

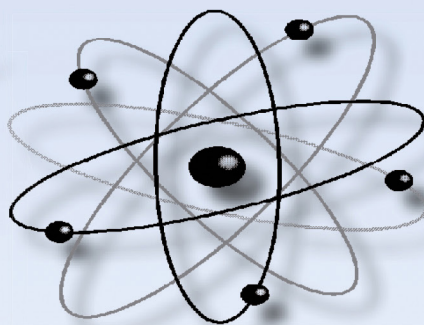
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ V (77)

2024

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствоведение» включены в перечень изданий ВАК РФ.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učenyje zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГТУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок: +7 (4217) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КНАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Алексей Иванович Евстигнеев , доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Татьяна Владимировна Степанова . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Алексей Александрович Просолович , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
---	---

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов , доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru Сергей Борисович Марьин , доктор технических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
2. Энергетика (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константин Константинович Ким , доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков , доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов , доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: kepapu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы комплексы программ)	Валерий Иванович Одинокоев , доктор технических наук, профессор. E-mail: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail: avkosm@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев , доктор технических наук, профессор, E-mail: rector@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru Олег Евгеньевич Сысоев , доктор технических наук, профессор, E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
---	--

Отделы:

1. Культурология и искусствоведение (5.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowskaja.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор.
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история)	Жанна Валерьяновна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

Содержание

ЭНЕРГЕТИКА

СТАРИНСКИЙ Н. И., ГУЛЯЕВ А. В., ФОКИН Д. С.

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ПО ПОИСКУ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ	4
--	---

УПРАВЛЕНИЕ

Грачев М. И.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ЕЁ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ.....	13
---	----

Горькавый М. А., Мельниченко М. А., Соловьев В. А., Горькавый А. И.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДАХ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА	22
---	----

Купова А. В., Купов А. В., Соловьев В. А.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ЯЗЫКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ	36
---	----

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Гренкин Г. В., Карпов В. В.

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УПРОЩЁННОЙ INDOOR-НАВИГАЦИИ	45
---	----

Краснов И. М., Григорьева А. Л.

К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНО-ПОРИСТОГО КОНУСНОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА	50
--	----

Щетинин В. С., Космынин А. А., Марьин С. Б.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОРАХ С ВНЕШНИМ НАДДУВОМ ГАЗА	55
---	----

Иванов С. Н., Колесник М. Б., Ким К. К., Азимов Х. Х., Андрианов И. К.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА	61
---	----

Носков С. И., Овсянников И. В.

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ РИСКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ НЕЗАВИСИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ	71
--	----

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОИСКА В НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ	77
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Стедьмаков В. А., Федорченко С. К.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫКРАШИВАНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЁРЕН ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ	84
---	----

Ким Е. Д., Дзюба Г. С., Щекин А. В., Дорофеев С. В., Войнов А. Р.

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ, ЛИКВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ $Al_x-Ti-Cr-Ni-V-Zr$, ПОЛУЧЕННЫЕ СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ	91
---	----

Стробыкин Н. А., Бахматов П. В.

УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	98
---	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лихтин В. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ОТ СООТНОШЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ КОМПОНЕНТ	108
--	-----

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧИСЕЛ $100 < Re < 3 \cdot 10^6$	115
---	-----

Старинский Н. И., Гуляев А. В., Фокин Д. С.
N. I. Starinsky, A. V. Gulyaev, D. S. Fokin

**РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ПО ПОИСКУ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ
ДЛЯ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР
НАПРЯЖЕНИЯ**

**DEVELOPMENT OF A REGULATOR TO FIND THE OPTIMAL FREQUENCY
FOR THE ASYNCHRONOUS MOTOR – AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER SYSTEM**

Старинский Никита Игоревич – магистрант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(962)677-59-60. E-mail: starii0612.n@gmail.com.

Nikita I. Starinsky – Master's Degree Student, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk); tel. 8(962)677-59-60. E-mail: starii0612.n@gmail.com.

Гуляев Александр Викторович – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: 89143127984@ya.ru.

Alexander V. Gulyaev – Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk). E-mail: 89143127984@ya.ru.

Фокин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Dmitry S. Fokin – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk).

Аннотация. В работе рассмотрена проблема низкой энергоэффективности при эксплуатации асинхронного двигателя (АД) и автономного инвертора напряжения. Причиной низкой энергоэффективности является наличие высших гармоник напряжения и тока, связанных с присутствием в частотном преобразователе нелинейных элементов. Целью данной работы является разработка такого алгоритма управления автономным инвертором напряжения, который будет учитывать как потери в двигателе, так и потери в инверторе от несущей частоты при генерации синусоидального сигнала посредством ШИМ. Была разработана имитационная модель системы АИН-АД в MATLAB Simulink с различными алгоритмами управления, получены графические зависимости искажений тока статора двигателя, потери в двигателе и потери в инверторе на коммутацию транзисторов от несущей частоты ШИМ при различных нагрузках двигателя. Как результат была получена функция показателя качества системы АИН-АД и разработана система экстремального управления в соответствии с данной функцией. Разработанный экстремальный регулятор осуществляет поиск точки экстремума, соответствующей минимуму искажений, регламентированных нормативно-технической документацией, а также определяет оптимальный режим работы инвертора при разных режимах работы электрической машины. Предложенные в работе алгоритмы позволяют без изменения топологии системы АИН-АД, которые в свою очередь приводят к удорожанию установки и дополнительным тратам, уменьшить уровень искажения тока статора АД и улучшить её энергоэффективность.

Summary. The paper considers the problem of low energy efficiency in the operation of an asynchronous motor and an autonomous frequency inverter, the reason for this is the presence of higher voltage and current harmonics associated with the presence of nonlinear elements in the frequency converter. The purpose of this work is to develop such algorithms for controlling an autonomous voltage inverter, which in turn took into account both losses in the motor and losses in the inverter from the carrier frequency of the PWM signal. A simulation model of the AVI-AM system in MATLAB Simulink with various control algorithms was developed, graphical dependences of motor stator current distortions, motor losses and inverter losses for switching transistors from the PWM carrier frequency at various motor loads were obtained. As a result, a system quality indicator was obtained and an extreme regulator of this function was developed, the found extreme point corresponds to a minimum of distortions regulated by regulatory and technical documentation, and also determines the optimal operating mode of the engine and inverter under a given machine load. The algorithms proposed in the work allow, without changing the topo-

gy of the AVI-AD system, which in turn lead to an increase in the cost of the installation and additional costs, to reduce the level of distortion, and consequently improve its energy efficiency.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, коэффициент искажения кривой тока, широтно-импульсная модуляция, самонастраиваемый регулятор, экстремальный регулятор, энергоэффективность.

Key words: asynchronous motor, autonomous voltage inverter, current curve distortion factor, pulse-width modulation, self-adjusting regulator, extreme regulator, energy efficiency.

УДК 621.316.13

Современные регулируемые электроприводы с асинхронными двигателями (АД) обычно комплектуются автономными инверторами напряжения. Эти инверторы осуществляют модуляцию напряжения статора, что приводит к искажению формы питающего напряжения. Это искажение, в свою очередь, приводит к формированию несинусоидальных токов, что порождает пульсации их средних значений. Это влияет на производительность двигателя, вызывая потери энергии и ухудшение его перегрузочной способности (снижение КПД). Изменение формы синусоиды тока статора асинхронного двигателя определяется показателем гармонических искажений (THD_i) [1], который вычисляется на основе специальной формулы, приведённой в ГОСТ 30804.4.7-2013 [2].

В научных публикациях [1; 3] приводятся решения, связанные с изменением в топологии самого инвертора в системе автономного инвертора напряжения и асинхронного двигателя, для уменьшения уровня искажения тока высшими гармониками, однако эти решения приводят к усложнению и удорожанию системы и дополнительным финансовым тратам. Ещё одним из предложенных в литературе решений является увеличение несущей частоты ШИМ сигнала, но данный метод приводит к потерям на коммутацию транзисторов непосредственно в самом инверторе [1].

Повышения синусоидальности. Как известно, форма тока нагрузки автономного инвертора напряжения (АИН) непосредственно связана с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тем, что ШИМ используется для формирования синуса тока статора АД, а его частота влияет на синусоидальность. С увеличением несущей частоты ШИМ $f_{нес}$ коэффициент искажения тока уменьшается и представляет собой гиперболическую функцию $THD_i(f_{нес})$. Из руководства по устройству электроустановок [4; 5; 6] при значениях $THD_i \leq 10\%$ исключается риск неисправностей, связанных с повышенной температурой, что требует перехода на кабели большего сечения и более мощные источники питания. Графики зависимости $THD_i(f)$, которые представляют вид гиперболы, были получены для нагрузок двигателя 161 и 220 Нм и приведены на рис. 1. Важно отметить, что точки пересечения графика зависимости $THD_i(f)$ с линией ограничения искажений ($THD_i \leq 10\%$) будут варьироваться по несущей частоте при изменении нагрузки на валу двигателя. Описанное указывает на необходимость создания регулятора, который автоматически будет подстраивать частоту в системе при изменении нагрузки.

Регулятор функции от одного аргумента. Рассмотрим принцип определения оптимальной частоты. Процесс определения этого значения частоты, при которой $THD_i(f_{opt}) \leq 10\%$, происходит по циклическому типу с дискретным шагом поиска и начинается после окончания переходного процесса (по разгону асинхронного двигателя). На первом шаге поиска сравнивается текущее значение $THD_i(f_1)$ со значением $THD_{iуст} = 10\%$, если сравниваемое значение оказалось выше установочного, то вычисляется их приращение ΔTHD_i из разности текущего значения $THD_i(f_1)$ и значения $THD_{iуст}$:

$$\Delta THD_i(f_k) = THD_i(f_k) - THD_{iуст}, \quad (1)$$

где k – порядковый номер шага поиска. И в зависимости от знака полученной разности (1) определяется направление поиска частоты f_k : если $\Delta THD_i > 0$, регулятор следует в направлении увеличения значения параметра f_k по оси абсцисс (см. рис. 1), иначе, при $\Delta THD_i < 0$, регулятор следует в

направлении уменьшения значения параметра f_k вдоль оси абсцисс. Далее полученное приращение сравнивается с числом формирования шага δ , и в зависимости от результатов сравнения выбирается фиксированный шаг увеличения частоты Δf .

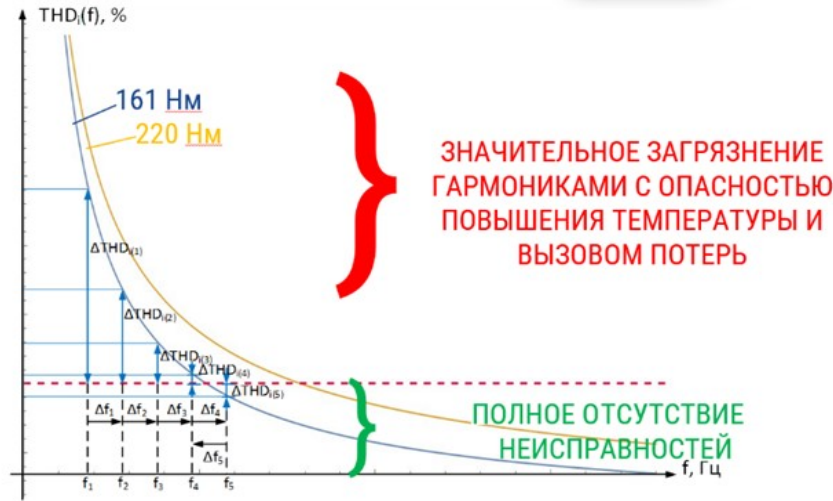


Рис. 1. Графики зависимости $THD_i(f)$ при различной нагрузке

Стоит отметить, что от частоты ШИМ сигнала изменяется не только коэффициент искажения кривой тока $THD_i(f)$, но и потери в инверторе на коммутацию транзисторов $W(f)$. На основании функциональных зависимостей уровня искажений $THD_i(f)$ и потерь в инверторе $W(f)$, представляющих собой нелинейно возрастающие функции от частоты, приведённых в [1], можно выдвинуть гипотезу, что точка пересечения двух этих функций является оптимальной, т. е. соответствует минимуму потерь мощности в системе АИН-АД [7].

Для проверки данной гипотезы требуется выполнить расчёт мощности потерь при реализации АИН ключевого режима работы IGBT транзисторов, циклически принимающих статические и динамические состояния. В любом из этих состояний возникают рассеивания мощности и энергии, которые нагревают полупроводники и увеличивают общие потери мощности в инверторе [8]:

$$P_{totM} = n \cdot (P_{totT} + P_{totD});$$

$$P_{totM} = n \cdot \left((E_{onT} + E_{offT} + E_{onD}) \cdot f_{sw} + u_{CE0} \cdot I_{cav} + r_c \cdot I_{crms}^2 + u_{D0} \cdot I_{Dav} + r_D \cdot I_{Drms}^2 \right);$$

$$P_{totM} = n \cdot \left((E_{onT} + E_{offT} + E_{onD}) \cdot f_{sw} + u_{ce0} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) + r_c \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos\varphi}{3\pi} \right) + \right. \\ \left. + u_{D0} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) + r_D \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cos\varphi}{3\pi} \right) \right),$$

где n – количество вентиля в модуле; P_{totT} – общие потери в IGBT транзисторах; P_{totD} – общие потери на диоде. Получаемый график имеет вид прямой, т. к. при неизменном напряжении линии постоянного тока и постоянных среднеквадратичных значениях переменного тока потери при переключении компонентов линейно зависят от частоты переключения, однако в случае высоких обратных напряжений (> 1 кВ) и/или при высоких рабочих температурах (≥ 150 °С) потери при блокировке могут приобретать важное значение и даже приводить к тепловому разгону из-за экспоненциально растущих обратных токов [8].

