partial Y}{\partial \varphi}$ – коэффициент боковой силы, вызванной креном автомобиля $\left[\frac{H}{\text{рад}} \right]$;

$N_\beta = \frac{\partial N}{\partial \beta}$ – коэффициент поворачивающего момента, вызванного наличием увода колес автомобиля $\left[\frac{H \cdot \text{м}}{\text{рад}} \right]$;

$N_\omega = \frac{\partial N}{\partial \omega}$ – коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести $\left[H \cdot \text{м} \cdot \text{с} \right]$;

$N_\theta = \frac{\partial N}{\partial \theta}$ – коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом управляемых колес $\left[\frac{H \cdot м}{рад} \right]$;

$N_\varphi = \frac{\partial N}{\partial \varphi}$ – коэффициент поворачивающего момента, вызванного креном транспортного средства $\left[\frac{H \cdot м}{рад} \right]$;

$L_p = \frac{\partial L}{\partial p}$ – коэффициент демпфирования крена $[H \cdot м \cdot с]$;

$L_\varphi = \frac{\partial L}{\partial \varphi}$ – поперечная угловая жесткость $\left[\frac{H \cdot м}{рад} \right]$.

На первом этапе исследования запишем уравнения движения автомобиля в форме производных устойчивости [4]. Получим следующую систему (1):

$$\begin{cases} \sum Y = \frac{\partial Y}{\partial \beta} \beta + \frac{\partial Y}{\partial \omega} \omega + \frac{\partial Y}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial Y}{\partial \varphi} \varphi \\ \sum N = \frac{\partial N}{\partial \beta} \beta + \frac{\partial N}{\partial \omega} \omega + \frac{\partial N}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \varphi \\ \sum L = \frac{\partial L}{\partial p} p + \frac{\partial L}{\partial \varphi} \varphi \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) описывает криволинейное движение колесной машины в горизонтальной плоскости $x - y$ с учетом возникающего крена автомобиля. Следует отметить, что производные устойчивости являются постоянными коэффициентами, обеспечивающими линейность расчетной модели. Положительные направления осей, а также основные углы, геометрические размеры и расстояния изображены на рис. 1 и 2.