Простым совмещением графических зависимостей коэффициента искажения кривой тока статора двигателя и потерь в инверторе определение оптимальной точки по несущей частоте

ШИМ затруднено из-за того, что $THD_i(f)$ выражено в относительных единицах, а $W(f)$ – в размерных единицах.

Получение зависимостей потерь в двигателе от частоты. Для приведения потерь в двигателе и инверторе от одного аргумента (частоты ШИМ) к одним единицам измерения целесообразно использовать имитационную модель, которая показана на рис. 2 для асинхронного двигателя НВА-55 и позволяет получить зависимости потерь в двигателе от частоты при различной нагрузке (см. рис. 3).

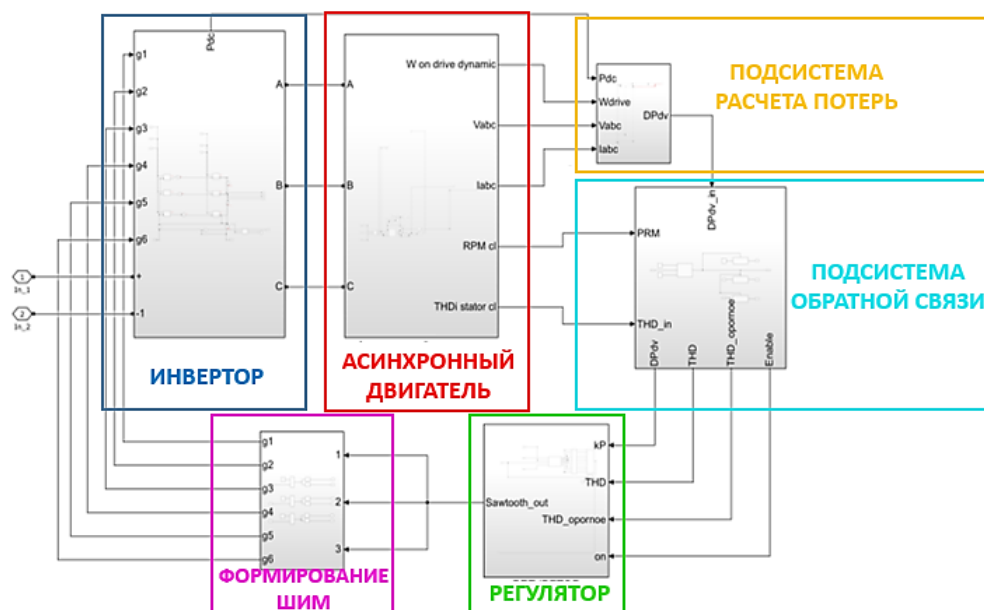


Рис. 2. Структурная схема системы «асинхронный двигатель – автономный инвертор напряжения» с реализуемыми алгоритмами управления в пакете MATLAB Simulink

Для удобства формализации полученных значений потерь произведём анализ полученных кривых $W_m = func(f)$ при нагрузках $M_{с1} = 161$ Нм и $M_{с2} = 220$ Нм, выполнив их степенную аппроксимацию:

$$W = af^{-b},$$

где a и b – коэффициенты степенного представления зависимости потерь в двигателе от частоты. В результате аппроксимации коэффициент детерминации $R^2 = 0,972$, что свидетельствует о достаточности использования данного представления. Данные аналитические зависимости были использованы в интерпретируемом языке функционального программирования системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica для построения графиков функций $W_{dv}(f)$ и $W(f)$. Таким образом, выявив функциональные зависимости потерь в АИН одновременно с потерями в АД, можем графически и аналитически наблюдать за динамикой потерь в данной системе в зависимости от частоты ШИМ. Однако, согласно объявленной гипотезе, ограничение процесса поиска до точки пересечения двух функций не позволит получить оптимальный режим работы системы. Связано это с тем, что гиперболические зависимости одновременно $THD_i(f)$ и $W_{dv}(f)$ при различной нагрузке смещаются вдоль оси ординат, следовательно, искомая точка пересечения графиков потерь также смещается вдоль оси абсцисс и будет находиться в области высоких частот. Поэтому модернизируем описанный ранее алгоритм регулятора поиска оптимальной частоты ШИМ модуляции до экстремального регулятора для поиска оптимальной точки по несущей частоте из условия экстремума рассматриваемых функций.

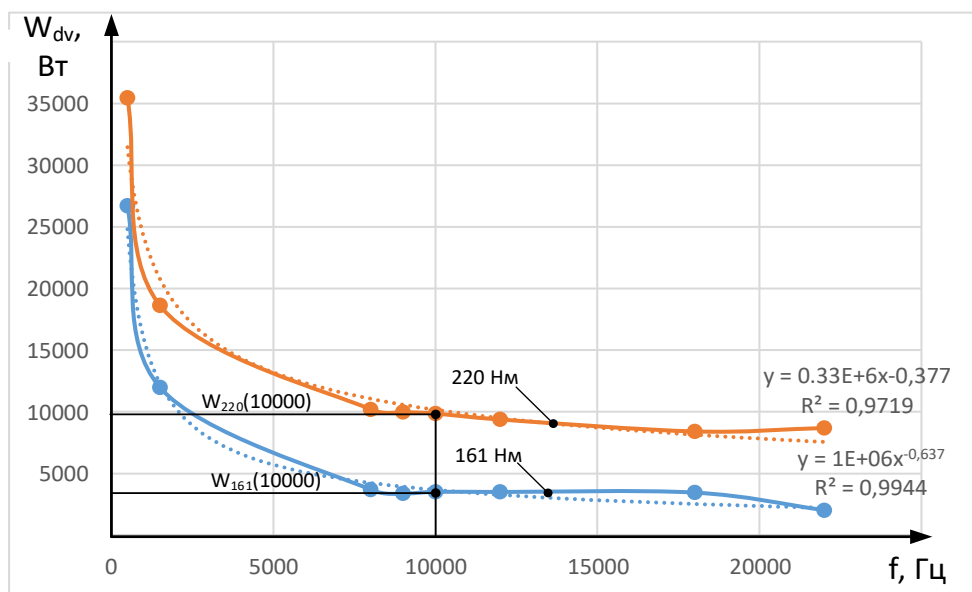


Рис. 3. Зависимости потерь в двигателе от частоты

Однако каждая из этих функций в отдельности не удовлетворяет необходимому условию экстремума [9], тем не менее их можно использовать для разработки системы экстремального регулирования как функции качества от одного аргумента – несущей частоты. Для такой реализации была получена функция качества системы, являющаяся суммарными потерями системы «АИН – АД» и удовлетворяющая необходимому условию экстремума функции (см. рис. 4). Таким образом, для реализации системы экстремального регулирования (СЭР), позволяющего определить оптимальную частоту ШИМ, была получена функция, имеющая локальный минимум и позволяющая определить минимум потерь мощности.

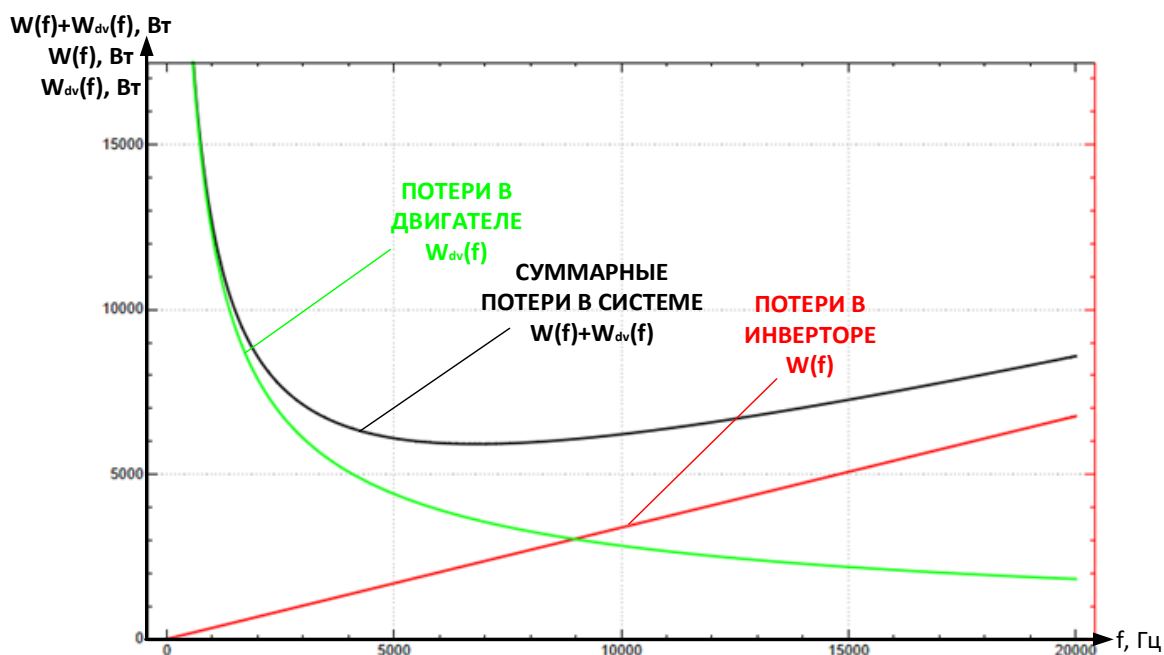


Рис. 4. Графические зависимости потерь в системе АИН-АД от частоты ШИМ

Классическая система экстремального управления. Главный отличительный признак экстремальной системы регулирования – это непрерывное автоматическое следование за значением входной величины, соответствующей экстремуму выходной в виде результата автоматического поиска [9].

Функциональная схема СЭР изображена на рис. 5.

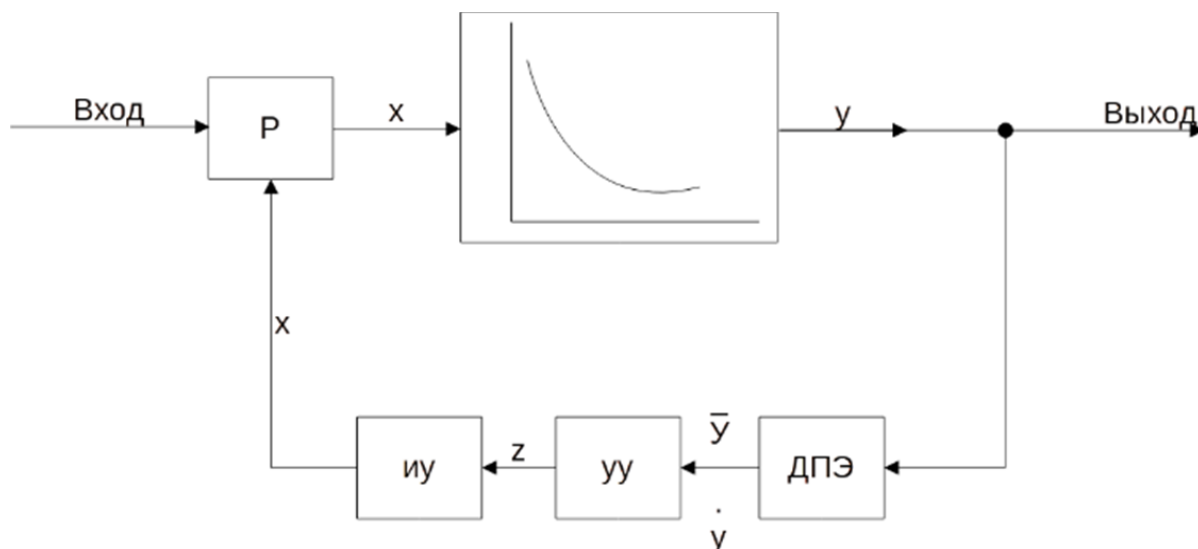


Рис. 5. Функциональная схема экстремального регулятора: Р – это регулирующий орган; ИУ – исполнительное устройство; УУ – управляющее устройство (осуществляет переключение направления сканирования); ДПЭ – датчик показателя экстремума (показывает положение системы относительно точки экстремума)

Датчик показателя экстремума использует два параметра: отклонение выходной величины y от отсчитываемого экстремального значения \bar{y} или производную выходной величины по входной. Управляющее устройство определяет моменты переключения сканирования либо знак, либо величину сигнала автоматического поиска. Исполнительное устройство формирует сигнал поиска, вокруг которого совершаются колебания входной величины.

Система экстремального управления предназначена для нахождения минимума или максимума показателя качества объекта и поддержания этого показателя в экстремальных значениях [10]. В данном случае показателем качества выбраны суммарные потери в системе «асинхронный двигатель и автономный инвертор напряжения». В качестве управляющего воздействия на систему управления асинхронным двигателем выступает несущая частота ШИМ.

Имитационная модель. В соответствии с описанными ранее алгоритмами разработана имитационная модель схемы «асинхронный двигатель и автономный инвертор напряжения» с системой управления в среде MATLAB Simulink [11; 12] (см. рис. 2).

Схема состоит из инвертора напряжения, выполненного на IGBT транзисторах, имитационной модели двигателя НВА-55 с переключателем нагрузки, системы управления, состоящей из звена формирования ШИМ и регулятора с обратными связями по коэффициенту искажения кривой тока статора THD_i статора, потерям мощности в инверторе P_{dc} и потерям в двигателе DP_{dv} .

На входы блока «Регулятор» поступают значения четырёх управляющих сигналов: контролируемого значения показателя качества системы kP , рассчитанного из потерь мощности в двигателе и потерь мощности в инверторе, текущего значения THD_i тока статора АД, опорного значения искажения кривой тока $THD_{i_опорное}$. Непосредственно работа самого блока регулятора осуществляется по описанным выше алгоритмам и программно реализована на языке Си при помощи встроенного редактора MATLAB. Результаты поиска частоты, при которой достигается экстремум функции показателя качества, приведены на рис. 6.