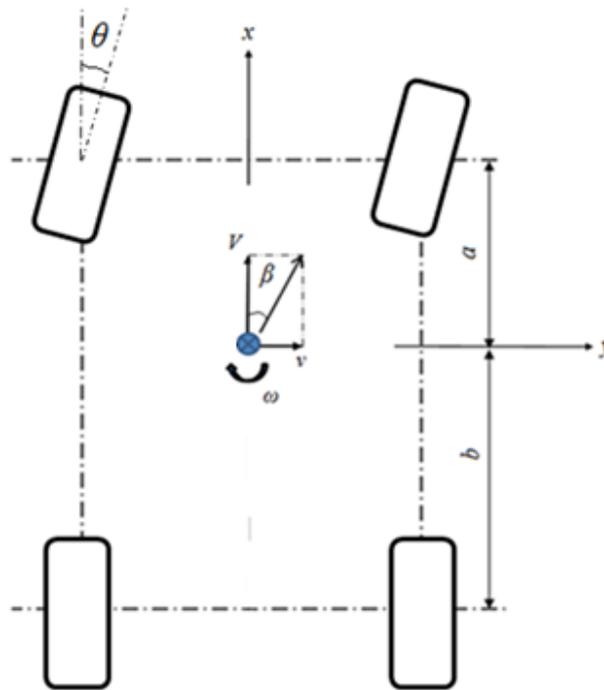


Рис. 1. Угол бокового смещения автомобиля

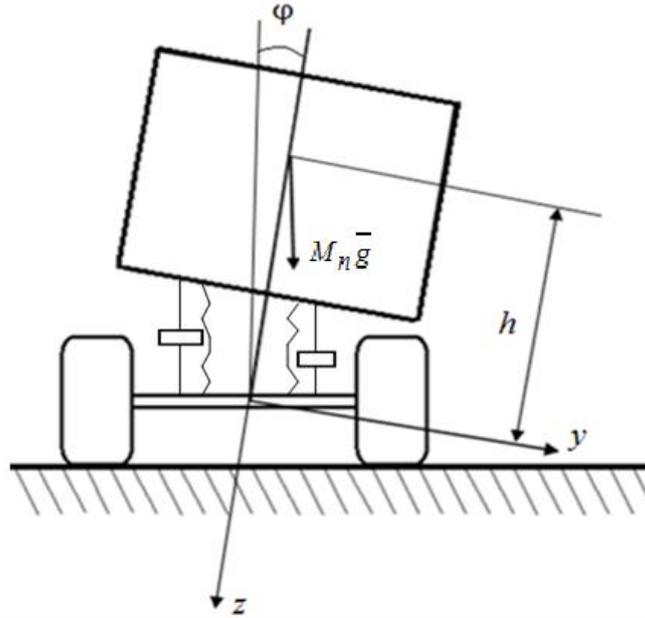


Рис. 2. Условная схема действия кренящего момента в плоскости $y - z$

Теперь, для большего удобства, приведем уравнения движения (1) к безразмерной форме, что в дальнейшем позволит проводить сравнение параметров управляемости различных автомобилей. Для этого запишем следующее: $m = \frac{M_n h}{Ml}$; $i_{xz} = \frac{J_{xz}}{Ml^2}$; $i_x = \frac{J_x}{Ml^2}$;

$$i_z = \frac{J_z}{Ml^2}; \quad y_\beta = \frac{Y_\beta}{Mg}; \quad y_\omega = \frac{Y_\omega}{M\sqrt{l \cdot g}}; \quad y_\theta = \frac{Y_\theta}{Mg}; \quad y_\varphi = \frac{Y_\varphi}{Mg}; \quad n_\beta = \frac{N_\beta}{Mgl}; \quad n_\omega = \frac{N_\omega}{Ml\sqrt{l \cdot g}};$$

$$n_\theta = \frac{N_\theta}{Mgl}; \quad n_\varphi = \frac{N_\varphi}{Mgl}; \quad l_p = \frac{L_p}{Ml\sqrt{l \cdot g}}; \quad l_\varphi = \frac{L_\varphi}{Mgl}.$$

После соответствующих преобразований система уравнений (1) может быть представлена следующим образом (2):

$$\begin{cases} (\mu D - y_\beta)\beta + (\mu - y_\omega)\varpi + (mD^2 - y_\varphi)\varphi = y_\theta\theta \\ -n_\beta\beta + (i_z D - n_\omega)\varpi + (i_{xz} D^2 - n_\varphi)\varphi = n_\theta\theta \\ (m\mu D)\beta + (i_{xz} D + m\mu)\varpi + (i_x D^2 - l_p D - l_\varphi)\varphi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Далее, учитывая нулевые начальные условия по боковому движению автомобиля, заменим оператор дифференцирования на оператор Лапласа, а оригиналы неизвестных переменных – их изображениями. В результате получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (\mu s - y_\beta)\beta(s) + (\mu - y_\omega)\varpi(s) + (ms^2 - y_\varphi)\varphi(s) = y_\theta\theta(s) \\ -n_\beta\beta(s) + (i_z s - n_\omega)\varpi(s) + (i_{xz} s^2 - n_\varphi)\varphi(s) = n_\theta\theta(s) \\ (m\mu s)\beta(s) + (i_{xz} s + m\mu)\varpi(s) + (i_x s^2 - l_p s - l_\varphi)\varphi(s) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы (3), методом Крамера, относительно $\varpi(s)$ имеет следующий вид (4):

$$\varpi(s) = \frac{\Delta_{\varpi}}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} \mu s - y_{\beta} & y_{\theta}\theta(s) & ms^2 - y_{\varphi} \\ -n_{\beta} & n_{\theta}\theta(s) & i_{xz}s^2 - n_{\varphi} \\ m\mu s & 0 & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \mu s - y_{\beta} & \mu - y_{\omega} & ms^2 - y_{\varphi} \\ -n_{\beta} & i_z s - n_{\omega} & i_{xz}s^2 - n_{\varphi} \\ m\mu s & i_{xz}s + m\mu & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix}} \quad (4)$$