Из анализа этих рисунков видно, что точка минимума функций при нагрузке 161 Нм, что соответствует вентиляторной нагрузке вспомогательных машин электровоза 2ЭС5К, достигается при частоте 6750 Гц, а при нагрузке 220 Нм (80 % от номинальной нагрузки двигателя НВА-55) потери будут минимальны при частоте 11500 Гц.

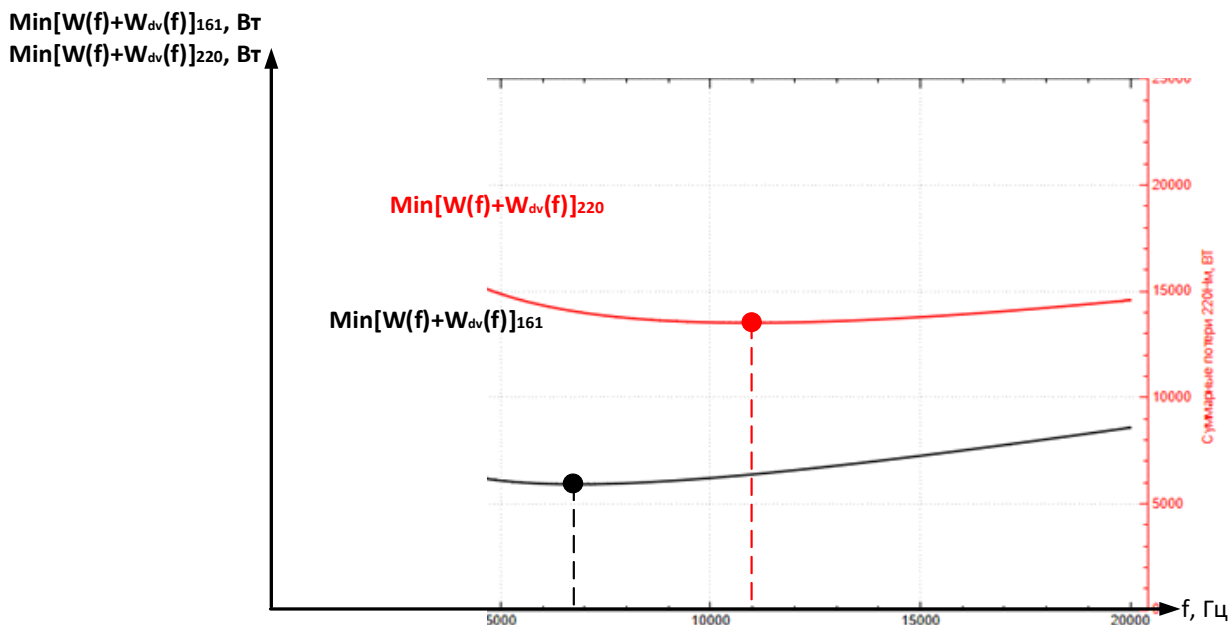


Рис. 6. Графики минимумов функций показателя качества

Далее определим, будут ли являться полученные точки минимумов показателя качества потерь в системе АД – АИН оптимальными и соответствовать необходимым значениям коэффициента искажения кривой тока. Для этого построим в одной координатной плоскости графики двух полученных ранее функций с соответствующими линиями минимума и ограничениями по параметру уровня искажений (см. рис. 7). Можно заметить, что окрестность полученной точки экстремума функции показателя качества системы, которая соответствует минимуму потерь в системе, находится ниже линии ограничения по коэффициенту искажения кривой тока статора АД. Следовательно, найденное регулятором значение несущей частоты ШИМ сигнала будет оптимальным не только по минимуму потерь в системе «АД – АИН», но и по уровню искажений.

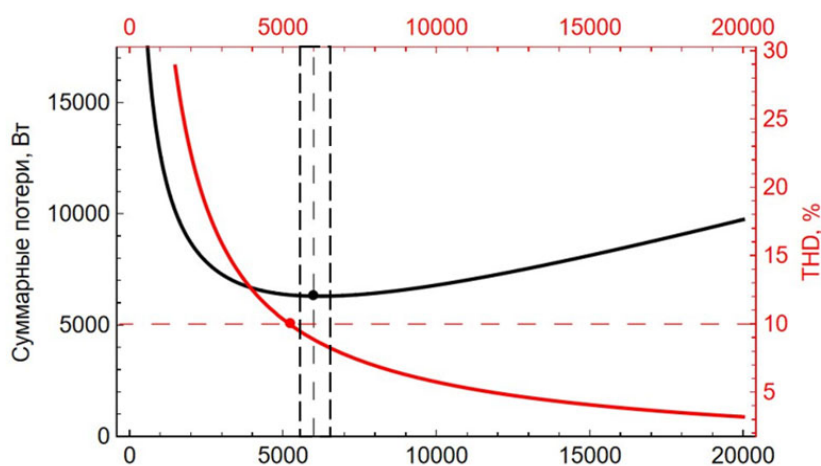


Рис. 7. Графические зависимости показателя качества и THD от частоты

Заключение. Разработана система автоматического поиска несущей частоты, при которой значение коэффициента искажения кривой тока статора асинхронного двигателя THD_i было меньше либо равно 10 %. Разработан метод приведения потерь в системе «АИН-АД» на коммутацию транзисторов АИН от частоты ШИМ к функции одного аргумента. Также создана система экстремального регулирования по полученной функции качества, что позволяет сократить потери в системе «АД-АИН» и тем самым повысить её энергетическую эффективность.

Эффективность разработанной экстремальной системы управления была проверена с помощью имитационного моделирования в программе Simulink. С помощью компьютерной модели были получены значения частоты, при которых потери в системе будут минимальны для АД НВА-55 с применением разработанной системы экстремального регулирования с нагрузкой 161 Нм. Например, при нагрузке 161 Нм и при фиксированной частоте 9 кГц суммарные потери в системе составили 6,6 кВт для классического способа, в то же время при найденной разработанным регулятором частоте 6750 Гц потери составили 6,2 кВт. Кроме того, найденная с помощью разработанного регулятора точка соответствует значениям коэффициента искажения кривой тока, которые будут ниже линии ограничения и связаны с наличием гармоник тока статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалык, Ю. С. Повышение энергоэффективности 3-фазного автономного инвертора напряжения / Ю. С. Кабалык // Электро. – 2015. – № 1. – С. 32-35.
2. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Общее руководство по средствам измерений и измерения гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств = Electromagnetic compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и внесён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 429-ст: введён впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр “САМТЭС”», Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. – М.: Стандартинформ, 2020. – 34 с.
3. Барегамян, Г. В. Выбор параметров LC-фильтра с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением / Г. В. Барегамян // Силовая электроника. – 2011. – № 1. – С. 50-56.
4. Руководство по устройству электроустановок – Schneider Electric. МКР-CAT-EL GUIDE-09, 12/2009. – 469 с.
5. IEEE Std 519-2014. Standard for harmonics: standard defines the voltage and current harmonics distortion criteria for the design of electrical systems. The existed voltage and current waveforms in every part of the system are explained in this standard, and the waveform distortion goals for the system designer are established. The standard is periodically updated as the industry evolves. Since its introduction in 1981, the standard has been updated several times and its latest edition is IEEE 519-2014. Some updates have been made by 2022 (see here). The main terms definitions and statistical evaluation technics are being covered within this current article, as the main changes that have been made in the standard were described in the IEEE-519 2014 edition.
6. ГОСТ 30804.3.12-2013. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний = Electromagnetic compatibility of technical equipment. Harmonic current emissions (equipment input current 16 A per phase). Limits and test methods: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и внесён Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 401-ст: введён впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр “САМТЭС”» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. – М. Стандартинформ, 2020. – 28 с.
7. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. М. Ишма- тов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.



8. Application Manual Power Semiconductors Published by SEMIKRON International GmbH ISBN 978-3-938843-83-3 2nd revised edition ISLE Verlag 2015 © SEMIKRON International 2015.
9. Моросанов, И. С. Методы экстремального регулирования / И. С. Моросанов // Автоматика и телемеханика. – 1957. – Т. 18. – Вып. 11. – С. 1029-1044.
10. Шухарев, С. А. Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов / С. А. Шухарев, А. В. Гуляев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 68-77.
11. Терёхин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: учеб. пособие / В. Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. – 320 с.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Грачев М. И.
M. I. Grachev

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ЕЁ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ

AUTOMATION OF THE ORGANIZATION AND ITS TECHNICAL EQUIPMENT

Грачев Михаил Иванович – научный сотрудник научно-исследовательского отдела Санкт-Петербургского университета МВД России (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: mig2500@mail.ru.

Mikhail I. Grachev – Researcher, Research Department, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Russia, St. Petersburg). E-mail: mig2500@mail.ru.

Аннотация. В работе рассматривается один из возможных подходов к автоматизации процессов управления высшим учебным заведением. Процесс принятия управленческого решения преобразуется в модель решения. Строится граф состояний системы процессов управления рассматриваемой системы, и применяются дифференциальные уравнения Колмогорова-Чепмена и метод Гаусса. Из рассматриваемой системы находится показатель эффективности реализации решения. Для связи полученного показателя эффективности реализации решения с временными состояниями системы строятся сетевые графики, позволяющие найти самый длинный временной путь. На базе полученных данных предлагается проводить автоматизацию процессов управления вузом.

Summary. The paper considers one of the possible approaches to automating the management processes of a higher educational institution (university). The process of making a managerial decision is transformed into a decision model. A graph of the states of the control process system of the system under consideration is constructed and the Kolmogorov-Chapman differential equations and the Gauss method are applied. An indicator of the effectiveness of the solution implementation is found from the system under consideration. It is proposed to link the obtained indicator of the effectiveness of the solution implementation with the temporary states of the system, network graphs are built to find the longest time path. Based on the data obtained, it is proposed to automate the university management processes.

Ключевые слова: аналитическая динамическая модель, показатель эффективности реализации, автоматизация, образовательная организация, процессы управления, техническое оснащение.

Key words: analytical dynamic model, implementation efficiency indicator, automation, educational organization, management processes, technical equipment.

УДК 005.5

В настоящее время вопросы автоматизации рассматриваются как необходимые, т. к. усложняются процессы взаимодействия человеко-машинных систем (ЧМС). Для руководителя любой организации требуется повышение эффективности работы организации в целом, что ими и рассматривается как автоматизация. В публикуемой литературе применяются различные подходы для реализации автоматизации управляемой системы, но в основном решается прямая задача путём подбора требуемых параметров работы системы [1–19].

Авторы публикаций [1–8] рассматривают в своих работах влияние человеческого фактора (ЧФ) на различные процессы.

Как отмечает А. А. Гребенщикова, влияние ЧФ может привести к возрастанию рисков на предприятии, но многое зависит от полученных компетенций и способности прогнозировать риски [2].

В статье Е. С. Дашковой [3] своевременное принятие и реализация управленческих решений являются важным фактором для успешного функционирования организации.

Ю. А. Зуева отмечает важность своевременного решения задачи по возникающим затруднениям в работе организации, но и выделяет значимость харизматических черт личности [5].

Со стороны обеспечения информационной безопасности И. В. Калущий пишет в своей работе [6], что человек может представлять проблему при выполнении различных задач, в том числе и при обеспечении информационной безопасности.



Д. Г. Маркова рассматривает проблему влияния ЧФ на вопросы информационной безопасности [7].

В статье А. В. Еркина приводится интересный анализ и разграничение возникающих проблем, происходящих в организации: 25 % из-за ЧФ и 75 % из-за программно-аппаратного обеспечения [9]; необходимо отметить важность данного разграничения, т. к. в настоящее время этот разрыв увеличивается в сторону техники. Соответственно, необходимо рассматривать процесс автоматизации как взаимное влияние ЧФ и технического оснащения (ТО).

В публикуемой литературе и диссертационных исследованиях [10–13] автоматизация рассматривается как процесс повышения эффективности рассматриваемой ими системы за счёт методов анализа и дальнейшего подбора и/или перебора программно-аппаратного комплекса с целью достижения требуемого результата. Данная постановка вопроса не всегда позволяет достигать требуемого результата, а лишь стремится к его достижению.

В данной работе решается обратная задача, позволяющая достичь требуемого показателя эффективности реализации решения и формировать требуемые характеристики рассматриваемой системы для достижения цели деятельности, что определяет *актуальность* проводимого исследования.

Известны следующие подходы при проведении исследований: анализ и синтез. Метод, основанный на анализе, не может гарантировать достижение цели деятельности. Применяемый в статье метод синтеза модели управленческого решения позволяет формировать требуемые характеристики к исследуемой системе.

Рассматривается вуз, т. к. данная организация является одной из первых, которая должна готовить кадры в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов для работы на современном программно-аппаратном комплексе в соответствии с требованиями современности. Соответственно, требуется постоянное оснащение вуза современными программно-аппаратными комплексами, что является автоматизацией вуза. Внедрение в контур управления вуза технических решений позволяет автоматизировать процессы взаимодействия между подразделениями и тем самым повышать эффективность работы в целом. Как следствие, это помогает своевременно реагировать на срывы в подготовке кадров и снижать отчисляемость из учебного заведения.

Н. Н. Моисеев указывал, что лицо, принимающее решение (ЛПР), осуществляет свою деятельность для реализации своих потребностей [14].

П. К. Анохин отмечал, что свои потребности ЛПР реализует на основе принимаемых им решений, а сами решения принимаются им на основе модели. Модель вырабатывается на основе получаемых знаний, умений и навыков [15].

Проводимое исследование будет строиться на основе синтеза модели управленческого решения человека по автоматизации процессов управления образовательной организации. Модель действия для реализации потребностей строится ЛПР на основе компетенций, получаемых им в процессе жизнедеятельности. Следовательно, чем больше факторов учтено в модели, тем больше она соответствует рассматриваемой системе. В рамках рассматриваемой системы могут применяться различные модели исследования системы для её автоматизации.