Найдем знаменатель дроби (4), имеем (5):

$$\Delta = (\mu s - y_{\beta}) \times \begin{vmatrix} i_z s - n_{\omega} & i_{xz}s^2 - n_{\varphi} \\ i_{xz}s + m\mu & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix} - (-n_{\beta}) \times \begin{vmatrix} \mu - y_{\omega} & ms^2 - y_{\varphi} \\ i_{xz}s + m\mu & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix} + m\mu s \times \begin{vmatrix} \mu - y_{\omega} & ms^2 - y_{\varphi} \\ i_z s - n_{\omega} & i_{xz}s^2 - n_{\varphi} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Раскроем определители выражения (5) и после преобразования получим (6):

$$\Delta = (\mu F_1 + m\mu F_9)s^4 + (\mu F_2 - y_{\beta}F_1 + n_{\beta}F_5 + m\mu F_{10})s^3 + (\mu F_3 - y_{\beta}F_2 + n_{\beta}F_6 + m\mu F_{11})s^2 + (\mu F_4 - y_{\beta}F_3 + n_{\beta}F_7 + m\mu F_{12})s + n_{\beta}F_8 - y_{\beta}F_4 = q_1s^4 + q_2s^3 + q_3s^2 + q_4s + q_5 \quad (6)$$

где $F_1 = i_x i_z - i_{xz}^2$; $F_2 = -(i_z l_p + n_{\omega} i_x + i_{xz} m\mu)$; $F_3 = n_{\omega} l_p + n_{\varphi} i_{xz} - i_z l_{\varphi}$; $F_4 = n_{\omega} l_{\varphi} + n_{\varphi} m\mu$; $F_5 = -m i_{xz}$; $F_6 = \mu \dot{i}_x - y_{\omega} i_x - m^2 \mu$; $F_7 = y_{\omega} l_p + y_{\varphi} i_{xz} - \mu l_p$; $F_8 = y_{\omega} l_{\varphi} + y_{\varphi} m\mu - \mu l_{\varphi}$; $F_9 = -m i_z$; $F_{10} = \mu \dot{i}_{xz} + m n_{\omega} - y_{\omega} i_{xz}$; $F_{11} = y_{\varphi} i_z$; $F_{12} = y_{\omega} n_{\varphi} - \mu n_{\varphi} - y_{\varphi} n_{\omega}$.

Далее представим равенство (6) в виде (7):

$$\Delta = q_1 s^4 + q_2 s^3 + q_3 s^2 + q_4 s + q_5 = q_1 \left(s^4 + \frac{q_2}{q_1} s^3 + \frac{q_3}{q_1} s^2 + \frac{q_4}{q_1} s + \frac{q_5}{q_1} \right) \quad (7)$$

Таким образом, имеем (8):

$$\Delta = q_1 (s^4 + Q_1 s^3 + Q_2 s^2 + Q_3 s + Q_4) \quad (8)$$

где $Q_1 = \frac{q_2}{q_1}$, а остальные коэффициенты определяются аналогично из формулы (7).

Теперь перейдем к определению числителя дроби (4) в формуле (9):

$$\Delta_{\varpi} = -y_{\theta}\theta(s) \times \begin{vmatrix} -n_{\beta} & i_{xz}s^2 - n_{\varphi} \\ m\mu s & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix} + n_{\theta}\theta(s) \times \begin{vmatrix} \mu s - y_{\beta} & ms^2 - y_{\varphi} \\ m\mu s & i_x s^2 - l_p s - l_{\varphi} \end{vmatrix} - 0 \quad (9)$$

Аналогично, как и ранее, раскроем определители выражения (9) и сгруппируем полученный многочлен, в итоге запишем (10):

$$\Delta_{\varpi} = \theta(s) \times ((n_{\theta}N_5 - y_{\theta}N_1)s^3 + (n_{\theta}N_6 - y_{\theta}N_2)s^2 + (n_{\theta}N_7 - y_{\theta}N_3)s + n_{\theta}N_8 - y_{\theta}N_4) = \theta(s) \times (u_1 s^3 + u_2 s^2 + u_3 s + u_4) = \theta(s) u_1 \left(s^3 + \frac{u_2}{u_1} s^2 + \frac{u_3}{u_1} s + \frac{u_4}{u_1} \right) \quad (10)$$

где $N_1 = -m\mu i_{xz}$; $N_2 = -n_{\beta} i_x$; $N_3 = n_{\beta} l_p + m\mu n_{\varphi}$; $N_4 = n_{\beta} l_{\varphi}$; $N_5 = \mu \dot{i}_x - m^2 \mu$; $N_6 = -(\mu l_p + y_{\beta} i_x)$; $N_7 = y_{\beta} l_p + y_{\varphi} m\mu - \mu l_{\varphi}$; $N_8 = y_{\beta} l_{\varphi}$.