В работе авторов В. В. Дружинина, Д. С. Конторова, М. Д. Конторова [16] рассматриваемые системы должны обладать концептуальной полнотой, что в настоящее время не реализуется при проведении исследований.

Для рассмотрения управленческого решения применим методы декомпозиции, абстрагирования и агрегирования, представленные на рис. 1.

Рассматривая управленческое решение, мы должны провести декомпозицию управленческого решения от обстановки, информационно-аналитической работы и решения (реализация предназначения объекта управления).

Мы получили модель управленческого решения в виде трёх базовых компонентов:

$$P = F(\Delta t_{\text{ин}}, \Delta t_{\text{ан}}, \Delta t_{\text{рн}}),$$

где P – показатель эффективности реализации решения; $\Delta t_{\text{пр}}$ – среднее время проявления проблемы; $\Delta t_{\text{ип}}$ – среднее время идентификации проблемы; $\Delta t_{\text{нп}}$ – среднее время нейтрализации проблемы [17].

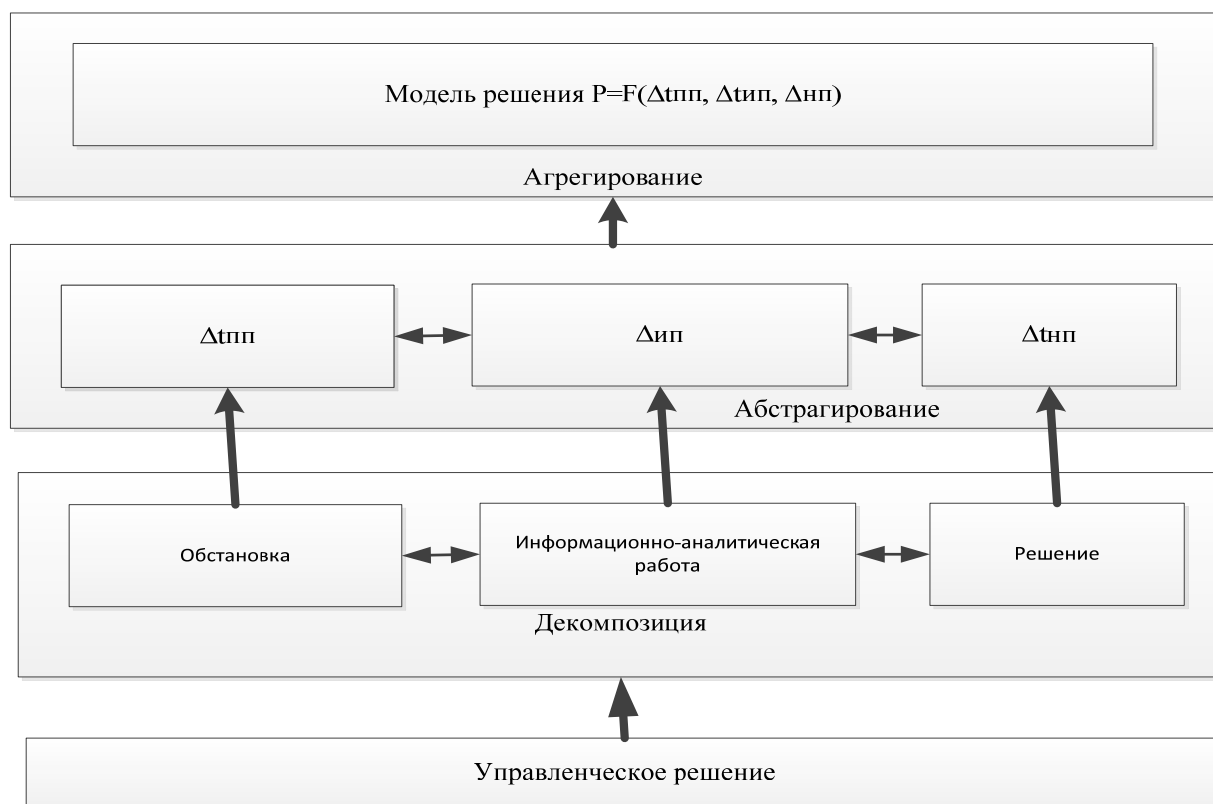


Рис. 1. Методы декомпозиции, абстрагирования и агрегирования управленческого решения

Временные диапазоны проявления проблемы, идентификации проблемы и нейтрализации проблемы можно представить в следующем виде (см. рис. 2).

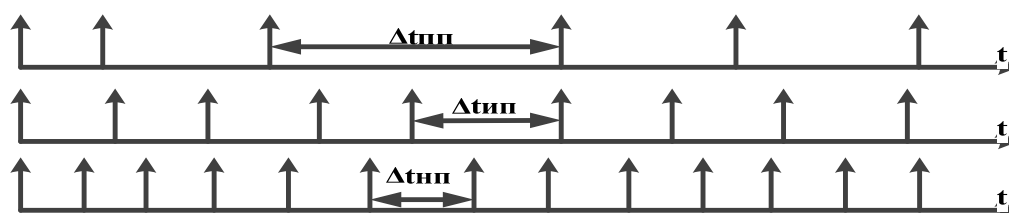


Рис. 2. Временные диапазоны

Для ЛПР решение задачи по повышению эффективности реализации решения является одной из приоритетных задач. Её реализация может быть осуществлена через техническое оснащение, имеющееся в распоряжении ЛПР, и другие ресурсы, которые могут поступить (запланированные поставки оборудования).

Принимаем полученный показатель P за показатель эффективности реализации решения руководителя, что является важным элементом в автоматизации организации на основе имеющегося технического оснащения.

Для оценки уровня автоматизации процессов управления вузом находится показатель эффективности реализации решения работы системы процессов управления в настоящее время, т. е. как работает вуз сейчас. Для приведения работы к требуемому показателю эффективности реализации решения необходимо формировать условия для его достижения.

Для достижения требуемого показателя эффективности реализации решения необходимо автоматизировать процессы управления вуза через техническое оснащение с требуемыми параметрами. Процесс принятия решения в ответ на возникающую проблему в процессах управления вузом изображён на рис. 3.

В результате исследования выявлена обратная зависимость между средним временем проявления проблемы и потоком проблем λ , возникающих в системе, средним временем идентификации проблемы и интенсивности v_1 , средним временем нейтрализации проблемы и интенсивности v_2 [17]:

$$\lambda = 1/\Delta t_{\text{пп}}, v_1 = 1/\Delta t_{\text{ип}}, v_2 = 1/\Delta t_{\text{нп}}.$$

Обратная зависимость средних значений и интенсивностей показывает возможность получать требуемые характеристики и решать обратную задачу. По дальнейшей логике рассуждений необходимо представить в виде графа состояний исследуемую систему (см. рис. 4).

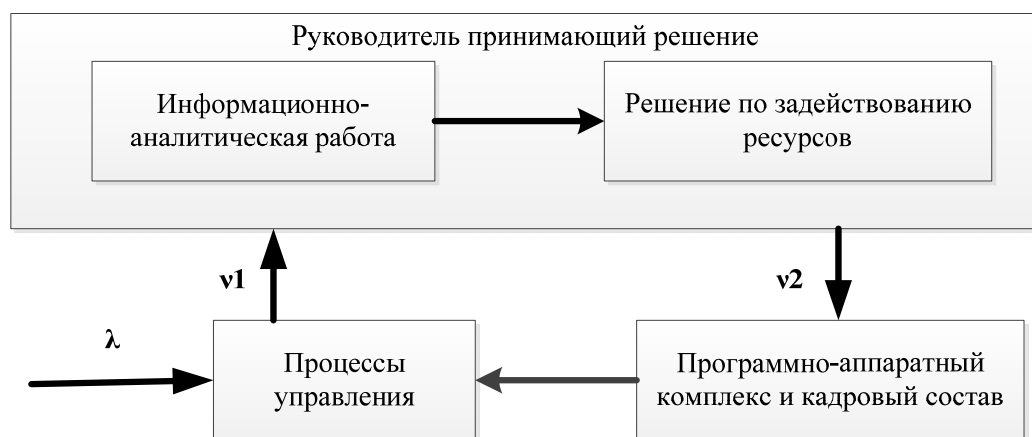


Рис. 3. Процесс принятия решения

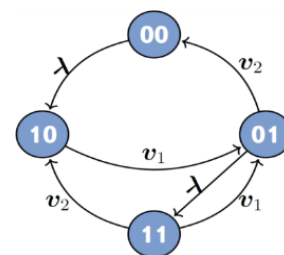


Рис. 4. Граф состояний системы

Исследуемая система получила 4 состояния:

- 00 (P_{00}) – штатная работа вуза (нет значимых воздействий, и не происходят идентификация и нейтрализация возникающих проблем в процессах управления вузом);
- 10 (P_{10}) – состояние работы вуза, при котором происходит идентификация проблемы, возникающей в системе, но не происходит её нейтрализация;
- 01 (P_{01}) – состояние работы вуза, при котором в процессах управления не идентифицируются проблемы в процессах управления вузом, но происходит их нейтрализация;
- 11 (P_{11}) – состояние работы вуза, при котором происходят идентификация и нейтрализация.

Представленный на рис. 4 граф состояний системы управления вузом позволяет применить дифференциальные уравнения Колмогорова для получения математической модели решения и нахождения требуемого состояния (показателя) рассматриваемой системы. Введём нормировочное уравнение, при котором сумма всех состояний системы будет равна единице. Таким образом, можно перейти к линейным алгебраическим уравнениям, решение которых осуществляется методом Крамера или Гаусса [18]:

$$P_{00} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2};$$

$$P_{10} = \frac{\lambda v_2 (\lambda + v_1 + v_2)}{(v_1 + v_1)[\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2]};$$

$$P_{01} = \frac{v_1 \lambda}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2};$$

$$P_{11} = \frac{\lambda v_1}{(v_1 + v_2)[\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2]}.$$

Принимаем полученное состояние системы $P_{00} = P$ в виде показателя эффективности реализации решения.

Для связи полученной математической модели с временными состояниями нахождения системы необходимо построить сетевые графики возникновения проблемы, идентификации возникающей проблемы и нейтрализации возникающей проблемы в процессах управления вузом. Пример сетевого графика приведён на рис. 5.

На рис. 5 в виде обозначений a_0, a_1, \dots, a_n приводятся запланированные события, в виде $A_{0-1}, A_{1-2}, \dots, A_{9-n}$ – номера запланированных работ. Отсчёт ведётся с нулевого события, т. к. в этот момент не происходит возникновения проблем в системе и система находится в штатном состоянии. События от a_0 до a_n – это сменяющиеся события, а смена работ от A_{0-1} до A_{9-n} – это то, что необходимо выполнить для достижения цели деятельности. Соответственно, переход от события к событию будет достигаться через определённое время. Затрачиваемое время определяют по графику и находят самые длинные (критические) пути.

После анализа графика определяется самый длинный временной путь. На рис. 5 критический путь отмечен более тёмным цветом.

Получив время проявления проблемы, время идентификации проблемы и время нейтрализации проблемы по трём составленным сетевым графикам, связываем полученную математическую модель с временными состояниями системы.

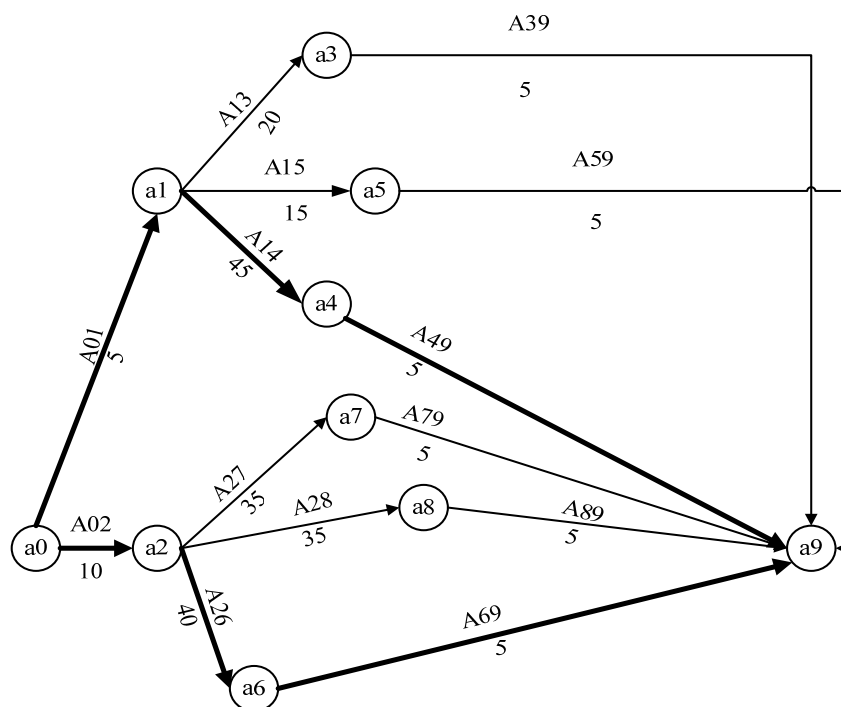


Рис. 5. Пример сетевого графика

Проводится расчёт по показателю эффективности реализации решения: или рассматриваемая система работает с низким показателем эффективности реализации решения, или с высоким. В случае получения низкого показателя эффективности реализации решения требуется решить обратную задачу для определения требуемых характеристик системы, способных привести процессы управления к необходимому показателю автоматизации.



Различные состояния системы в зависимости от требуемого показателя автоматизации представлены в табл. 1 [19].