Окончательно имеем (11):

$$\Delta_{\varpi} = \theta(s)u_1(s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3) \quad (11)$$

где $U_1 = \frac{u_2}{u_1}$, а остальные коэффициенты определяются аналогично из формулы (11).

После определения числителя и знаменателя выражения (4), определим изображение общего решения системы уравнений (3) на основании равенств (11) и (8) в формуле (12):

$$\varpi(s) = \frac{u_1(s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3)}{q_1(s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4)} \times \theta(s) \quad (12)$$

Представим полученное выражение в следующем виде (13):

$$\varpi(s) = H(s) \times \theta(s) \quad (13)$$

где в левой части находится изображение выходной величины, т.е. безразмерной формы угловой скорости поворота автомобиля, а в правой части произведение отношения двух многочленов на изображение входного сигнала, т.е. угла поворота управляемых колес. Таким образом, применяя терминологию теории автоматического регулирования [8], можно говорить о том, что $H(s)$ представляет собой передаточную функцию автомобиля по управляющему воздействию, являющейся важнейшей характеристикой, определяющей динамические свойства автомобиля как системы, и выражается отношением (14):

$$H(s) = \frac{u_1}{q_1} \times \frac{s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3}{s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4} \quad (14)$$

На втором этапе исследования перейдем к отысканию переходной функции автомобиля, т.е. определению реакции последнего на единичное ступенчатое управляющее воздействие. В данном случае зависимость величины угла поворота управляемых колес от времени будет определяться выражением $\theta(t) = \theta_1 \cdot 1(t)$, которому будет соответствовать изображение $\theta(s) = \theta_1 \cdot \frac{1}{s}$, где θ_1 есть угол, на который мгновенно повернутся управляемые колеса в начальный момент времени, а $1(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Далее, воспользовавшись равенством (12), применив к нему изображение $\theta(s)$, получим изображение искомой нами выходной величины, как отклика на ступенчатое воздействие или что то же самое – изображение переходной функции:

$$\varpi(s) = \frac{\theta_1 u_1}{q_1} \times \frac{s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3}{s(s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4)} \quad (15)$$

Обозначим для удобства $\varpi_1 = \frac{\theta_1 u_1}{q_1}$.

Преобразуем зависимость (15) в удобный для обратного преобразования Лапласа вид, для этого, вначале, рассмотрим многочлен четвертой степени, находящийся в знаменателе выражения (15), а именно $s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4$ и разложим его на произведение двух многочленов второй степени. Для этого с помощью метода Феррари [9] решим уравнение $s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4 = 0$, которое в свою очередь является характеристическим и определяющим закон протекания переходного процесса.

Резольвента характеристического уравнения автомобиля имеет вид (16):

$$y^3 - Q_2y^2 + (Q_1Q_3 - 4Q_4)y - Q_1^2Q_4 + 4Q_2Q_4 - Q_3^2 = 0 \quad (16)$$

Теперь, используя решение Кардано [9], найдем корни уравнения (16).

При помощи подстановки $y = x + \frac{Q_2}{3}$ преобразуем тождество (16) к виду (17):

$$x^3 + px + q = 0 \tag{17}$$

где $p = -\frac{(-Q_2)^2}{3} + (Q_1Q_3 - 4Q_4)$; $q = 2\left(\frac{-Q_2}{3}\right)^3 - \frac{-Q_2(Q_1Q_3 - 4Q_4)}{3} + 4Q_2Q_4 - Q_1^2Q_4 - Q_3^2$.

Тогда решением уравнения (17), для случая $Q > 0$, будут следующие корни:

$$x_1 = A + B; \quad x_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3},$$

где $A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}$; $B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}$; $Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2$.

Для случая $Q < 0$ (неприводимый случай) корни уравнения (17) выглядят следующим

образом: $x_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right)$; $x_{2,3} = -2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos\left(\frac{\alpha}{3} \pm \frac{2\pi}{3}\right)$,

где $\cos(\alpha) = -\frac{q}{2\sqrt{-\left(\frac{p}{3}\right)^3}}$.

Далее, после решения уравнения (17), применяя подстановку, легко найти корни выражения (16), один из которых (полученный преимущественно путем подстановки x_1) необходим для решения характеристического уравнения, корни которого, в свою очередь, вычисляются по формуле (18):

$$s^2 + \frac{Q_1}{2}s + \frac{y_0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{Q_1^2}{4} - Q_2 + y_0\right)s^2 + \left(\frac{Q_1}{2}y_0 - Q_3\right)s + \frac{y_0^2}{4} - Q_4} = 0 \tag{18}$$

где y_0 – произвольный корень уравнения (16).

Таким образом, с учетом записи (18), левая часть характеристического уравнения может быть представлена как произведение двух квадратных многочленов (19):

$$s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4 = (s^2 + A_1s + A_2)(s^2 + B_1s + B_2) \tag{19}$$

где $A_1 = \frac{Q_1}{2} + \sqrt{\frac{Q_2^2}{4} - Q_2 + y_0}$; $B_1 = \frac{Q_1}{2} - \sqrt{\frac{Q_2^2}{4} - Q_2 + y_0}$;

если $\frac{Q_1}{2}x_0 - Q_3 > 0$, то $A_2 = \frac{y_0}{2} + \sqrt{\frac{y_0^2}{4} - Q_4}$, $B_2 = \frac{y_0}{2} - \sqrt{\frac{y_0^2}{4} - Q_4}$;

если $\frac{Q_1}{2}x_0 - Q_3 < 0$, то $A_2 = \frac{y_0}{2} - \sqrt{\frac{y_0^2}{4} - Q_4}$, $B_2 = \frac{y_0}{2} + \sqrt{\frac{y_0^2}{4} - Q_4}$.

На следующем этапе исследования, учитывая выражения (19) и (15) без учета ϖ_1 , запишем (20):

$$\frac{s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3}{s(s^4 + Q_1s^3 + Q_2s^2 + Q_3s + Q_4)} = \frac{s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3}{s(s^2 + A_1s + A_2)(s^2 + B_1s + B_2)} \tag{20}$$

Теперь представим полученное выражение как сумму дробей:

$$\frac{s^3 + U_1s^2 + U_2s + U_3}{s(s^2 + A_1s + A_2)(s^2 + B_1s + B_2)} = \frac{E_1}{s} + \frac{E_2s + E_3}{s^2 + A_1s + A_2} + \frac{E_4s + E_5}{s^2 + B_1s + B_2} \tag{21}$$

$$\text{где } E_1 = \frac{U_3}{A_2 B_2}; E_3 = \frac{-A_1 b_2 A_2 + A_1^2 b_3 + b_2 B_1 A_2 - b_3 A_1 B_1 + b_1 A_2^2 - b_3 A_2}{-A_1 B_1 (A_2 + B_2) + A_1^2 B_2 + B_1^2 A_2 + A_2^2 - A_2 B_2}; b_1 = 1 - E_1 A_1;$$

$$b_2 = U_1 - E_1 (B_2 + A_1 B_1 + A_2); b_3 = U_2 - E_1 (A_1 B_2 + A_2 B_1); E_5 = \frac{b_3 - E_3 B_2}{A_2};$$

$$E_4 = \frac{b_2 - E_3 B_1 - E_5 A_1}{A_2}; E_2 = -(E_1 + E_4).$$

Возвращаясь к формуле (15), учитывая выражения (20) и (21), можно записать (22):

$$\varpi(s) = \varpi_1 \times \left(\frac{E_1}{s} + \frac{E_2 s + E_3}{s^2 + A_1 s + A_2} + \frac{E_4 s + E_5}{s^2 + B_1 s + B_2} \right) \quad (22)$$

На завершающем этапе нам остается представить дроби, входящие в состав формулы (22), в формате удобном для обратного преобразования Лапласа. Для этого рассмотрим несколько случаев. В первом, когда $A_1^2 - 4A_2 > 0$ или $B_1^2 - 4B_2 > 0$, имеющиеся дроби можно представить в виде суммы простейших дробей, т.е. (23):

$$\frac{E_2 s + E_3}{s^2 + A_1 s + A_2} = \frac{R_1}{s - s_1} + \frac{R_2}{s - s_2} \quad (23)$$

$$\text{где } s_{1,2} = -\frac{A_1}{2} \pm \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_2}}{2}; R_1 = \frac{E_3 + E_2 s_1}{s_1 - s_2}; R_2 = \frac{E_3 + E_2 s_2}{s_2 - s_1}$$