Таблица 1

Состояния системы в зависимости от показателя автоматизации

x/y	λ	v_1	v_2	P00	P01	P10	P11
11	11,315	16,425	13,87	0,402673797	0,266018307	0,308538502	0,022769395
23	11,315	32,85	41,61	0,605510357	0,159019664	0,232033594	0,003436385
46	11,315	65,7	83,22	0,757845456	0,102106168	0,139161365	0,000887011
58	11,315	82,125	110,96	0,80182421	0,081331623	0,116327625	0,000516542
68	11,315	98,55	124,83	0,825837604	0,074550426	0,099213786	0,000398184
79	11,315	114,975	152,57	0,849933643	0,062856444	0,086937054	0,000272859
810	11,315	131,4	166,44	0,864109367	0,058608213	0,07705735	0,00022507
911	11,315	147,825	180,31	0,875752321	0,054849279	0,069209563	0,000188837
1012	11,315	164,25	194,18	0,885502954	0,051513462	0,062822876	0,000160709
1113	11,315	180,675	208,05	0,893798356	0,048540772	0,057522437	0,000138435
1214	11,315	197,1	221,92	0,900948212	0,04587948	0,053051812	0,000120496
1315	11,315	213,525	235,79	0,907178715	0,043485872	0,04922958	0,000105833
1416	11,315	229,95	249,66	0,912659292	0,041323276	0,045923736	9,36956E-05

Обозначения в табл. 1: x – коэффициент, показывающий, во сколько раз необходимо увеличить интенсивность v_1 для достижения требуемого уровня показателя эффективности реализации решения по идентификации возникающей проблемы в процессах управления вузом; y – коэффициент, показывающий, во сколько раз необходимо увеличить интенсивность v_2 для достижения требуемого уровня показателя эффективности реализации решения по нейтрализации возникающей проблемы в процессах управления вузом.

В таблице приведены состояния системы в зависимости от применяемого показателя автоматизации, что является важным фактором в задействовании технического оснащения для приведения к требуемым параметрам автоматизации процессов управления вузом. Проводя анализ состояний системы, можно предъявлять требования на ранних этапах возникновения проблем, тем самым прогнозируя требуемые параметры системы для дальнейшего задействования ресурсов, которыми располагает руководитель.

Как показывает практика, прогнозирование является важным элементом в автоматизации процессов управления и решения требуемых задач для предотвращения их срыва при возникновении проблемы.

Связывая три процесса, протекающих в системе управления вузом, с тремя зависимостями базовых компонентов управленческого решения и показателя эффективности реализации решения P строится 3-мерный график, соответствующий обстановке $\Delta t_\lambda = f \lambda(z_1, z_2, \dots, z_k)$, информационно-аналитической работе $\Delta t_{v1} = f_{v1}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и решению по нейтрализации возникшей проблемы в системе вуза $\Delta t_{v2} = f_{v2}(y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Так как процесс возникновения потока проблем в рассматриваемой системе задаётся как ординарный поток однородных событий в исследуемой системе, это позволяет привести зависимость в виде следующего 3D-графика (см. рис. 6).

Для определения требуемых характеристик, предъявляемых к техническому оснащению вуза, могут быть применены базы данных. В базе данных систематизированы состояния системы при различных воздействиях λ потока проблем [20] (см. рис. 7).

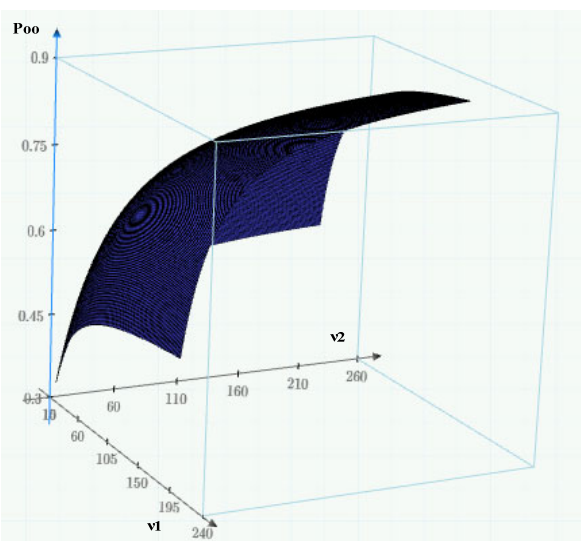


Рис. 6. 3D-график зависимости показателя эффективности реализации решения от интенсивностей v_1 и v_2

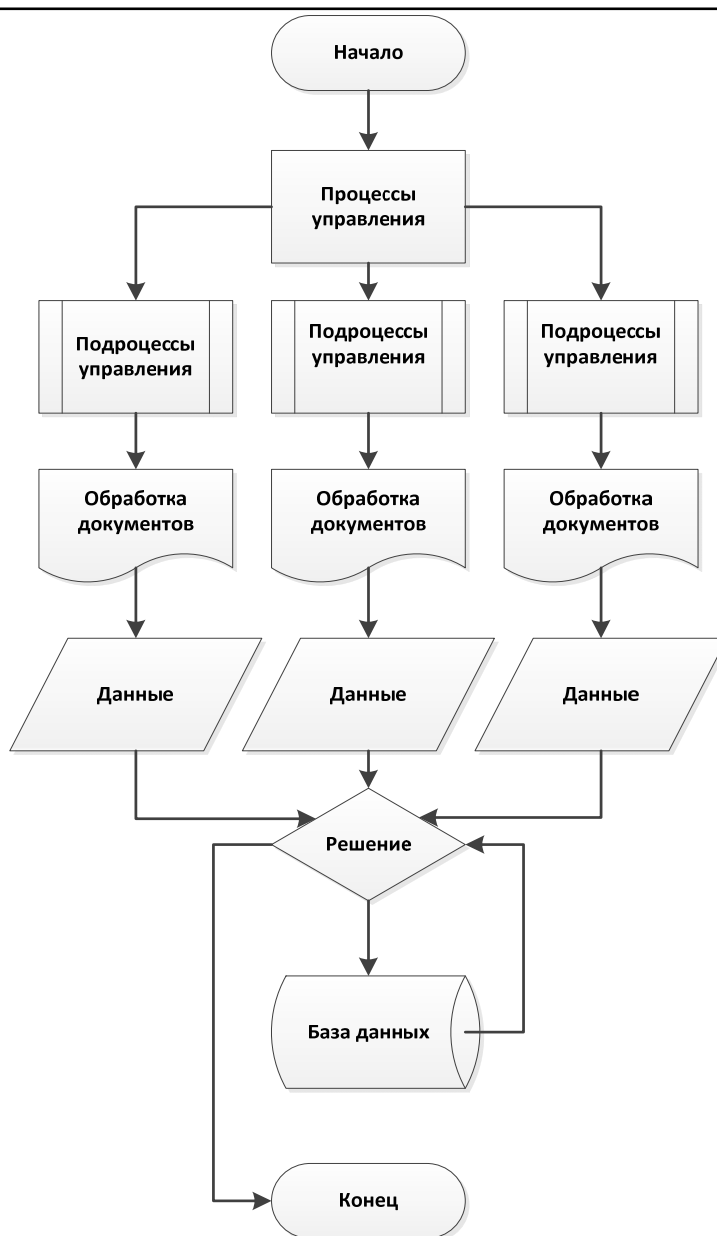


Рис. 7. Схема применения полученных значений базы данных

На рис. 7 представлен пример применения полученной базы данных, позволяющей автоматизировать рассматриваемую систему согласно требуемому показателю эффективности реализации решения. ЛПР воздействует на процессы по управлению вузом. Процессы подразделяются на подпроцессы управления, в которых происходит обработка процессов на основе изучения и анализа поступающих данных. Под подпроцессами понимается выполнение задачи подразделениями вуза, направленное на достижение цели деятельности вуза. Получаемая информация передаётся руководителю для итогового решения. В случае соответствия текущей работы требуемому показателю эффективности реализации решения руководителем делается вывод о высоком уровне технического оснащения и способности противодействовать возникающему потоку проблем, в случае несоответствия ЛПР обращается к базе, данные которой позволяют сравнить характеристики системы и автоматизировать её. В этом случае привлекается техническое оснащение, которым располагает руководитель, для достижения требуемых характеристик процессов управления вузом.



В публикуемой литературе и проводимых в настоящее время диссертационных исследованиях автоматизация рассматриваемых систем через решение обратной задачи и показатель эффективности реализации решения не рассматривается, что позволяет делать вывод об актуальности проводимого исследования. Рассмотрение управленческого решения через математическую модель позволяет получить показатель эффективности реализации решения и выработать обратную задачу для формирования требуемых характеристик, позволяющих достигать цель деятельности.

Предназначением вуза являются подготовка и выпуск соответствующего количества квалифицированных кадров. Возникающие проблемы в процессах управления вузом приводят к срыву выпуска требуемого количества выпускников. Наличие у ЛПР модели управленческого решения позволяет повышать эффективность процессов управления вузом и, как следствие, гарантировать требуемые цифры приёма и выпуска. В работе получен показатель эффективности реализации решения, позволяющий автоматизировать процессы управления вузом на основе решения обратной задачи, формировать требуемые характеристики к техническому оснащению исследуемой системы и задействовать имеющиеся технические резервы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаренко, В. А. Роль человеческого фактора в процессах принятия управленческих решений и их эффективности / В. А. Гончаренко, А. Н. Богатова, В. Е. Хабаров // Наука и образование: актуальные вопросы, проблемы теории и практики: сборник научных трудов Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Краснодар, 27 ноября 2020 года. – Краснодар: Краснодарский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова», 2020. – С. 602-611.
2. Гребенщикова, А. А. Влияние человеческого фактора на управление рисками и принятие управленческих решений / А. А. Гребенщикова // Структурные преобразования экономики территорий: в поиске социального и экономического равновесия: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Уфа, 24 декабря 2019 года. Т. 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр “Вестник науки”», 2019. – С. 110-113.
3. Дашкова, Е. С. Роль человеческого фактора в процессе разработки и реализации управленческих решений / Е. С. Дашкова // Мотивация и оплата труда. – 2016. – № 4. – С. 306-312.
4. Енгибарян, А. В. Роль человеческого фактора в принятии управленческого решения / А. В. Енгибарян, Ф. В. Шутилов // Производственный менеджмент: теория, методология, практика: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 18 мая – 14 июня 2016 года / Министерство образования и науки РФ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 125-130.
5. Зуева, Ю. А. Роль человеческого фактора в принятии управленческих решений / Ю. А. Зуева // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сборник трудов научно-практической и учебной конференции, Санкт-Петербург, 05-07 июня 2018 года. В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. – С. 209-212.
6. Калущий, И. В. Роль человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности бизнеса / И. В. Калущий, А. А. Агафонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2012. – № 2-2. – С. 173-178.
7. Маркова, Д. Г. Человеческий фактор в информационной безопасности / Д. Г. Маркова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 149-152.
8. Сковцов, И. П. О проблеме человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности / И. П. Сковцов, А. О. Титарев // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2022. – № 23. – С. 106-113.
9. Еркин, А. В. Человеческий фактор в обеспечении информационной безопасности автоматизированной системы электронного документооборота: теория и практика проявления / А. В. Еркин // Вопросы управления. – 2011. – № 3 (16). – С. 31-39.
10. Лаптева, О. Г. Автоматизация процесса управления рисками на предприятиях нефтегазовой промышленности: анализ автоматизированных систем управления рисками / О. Г. Лаптева, Н. В. Киселева // Вестник науки и образования. – 2021. – № 5-1 (108). – С. 5-13.

11. Суханова, Н. В. Разработка и применение нейросетевых моделей в автоматизации управления оборудованием и технологическими процессами / Н. В. Суханова // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1 (15). – С. 24-32.
12. Козлова, А. В. Разработка метода идентификации пригодности измерительного оборудования в управлении автоматизированными производственными системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Козлова Александра Владимировна. – М., 2021. – 174 с.
13. Ильюшин, Ю. В. Разработка системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Ильюшин Юрий Валерьевич. – СПб., 2021. – 275 с.
14. Моисеев, Н. Н. Человек и биосфера: опыт системного анализа и эксперименты с моделями / Н. Н. Моисеев, В. В. Александров, А. М. Тарко. – М.: Наука, 1985. – 271 с.
15. Анохин, П. К. Идеи и факты в разработке теории функциональных систем / П. К. Анохин // Психологический журнал. – 1984. – Т. 5. – С. 107-118.
16. Дружинин, В. В. Введение в теорию конфликта / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов, М. Д. Конторов. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
17. Грачев, М. И. Математическое моделирование в социальных и экономических системах / М. И. Грачев, В. Г. Бурлов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15. – № 5. – С. 38-45.
18. Грачев, М. И. Моделирование в целях оценки повышения эффективности управления предприятием / М. И. Грачев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2023. – Т. 20. – № 10 (232). – С. 31-37.
19. Грачев, М. И. Повышение эффективности работы организации на основе критерия автоматизации / М. И. Грачев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 144-150.
20. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621938 Российская Федерация. База данных средних временных состояний системы необходимых для автоматизации процессов управления вузом: № 2024621644: заявлено 25.04.2024; опубликовано 06.05.2024 / Грачев М. И.



Горькавый М. А., Мельниченко М. А., Соловьев В. А., Горькавый А. И.
M. A. Gorkavyu, M. A. Melnichenko, V. A. Solovyev, A. I. Gorkavyu

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДАХ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА

ALGORITHM FOR SEARCHING OPTIMAL MOTION PARAMETERS DURING RECTILINEAR TECHNOLOGICAL TRANSITIONS OF A COLLABORATIVE ROBOT

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Mikhail A. Gorkavyu – PhD in Engineering, Head of Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Мельниченко Маркел Андреевич – аспирант, старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Markel A. Melnichenko – Postgraduate Student, Senior Lecturer, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Горькавый Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru.

Aleksandr I. Gorkavyu – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru.