или

$$\frac{E_4 s + E_5}{s^2 + B_1 s + B_2} = \frac{R_3}{s - s_3} + \frac{R_4}{s - s_4} \quad (24)$$

$$\text{где } s_{3,4} = -\frac{B_1}{2} \pm \frac{\sqrt{B_1^2 - 4B_2}}{2}; R_3 = \frac{E_5 + E_4 s_3}{s_3 - s_4}; R_4 = \frac{E_5 + E_4 s_4}{s_4 - s_3}.$$

Во втором случае, $A_1^2 - 4A_2 < 0$ или $B_1^2 - 4B_2 < 0$, дроби выражаются в виде (25):

$$\frac{E_2 s + E_3}{s^2 + A_1 s + A_2} = E_2 \frac{\left(s + \frac{A_1}{2}\right)}{\left(s + \frac{A_1}{2}\right)^2 + \omega_1^2} + Z_1 \frac{\omega_1}{\left(s + \frac{A_1}{2}\right)^2 + \omega_1^2} \quad (25)$$

$$\text{где } \omega_1^2 = A_2 - \frac{A_1^2}{4}; Z_1 = \frac{E_2}{\omega_1} \cdot \left(\frac{E_3}{E_2} - \frac{A_1}{2}\right)$$

или

$$\frac{E_4 s + E_5}{s^2 + B_1 s + B_2} = E_4 \frac{\left(s + \frac{B_1}{2}\right)}{\left(s + \frac{B_1}{2}\right)^2 + \omega_2^2} + Z_2 \frac{\omega_2}{\left(s + \frac{B_1}{2}\right)^2 + \omega_2^2} \quad (26)$$

$$\text{где } \omega_2^2 = B_2 - \frac{B_1^2}{4}; Z_2 = \frac{E_4}{\omega_2} \cdot \left(\frac{E_5}{E_4} - \frac{B_1}{2}\right).$$

Теперь, подставляя значения (23) – (26) в выражение (22), получаем изображение безразмерной формы угловой скорости поворота автомобиля в удобной для обратного преобразования форме, все изображения в правой части являются табличными.

Определим оригинал функции, представленной соответствующим изображением (27):

$$\varpi\left(\frac{t}{\tau}\right) = L^{-1}[\varpi(s)] \quad (27)$$

В завершении, найдем переходную функцию автомобиля, где выходным параметром является угловая скорость поворота, по следующей формуле, исходя из определения ϖ :

$$\omega(t) = \frac{\varpi\left(\frac{t}{\tau}\right)}{\tau} \quad (28)$$

В заключение необходимо отметить, во-первых, что полученное характеристическое уравнение автомобиля описывается произведением двух многочленов второй степени, которые, в свою очередь, характеризуют такие формы движения, как угловой поворот автомобиля с уводом и крен. Полученные два сомножителя констатируют, что каждая из форм движения может изменяться в неустановившемся режиме по аperiodическому, либо по колебательным законам. Во-вторых, полученная передаточная функция автомобиля позволит без решения соответствующих уравнений движения определить частотные характеристики транспортного средства. В-третьих, зная переходную функцию автомобиля, можно с помощью интеграла Дюамеля устанавливать связь между переходным процессом, вызванным произвольным воздействием и данной функцией.

Дальнейшее исследование передаточной и переходной функций, на примерах конкретных моделей автомобилей, позволит оценить влияние крена на различные параметры управляемости (длительность переходного процесса, динамическая чувствительность к управлению и т.д.) и провести сравнительный анализ с плоской одномассовой расчетной моделью, уточнить адекватность моделей.

Библиографический список

1. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
2. **Милликен, У.Ф.** Применение общей теории устойчивости и управляемости автомобилей к их конструированию / У.Ф. Милликен, Д.У. Уитком // Управляемость и устойчивость автомобиля: сборник статей. – М.: МАШГИЗ, 1963. – С.145-204.
3. **Молев, Ю.И.** Теоретическая оценка влияния установки газобаллонного оборудования на управляемость автобуса ПАЗ 32054 [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://transport-systems.ru/assets/2017_01_002.pdf (дата обращения: 11.07.2019).
4. **Молев, Ю.И.** Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (15 марта 2018 г.): в 2-х т. Т.2 / отв. ред. Д. А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 89-95.
5. **Молев, Ю.И.** Прямые оценки качества реакции движения автомобиля на ступенчатое управляющее воздействие / Ю.И. Молев, У.Ш. Вахидов, М.Г. Черевастов, А.В. Согин, А.С. Слюсарев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2018. – №3(122). – С.111-120.
6. **Певзнер, Я.М.** Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер. – М.: МАШГИЗ, 1947. – 156 с.
7. **Чудаков, Е.А.** Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.: МАШГИЗ, 1950. – 343 с.
8. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Высшая школа, 1977. – 519 с.
9. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

*Дата поступления
в редакцию: 21.07.2019*

M.G. Cherevastov¹, Yu.I. Molev²

**OBTAINING THE TRANSITION FUNCTION OF A CAR PRESENTED BY A LINEAR
CALCULATION TWO-MASS MODEL**

Nizhny Novgorod State Pedagogical University n.a. Kozma Minin¹

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev²

Purpose: In this paper, the main purpose of the study is to obtain a general expression for the transient function of the vehicle derived for a flat two-mass linear computational model of the vehicle.

Design/methodology/approach: In the study, the equations of motion of the car in the form of «stability derivatives» were used. The equations themselves are written in dimensionless form. The solution of the system of equations is carried out by the operator method with the subsequent inverse transformation. The resulting characteristic equation of the car is solved using the Ferrari method. Direct and inverse Laplace transforms were applied.

Findings: The characteristic equation of the car is obtained, which determines the behavior of the latter during the transition process caused by an instantaneous change in the position of the driven wheels. Expressions are derived for the transfer and transition functions of the car, which determine its dynamic properties. At the end of the work the tasks for further research are set.

Research limitations / consequences: In the study, it is assumed that the translational speed of the wheel machine remains constant, the drag coefficients of the lateral withdrawal of the tires do not change in magnitude, there is a small angle of their withdrawal and rotation of the driven wheels, the traction force on the rear drive wheels is distributed equally and remains constant. When drawing up the equations of motion of the car, only disturbances from the control were taken into account.

Keywords: handling of the car, «derivatives of stability» of the car, the equations of motion of the car.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Бочков Владимир Сергеевич – аспирант
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vladimir2612@bk.ru

Каспаров Игорь Викторович – заведующий кафедрой Самарского государственного университета путей сообщения, канд. техн. наук;
kiwik2008@mail.ru

Катаева Лилия Юрьевна – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат наук;
kataeval2010@mail.ru

Кумагина Елена Александровна – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук;
kumagina@inbox.ru

Куркин Андрей Александрович – заведующий кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук;
aakurkin@gmail.com

Куркина Оксана Евгеньевна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
oksana.kurkina@mail.ru

Лобовиков Павел Викторович – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
plobovikov@gmail.com

Логанов Сергей Викторович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
svl0965@mail.ru

Мартынюк Михаил Владимирович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
m_mart@mail.ru

Масленников Дмитрий Александрович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
dmitrymaslennikov@mail.ru

Неймарк Елена Александровна – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук;
e.neumark@mail.ru

Ялозо Андрей Владимирович – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева, научный сотрудник ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»;
yalozo@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Баринов Александр Александрович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lxbarinov92@mail.ru

Дарьенков Андрей Борисович – директор Института электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук
darenkov@nntu.ru

Ершова Мария Игоревна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
m.aria.1@mail.ru

Кодочигов Николай Григорьевич – главный конструктор РУ ВТГР АО «ОКБМ Африкантов», канд. техн. наук;
kodochigov@okbm.nnov.ru

Коновалов Илья Адильевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
iliakonowaloff@yandex.ru

Крюков Леонард Тимофеевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
fam@nntu.ru

Легчанов Максим Александрович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
legchanov@mail.ru

Липужин Иван Алексеевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
lipuzhin@nntu.ru

Лоскутов Алексей Борисович – профессор
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
loskutov@nntu.ru

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

Мордвинцев Владимир Михайлович –
ведущий инженер АО «ОКБМ
Африкантов»;
mvm1946@yandex.ru

Петрицкий Сергей Александрович – до-
цент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн.
наук;
sa540@mail.ru

Полуничев Виталий Иванович – профес-
сор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн.
наук;
dep59@okbm.nnov.ru

Помысухина Алина Евгеньевна – маги-
странт НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
alina.p@nstuedu.com

Солнцев Дмитрий Николаевич – доцент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
dn.solntsev@pochta.ru

Соснина Елена Николаевна – профессор
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук
sosnyna@yandex.ru