Аннотация. В работе представлен алгоритм расчёта энергетических затрат и времени исполнения наиболее простой технологической операции, выполняемой коллаборативным роботом – линейного перемещения центральной точки инструмента (ТСП) в зависимости от выбора профиля графика изменения линейной скорости. Предложенный алгоритм синтезирован с целью исследования потенциала энергосбережения и повышения производительности как наиболее важных показателей эффективности функционирования коллаборативного робота (помимо безопасности). Для демонстрации результативности предложенных практических решений в работе представлен пример моделирования реализации коллаборативным роботом KUKA LBR iiwa 7 R800 прямолинейного перемещения ТСП из одной точки в другую в среде MATLAB. Результаты исследования показали наличие потенциала энергосбережения и увеличения производительности как для избранного ряда конфигураций робота, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к технологическим перемещениям типа LIN внутри коллаборативного процесса.

Summary. The article presents an algorithm for calculating the energy costs and execution time of the simplest technological operation performed by a collaborative robot - linear movement of the tool center point (TCP) depending on the choice of the linear speed profile change graph. The proposed algorithm is synthesized with the aim of studying the potential for energy saving and increasing productivity, as the most important indicators of the collaborative robot effectiveness (in addition to safety). To demonstrate the effectiveness of the proposed practical

solutions, the work presents an example of modeling the implementation by a KUKA LBR iiwa 7 R800 collaborative robot of TCP rectilinear movement from one point to another in the MATLAB environment. The results of the study showed the potential for energy savings and increased productivity, both for a selected range of robot configurations and in the space of all possible configurations in relation to LIN-type technological movements within a collaborative process.

Ключевые слова: автоматизация, коллаборативный робот, производительность, энергетическая эффективность, линейное перемещение, оптимизация траекторных перемещений.

Key words: automation, collaborative robot, productivity, energy efficiency, linear motion, trajectory optimization.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №22-71-10093 <https://rscf.ru/project/22-71-10093/>).

УДК 004.896

Введение. В задачах оптимизации траекторных перемещений роботов в рамках коллаборативных производственных (технологических) процессов, согласно [1–5], ключевыми показателями, оказывающими влияние на качество процесса, являются: быстродействие (производительность), безопасность, энергоэффективность, эргономичность, надёжность, универсальность и др. Часть этих параметров статичны и не поддаются оптимизации, например, определяются конкретным экземпляром робота (т. е. свойствами его мехатронных узлов и модулей) [6], конкретной конфигурацией рабочего пространства технологического участка, используемыми локальными системами координат, степенью вовлечённости человека в коллаборативный процесс и т. д. [7; 8]. Данные параметры не могут быть изменены без вмешательства в конфигурацию или организацию технологического процесса. В свою очередь, группа таких показателей, как производительность (количество операций в единицу времени), энергоэффективность и безопасность (например, отражённой вероятностью возникновения коллизий), поддаётся оптимизации на всех уровнях планирования и организации комплекса движений: стратегическом, тактическом и оперативном [9; 10].

Процесс оптимизации интегральных параметров производительности, энергетической эффективности и безопасности ($Prod + EE + Sf$), несмотря на детерминированность мехатронной части (робот, инструмент, дополнительные оси и т. д.) [11; 12], усложняется неопределённым и неизвестным заранее заданием коллаборативной системы, оригинальным захватом, например, как в [13; 14], заранее неизвестным статическим моментом [15] и определяется многовариантной алгоритмической составляющей стратегии и тактики планирования движений как реакций на задающие и возмущающие воздействия.

Не вдаваясь в подробности процедур планирования стратегии и тактики движений, описанных, например, в [16], так или иначе робот должен будет реализовать траекторию, спланированную или в пространстве задач (с определённой точностью аппроксимации [9]), или в пространстве суставов [10]. Первый тип характерен для технологических переходов, у которых при $\forall P_i \in P_1 \dots P_n$ (где $P_1 \dots P_n$ – траектория в пространстве XYZ) определены точки P_{i-1} и P_{i+1} ($i = 2 : n - 1$) (т. е. жёстко определены $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \Delta A_i, \Delta B_i$ и ΔC_i) – приращение координат в декартовой системе и приращение углов вращения вокруг осей декартовой системы координат для позиции и ориентации рабочего органа робота, оснащённого инструментом. В частности, для роботов KUKA этот тип перемещений реализуется командами LIN (linear), CIRC (circular) и их комбинациями. Второй тип характерен для технологических и вспомогательных переходов $P_1 \rightarrow P_n$, для которых не устанавливается жёстких ограничений для позиции и ориентации рабочего органа робота в промежуточных точках. У роботов KUKA этот тип перемещений реализуется командой PTP (point-to-point).

Подходы к оптимизации параметров ($Prod + EE + Sf$) для двух представленных типов движений кардинально различны. Не преуменьшая актуальность научных исследований в поисках

путей оптимизации ($Prod + EE + Sf$) для движений второго типа в работе рассматривается ряд научных результатов для движений первого типа.

В связи с ограничениями технологической и физической природы движений первого типа задача обеспечения безопасности (отсутствия столкновений типа «рабочий орган – объект в динамически изменяющейся рабочей среде») может быть решена только за счёт прерывания технологической операции (аварийный останов), что может привести к негативным последствиям при реализации технологической операции. В силу тривиальности решения она не рассматривается. Задача обеспечения безопасности «робот – объект в изменяющейся среде» представлена в [17] и не входит в объём данного исследования.

Таким образом, целями работы являются исследование потенциала и разработка алгоритмов оптимизации параметров $Prod + EE$ применительно к прямолинейным технологическим переходам с сохранением заданной ориентации инструмента.

В качестве входных аргументов оптимизационной задачи $Prod + EE$ выступают параметры спланированной траектории перемещения инструмента в пространстве задачи: $\vec{Pos}(t), \vec{v}(t), \vec{a}(t)$ – положение, скорость и ускорение. Также в качестве дополнительного входного аргумента использована постоянная составляющая мощности (P_{tool}), потребляемой нагрузкой инструмента (например, термического ножа или паяльника) при его наличии на фланце робота.

Методология. Предложенные в работе алгоритмы и результаты исследований базируются на физически адекватных математических моделях. При этом кинематическая модель манипулятора отражает промышленного коллаборативного робота KUKA LBR iiwa 7 R800, т. е. его массогабаритные и инерционные показатели. Кинематическая модель рассматриваемого коллаборативного робота построена на базе ДН-метода [18]. Решение обратной задачи кинематики (ОЗК) [19] выполняется посредством решателя ОЗК пакета RST MATLAB, базирующегося на методах BFGS GradientProjection [20] и LevenbergMarquardt [21]. Планирование траектории движения центральной точки инструмента (TCP) осуществлялось в соответствии с типовыми требованиями технологических режимов, характерных для прямолинейного фрезерования, шлифования, сварки, трёхмерной роботизированной печати [22] и т. п., в общем, выражающихся в необходимости поддержания скорости перемещения TCP в пределах трапецеидального профиля. В рамках стратегии планирования траектории в пространстве задач использовалась функция *trapveltraj* [23]. Планирование траектории в пространстве суставов (Joint Space) по результатам решения ОЗК для промежуточных точек осуществлялось посредством метода Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial [24] одноимённой функцией *pchip* (Interpolation/MATLAB). Реализуемость поз робота в соответствии со спроектированными конфигурациями проверялась программными функциями поиска коллизий RST MATLAB и посредством инструментов Inverse Kinematic Designer. Динамическая модель представлена в виде дифференциального уравнения [25], алгоритмы расчёта динамики представлены в работе [26]. Для объединения процедур и объектов использовался смешанный стиль программирования на высокоуровневом языке, в частности MATLAB.

Разработка алгоритма поиска оптимальных параметров линейного перемещения. В отличие от технологического процесса на базе промышленных роботов, где операция линейного перемещения полностью детерминирована, а программа исполнения разработана заранее, неизменна и не корректируется, в коллаборативном процессе часть параметров перемещения определяется в реальном времени. Как правило, заранее неизвестны координаты начальной и конечной точек (например, они могут быть указаны оператором с помощью маркеров и других средств непосредственно в процессе работы), что, в свою очередь, приводит к неопределённости ориентации TCP в глобальной системе координат. Соответственно, неизвестны как начальная и конечная точки конфигурации робота, так и промежуточные. То есть процедура планирования траектории, включая итерационное решение ОЗК, должна в таком случае выполняться в реальном времени. Кроме этого, результат должен быть получен в условиях технологических ограничений операции, для успешного исполнения которой требуется линейное перемещение, а также технических огра-

ничений, определяемых конструктивными характеристиками робота (линейное максимальное ускорение (a_{\max}), линейная максимальная скорость (v_{\max}), а также угловые координаты).

Поскольку конфигурации робота заранее неизвестны и есть коридор ограничений скорости и ускорения подачи ТСП, то представляется возможным выполнить ряд действий для расчёта и выбора оптимального профиля линейной скорости ТСП, позволяющего максимизировать либо производительность операции, либо её энергоэффективность, либо совокупность взвешенных значений $P + EE$.

Исходными данными для задачи оптимизации являются:

1. $v_{\lim} = [v_{\lim_{\min}}, v_{\lim_{\max}}]$ – вектор ограничений максимальной скорости v на участке равномерного движения ТСП в рамках трапецеидального профиля скорости;

2. $\vec{P_1 P_2}$ – вектор перемещения, при этом обе точки определены для робота в пространстве задач, т. е. известны

$$P_1 = \{x_1, y_1, z_1, A_1, B_1, C_1\}, P_2 = \{x_2, y_2, z_2, A_2, B_2, C_2\},$$

где $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – координаты точек в декартовой системе; $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ – углы поворота вокруг осей XYZ соответственно.

Актуальный для решаемой задачи профиль скорости перемещения ТСП представлен на рис. 1.

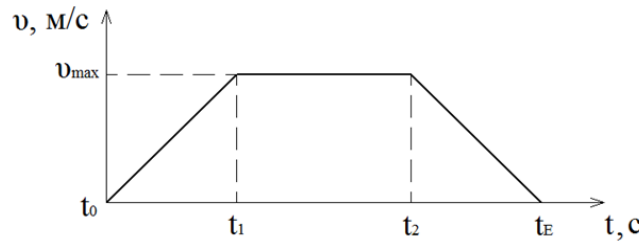


Рис. 1. Трапецеидальный профиль скорости

С учётом трапецеидального профиля скорости (см. рис. 1) уравнение движения описывается как

$$S = \int_{t_0}^{t_1} \frac{v_{\max}}{t_1 - t_0} \cdot t dt + v_{\max} (t_2 - t_1) + \int_{t_2}^{t_E} \left(-\frac{v_{\max}}{t_E - t_2} \cdot t + \frac{v_{\max}}{t_E - t_2} t_2 + v_{\max} \right) dt$$

и, если $t_0 = 0$, $t_1 = t_E/d$; $t_2 = t_E - t_E/d$ и $S = \left| \vec{P_1 P_2} \right|$, формула зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ имеет вид

$$t_E = \frac{\left| \vec{P_1 P_2} \right|}{v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{1}{d} \right)}. \quad (1)$$

Учитывая (1) для $\forall v_{\max} v \in [v_{\lim_{\min}}, v_{\lim_{\max}}]$ и $\forall d \in (2; \infty)$, представляем возможным вычислить t_E , принимая во внимание ограничения линейного ускорения робота

$$\max \left| \left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right|_0^{t_E} < a_{\max},$$

определить достижимость t_E с исходными параметрами. Тогда задача максимизации производительности будет записываться как

$$t_E(v, d) = \frac{\left| \vec{P_1 P_2} \right|}{v \left(1 - \frac{1}{d} \right)} \rightarrow \min$$

при v_{\max} ограничениях $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, $2 < d < \infty$; $\max \left| \left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right| < a_{\max}$ при $0 \leq t \leq t_E$.

Если учесть факт заранее неопределённой конфигурации робота в точках P_1 и P_2 , необходимо для всех достижимых параметров t_{Eij} , $v_{\max ij}$, d_{ij} найти соответствующее значение энергии (E).

Динамика линейного перемещения робота для каждой пары v_{ij} и d_{ij} (а также сопряжённой с ними t_{Eij}) определяется с заданным шагом дискретизации, например, функцией `trapveltraj` пакета RST MATLAB, позволяющей определить вместе с проекциями $v_{ij}(t)$ также проекции $a_{ij}(t)$ и $S_{ij}(t)$ на оси Ox , Oy и Oz глобальной системы координат робота. При этом происходит расчёт значений времени $t = 0 : t_k : t_{Eij}$.

Далее выполняется решение ОЗК для полученных $S_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ и $a_{ij}(t)$ при $t = 0 : t_k : t_{Eij}$ методом BFGS при $A, B, C \rightarrow \text{const}$, т. е. осуществление перехода в пространство суставов с последующей интерполяцией значений по методу Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial (PCHIP).

Результатом расчёта являются угловые переменные $q_{ij}^r(t)$; $\omega_{ij}^r(t)$; $\frac{d\omega_{ij}^r}{dt}t$ (положение, угловая скорость и угловое ускорение), характерные для выбранного профиля линейного перемещения (для текущих значений v_{ij} и d_{ij}).