Стрелков Владимир Федорович – веду-
щий научный сотрудник НГТУ им. Р.Е.
Алексеева, д. техн. наук, доцент;
strelkov.428@nntu.ru

Сухарев Юрий Петрович – главный спе-
циалист АО «ОКБМ Африкантов», д-р техн.
наук;
sukharev@okbm.nnov.ru

Филимонов Александр Федорович – ма-
гистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
alexander.f@nstuedu.com

Фитасов Анатолий Николаевич – старший
преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
t7ce@yandex.ru

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

Чесноков Александр Андреевич – студент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
1997chesnokov@gmail.com

Шалухо Андрей Владимирович – доцент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
shaluho@nntu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Беляков Владимир Викторович – профес-
сор, начальник Управления научно-
исследовательских работ НГТУ им. Р.Е.
Алексеева, д-р техн. наук;
belyakov@nntu.ru

Горелов Василий Александрович – заве-
дующий кафедрой Московского государ-
ственного технического университета им.
Н.Э. Баумана, д-р техн. наук;
gvas@mail.ru

Дралкин Сергей Сергеевич – студент Мос-
ковского политехнического университета;
systemscad@rambler.ru

Зайцев Кирилл Ильич – студент Москов-
ского политехнического университета;
systemscad@rambler.ru

Захаркина Ксения Петровна – студент
Московского политехнического универси-
тета;
systemscad@rambler.ru

Косицын Борис Борисович – доцент Мос-
ковского государственного технического
университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн.
наук;
kositsyn_b@bmstu.ru

Котиев Георгий Олегович – заведующий
кафедрой Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана,
д-р техн. наук, профессор;
kotievgo@yandex.ru

Кравец Владислав Николаевич – профес-
сор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн.
наук;
vnkravets@yandex.ru

Лянг Виктор Федорович – доцент Москов-
ского политехнического университета, канд.
техн. наук; systemscad@rambler.ru

Макаров Владимир Сергеевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
makvl2010@gmail.com

Малеев Сергей Игоревич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
sergmaleev91@mail.ru

Мартынов Дмитрий Андреевич – студент Московского политехнического университета;
systemscad@rambler.ru

Мирошниченко Анатолий Васильевич – главный конструктор ООО «ОКБ Техника» (г. Москва), канд. техн. наук;
avm-technika@mail.ru

Молев Юрий Игоревич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
moleff@yandex.ru

Мусарский Роман Абрамович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
musarsky@list.ru

Огороднов Сергей Михайлович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева» канд. техн. наук;
cte@mail.ru

Падалкин Борис Васильевич – первый проректор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
padalkin@bmstu.ru

Пинчин Алексей Викторович – техник ООО «Научно-производственная фирма «Диагностика и сертификация транспорта»;
pinchinav96@gmail.com

Стадухин Антон Алексеевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
ant.m9@yandex.ru

Степанов Евгений Владимирович – инженер-конструктор II категории Нижегородского открытого акционерного общества «Гидромаш»;
evgeniystepanov1991@yandex.ru

Тесленко Дмитрий Сергеевич – ведущий конструктор Государственного научного центра РФ «ФГУП НАМИ»;
mark-b52@inbox.ru

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

Черевастов Максим Геннадьевич – аспирант НГПУ им. К. Минина;
chermaxim_1978@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ РЕФЕРАТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания представленной к публикации статьи, отражающее предмет, цели и задачи работы, актуальность, постановку проблемы, вариант ее решения, сферу применения. Объем: не менее 10 строк (100-250 слов ~ 850 знаков). Реферат статьи может также включать краткое описание концептуальных основ и методологии работы, перспектив дальнейших исследований.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны воспроизводиться повторно в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся «калькой» русскоязычных слов. Рекомендуется использование слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Образец: авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The title of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3

Телефон: 8(920)00-37-877

E-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются **два печатных экземпляра** статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию (не менее 150 слов), ключевые слова (не менее 10).
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематическая направленность** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. Рекомендуется **ограничить самоцитирование** тремя пунктами.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, e-mail.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (**только в черно-белом изображении**) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

Образец оформления статьи:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 3 (126)

Редактор: **В.И. Казакова**
Технические редакторы: **М.В. Прохорова, А.В. Крылова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 17.09.2019. Дата выхода в свет 25.09.2019. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 23,95. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013