На следующем шаге осуществляется проверка выхода из ограничений по угловым скоростям, ускорениям и углам осей робота. В случае успешного прохождения проверки производится решение обратной задачи динамики согласно формуле

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ M(q)^{-1} (-C(q, \omega) \cdot \omega - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + \tau) \end{bmatrix},$$

которая может быть также записана в виде

$$M(q) \frac{d\omega}{dt} = -C(q, \omega) \frac{d\omega}{dt} - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + \tau,$$

где $M(q)$ – матрица значений масс в пространстве суставов, определённых по текущей конфигурации робота, расчёт данной матрицы возможен с использованием функции `massMatrix`; $C(q, \omega)$ – термы Кориолиса, которые умножаются на ω для вычисления произведения скорости, вычисление произведения скорости, реализовано с помощью функции объекта `velocityProduct`; $G(q)$ – гравитационные моменты и силы, необходимые для того, чтобы все суставы сохраняли своё положение в условиях удельного веса, расчёт моментов сил тяжести реализован с использованием функции объекта `gravityTorque`; $J(q)$ – геометрический Якобиан для указанной конфигурации суставов, вычисление геометрического Якобиана возможно с помощью объектной функции `geometricJacobian`; F_{Ext} – матрица внешних сил, приложенных к телу, генерация матрицы внешних сил возможна с помощью функции объекта `externalForce`; τ – вектор моментов осей и усилий, приложенных к каждой оси; $q, \omega, \frac{d\omega}{dt}$ – соответственно положения осей (рад), скорости осей (рад/с) и ускорения осей (рад/с²), задаваемые отдельными векторами.

После расчёта динамических характеристик представляется возможным определение момента $\tau_{ij}^r(t)$, который также необходимо проверить на ограничения.

Четвёртым шагом является определение значения механической энергии по формуле

$$E_{ij} = \sum_{r=1}^7 \sum_{k=0}^{t_{Eij}} \tau_{ijk}^r(t) \cdot \omega_{ijk}^r(t),$$

т. е. работы механизма, совершённой в рамках трапецеидального профиля линейного движения $v_{\max ij}$, t_{Eij} , d_{ij} .

Определяя E_{ij} возможно найти минимальное значение энергии, требуемое для выполнения роботом прямолинейного движения $P_1 P_2$ с профилем скорости v_{ij} , t_{Eij} , d_{ij} при определённых на этапе решения ОЗК конфигурациях робота в P_1 и P_2 .

Представленная процедура может быть описана в виде блок-схемы алгоритма оптимизации траектории перемещения коллаборативного робота в пространстве задач по взвешенной сумме критериев максимизации производительности и энергоэффективности (см. рис. 2).

Пример работы алгоритма оптимизации прямолинейного технологического перехода.

Для демонстрации представленного решения ниже приведён пример моделирования реализации коллаборативным роботом прямолинейного перемещения ТСП из точки P_1 в точку P_2 в двух вариантах, связанных с неоднозначностью решения ОЗК методом BFGS. Общие исходные данные для двух вариантов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Наименование переменной	Значение
Позиция ТСП в точке P_1 в мировой системе координат	[0.3 0.4 0.4] (X Y Z), м
Ориентация ТСП в точке P_1 в мировой системе координат	[- π 0 - π] (X Y Z), рад
Позиция ТСП в точке P_2 в мировой системе координат	[0.35 0.05 0.5] (X Y Z), м
Ориентация ТСП в точке P_2 в мировой системе координат	[- π 0 - π] (X Y Z), рад
Ограничения максимальной линейной скорости ТСП	[0.1 0.6], м/с
Ограничения абсолютного максимального линейного ускорения ТСП	[1], м/с ²
Ограничения угловых скоростей осей робота	[98 98 100 130 140 180 180], град.
Ограничения моментов осей робота	[176 176 110 110 110 40 40], Н·м
Ограничение интервала равноускоренного движения	[2.1 5.1]

Конфигурация робота в точке P_1 для двух вариантов была представлена согласно векторам $\text{conf1_v1} = [0.2765 \ 0.5070 \ -2.2752 \ 1.6816 \ -0.4175 \ -1.1491 \ -1.8360]$ и $\text{conf1_v2} = [0.0358 \ 0.8099 \ -1.7783 \ 1.6816 \ -0.8143 \ -1.3442 \ -1.5977]$.

Итоговая конфигурация робота в точке P_2 для робота в варианте 1 была рассчитана как $\text{conf2_v1} = [-0.4722 \ -0.0912 \ -2.5657 \ 1.9325 \ 0.0518 \ -1.2861 \ -3.0543]$, в варианте 2 – как $\text{conf2_v2} = [-1.1537 \ 0.8659 \ -1.1419 \ 1.9325 \ -0.7673 \ -1.6378 \ -2.1744]$.

Результаты моделирования для двух вариантов пар конфигураций представлены группой графиков (см. рис. 3-7).

При этом записям data 1...7 соответствуют указанные на графике переменные для каждой из семи осей робота.

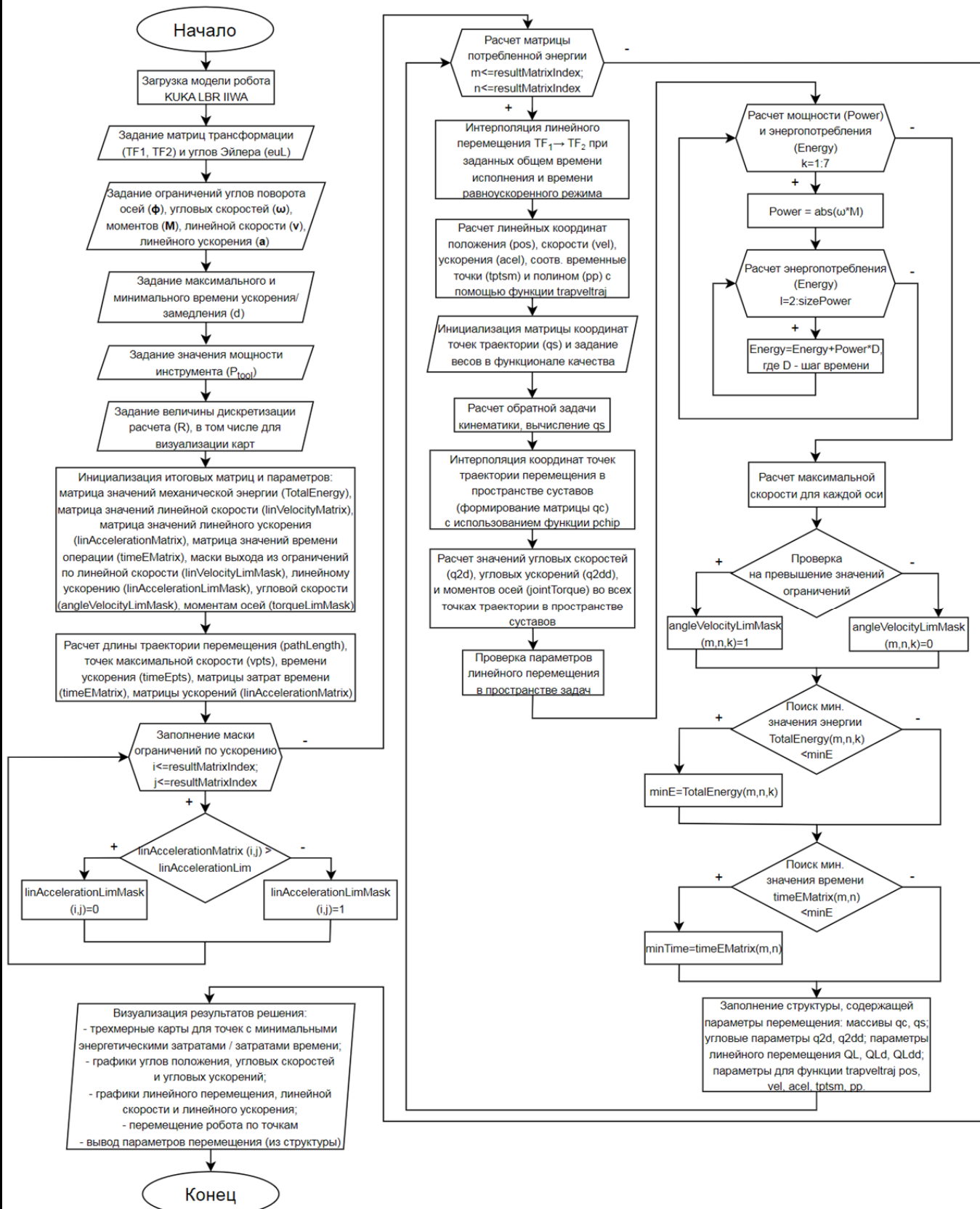


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска оптимальных параметров движения

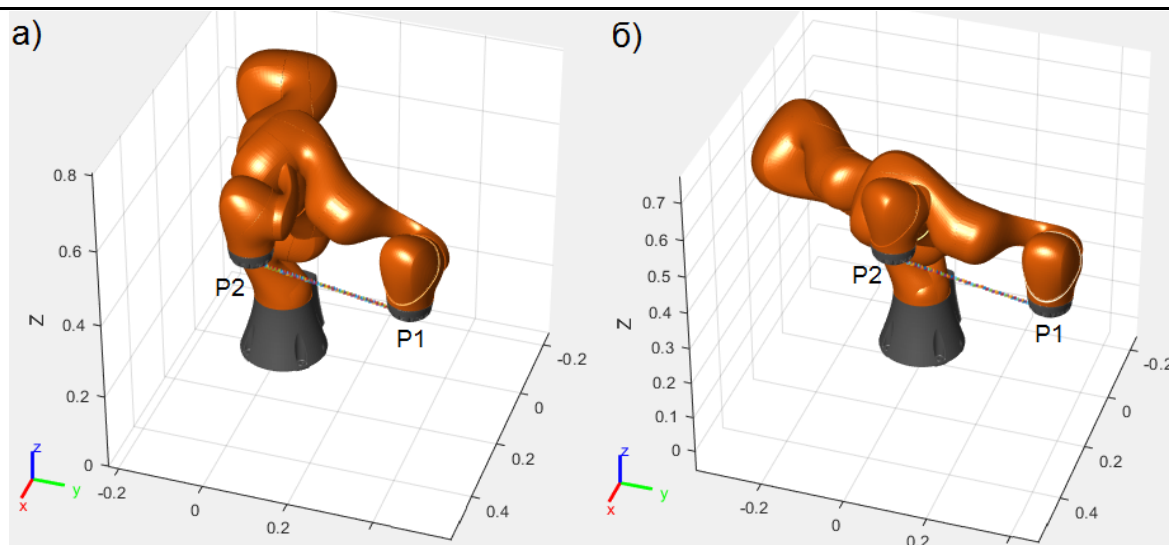


Рис. 3. Конфигурация манипулятора в точках P_1 и P_2 : вариант 1 (а), вариант 2 (б)

С целью учёта влияния мощности, потребляемой инструментом, на общие показатели энергопотребления при выполнении прямолинейного технологического перехода проведены исследования зависимостей (см. рис. 7) при наличии на фланце робота энергозатратного инструмента. В результате получена серия графиков (см. рис. 8), иллюстрирующая суммарные энергетические затраты инструмента и робота при реализации прямолинейного технологического перехода, согласно варианту конфигураций 2.

Таким образом, по графикам (см. рис. 7, 8) можно сделать вывод о том, что при отсутствии потребления электрической энергии оснащающим инструментом ($P_{tool} = 0$ Вт) (к примеру, разметочный карандаш, пневматический захват и т. д.) целесообразно выбирать низкие значения скорости и ускорения при формировании прямолинейного технологического перехода. В том случае, если инструмент также является потребителем электрической энергии, необходимо выбрать оптимальные значения скорости и ускорения по карте энергопотребления (см. рис. 8).

Согласно расчётам и визуализации (см. рис. 6, 7 и 8) в табл. 2 представлены искомые интегральные показатели движения LIN P_1P_2 в двух вариантах.

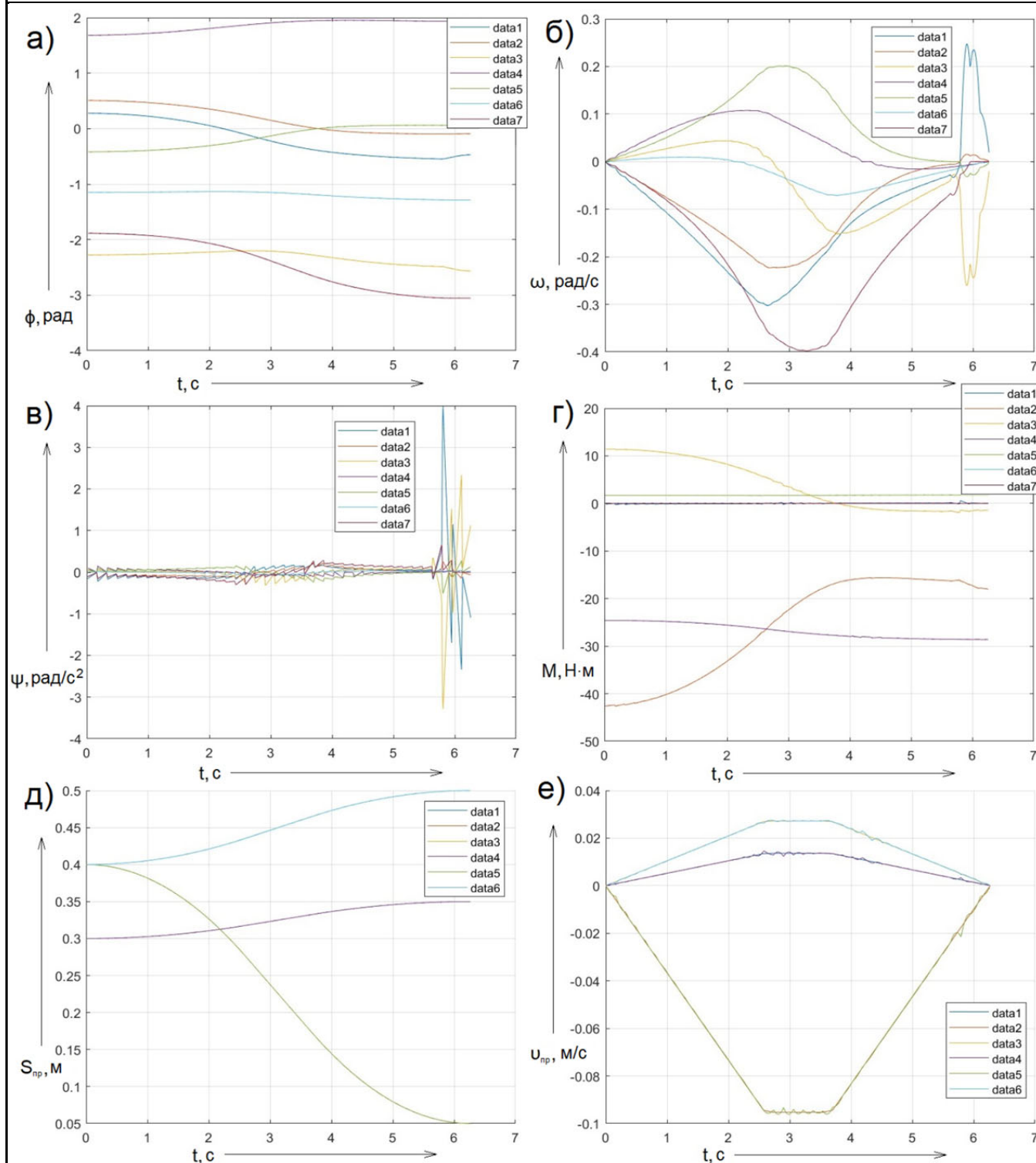


Рис. 4. Графики изменения ключевых переменных при переходе из точки P_1 в P_2 (вариант 1):
а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

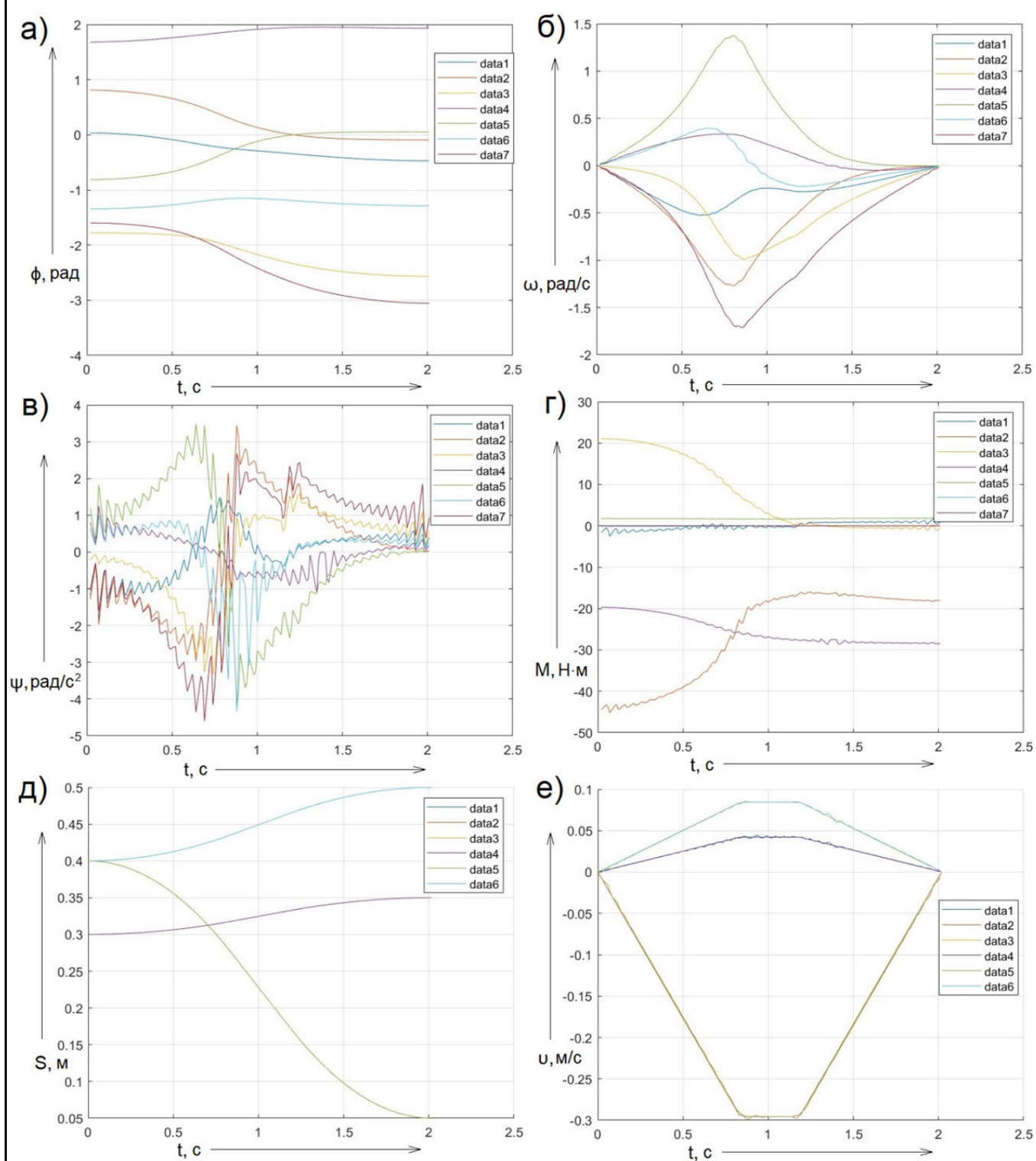


Рис. 5. Графики изменения ключевых переменных при переходе из точки P_1 в P_2 (вариант 2):
а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

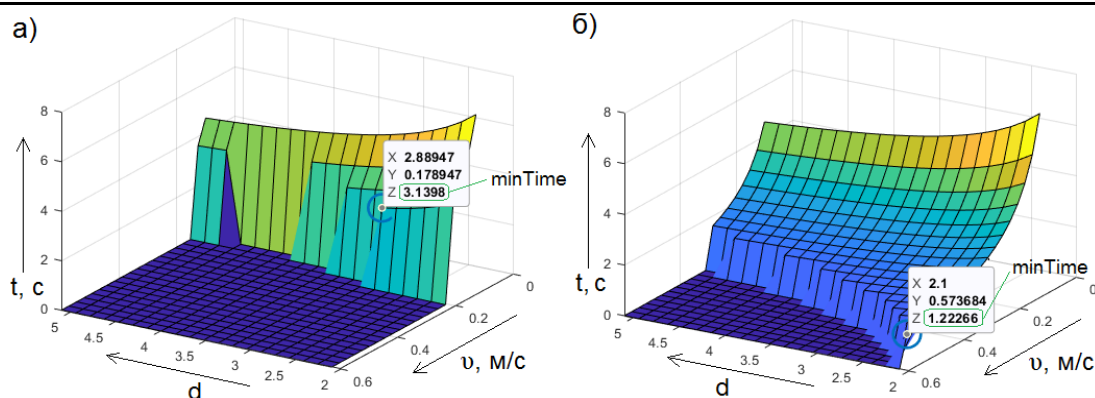


Рис. 6. Трёхмерные графики функций зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ с учётом ограничений:
а – вариант 1; б – вариант 2

Согласно табл. 2 был рассчитан потенциал энергосбережения в разрезе двух вариантов (двух итоговых конфигураций), а также соответствующий диапазон изменения производительности в процентах. Результаты расчётов представлены в табл. 3.

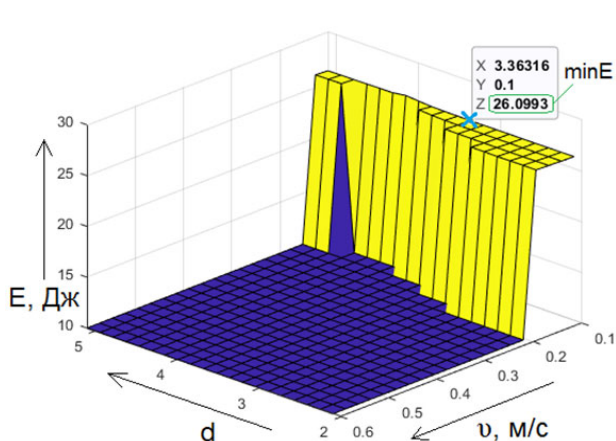


Рис. 7. Трёхмерный график функции зависимости $E(v_{\max}, d)$ с учётом ограничений (вариант 1)

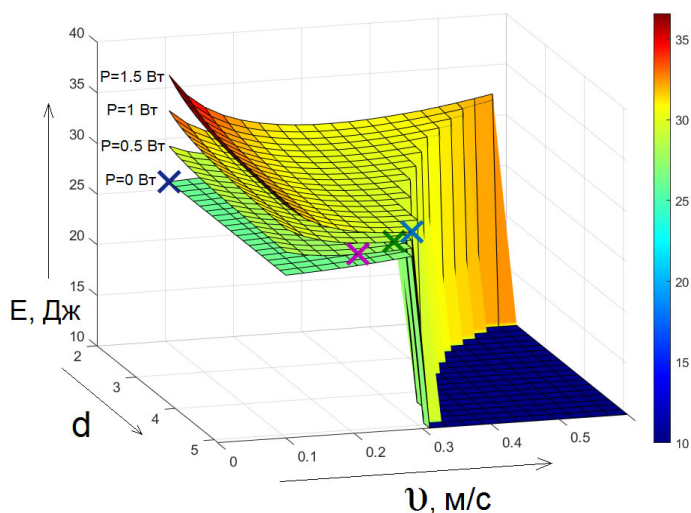


Рис. 8. Трёхмерный график функции зависимости $E(v_{\max}, d)$ при различных значениях мощности (P_{tool}) инструмента (вариант 2)

В табл. 2 и 3 продемонстрирован имеющийся потенциал оптимизации показателей Δt_E и ΔE как в рамках одной конфигурации робота в точках P_1 и P_2 , так и в пространстве всех возможных (в текущем примере двух произвольных) пар конфигураций в точках P_1 и P_2 , ведущих к прямолинейному перемещению ТСП по вектору $\vec{P_1 P_2}$ при различных значениях мощности оснащающего инструмента.

Как следует из полученных результатов, достижение высоких показателей производительности и энергоэффективности возможно за счёт:

1. выбора наиболее подходящих конфигураций манипулятора в точках P_1 и P_2 при проектировании прямолинейного перемещения;
2. выбора оптимальных значений скорости и ускорения для реализации прямолинейного перемещения.

Таблица 2

Интегральные показатели движения LIN P_1P_2

Мощность, потребляемая инструментом, Вт	Наименование величины	Вариант 1		Вариант 2	
		$t_E \rightarrow \min$	$E \rightarrow \min$	$t_e \rightarrow \min$	$E \rightarrow \min$
0	t_E , с	3.1398	5.2288	1.2227	7.0142
0	E , Дж	26.2808	26.0993	30.6588	26.0517
0.5	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	2.2265
0.5	E , Дж	27.8507	27.8507	31.2701	27.6618
1	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	1.7721
1	E , Дж	29.4206	29.4206	31.8814	28.6615
1.5	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	1.6080
1.5	E , Дж	30.9905	30.9905	32.4927	29.4918

Таблица 3

Оценка потенциала энергосбережения для выбранного прямолинейного траекторного перемещения при заданном критерии оптимизации ($E \rightarrow \min$, $t \rightarrow \min$)

Мощность потребляемая инструментом, Вт	Потенциал	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1 (E_{\min}) vs. вариант 2 (E_{\min})
0	Δt_E	66.53 %	82.57 %	25.45 %
0	ΔE	0.695 %	15.03 %	0.18 %
0.5	Δt_E	0 %	45.08 %	41.02 %
0.5	ΔE	0 %	11.54 %	0.68 %
1	Δt_E	0 %	31 %	43.56 %
1	ΔE	0 %	10.1 %	2.58 %
1.5	Δt_E	0 %	23.96 %	48.79 %
1.5	ΔE	0 %	9.24 %	4.84 %

Стоит отметить, что для проведения численного эксперимента были выбраны только 2 возможные конфигурации манипулятора, полученные в результате автоматизированного решения обратной задачи кинематики. Как следствие, дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку алгоритмов выбора конфигураций манипулятора с целью достижения оптимумов по производительности/энергопотреблению.

Заключение. В ходе проведённых исследований был предложен оригинальный подход к оптимизации энергопотребления и затрат времени коллаборативного робота при выполнении прямолинейного технологического перехода с учётом существующих ограничений линейной скорости и линейного ускорения.

Согласно представленному подходу разработан алгоритм расчёта времени выполнения технологической операции при прямолинейном перемещении ТСП, а также сопряжённых с движением затрат механической энергии в зависимости от выбора профиля графика изменения линейной скорости. Выявленные зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ и $E(v_{\max}, d)$ позволили детерминировать задачи максимизации производительности и минимизации энергопотребления в рамках одной пары конфигураций робота при реализации перемещения типа LIN P_1P_2 , а также задачу оптимизации при функционале качества $F(t_E, E) \rightarrow \text{opt}$.

Работоспособность предложенного подхода подтверждена результатами численного эксперимента на имитационной модели коллаборативного робота в программной среде MATLAB. Продемонстрирован имеющийся потенциал энергосбережения и увеличения производительности как в рамках одной пары конфигураций робота, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к технологическим перемещениям типа LIN внутри коллаборативного процесса.



ЛИТЕРАТУРА

1. Gorkavyi, M. A., Ivanov, Y. S., Grabar, D. M., Solovev, D. B. (2023). Hybrid model process design of joint operator-robot interaction within a synergistic system. In: AIP Conference Proceedings, 2910(1), 020150.
2. Лямин, М. А. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 66-73.
3. Gorkavyi, M. A., Gorkavyi, A. I., Egorova V. P., Melnichenko, M. A. (2023). Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process. In: Frontiers in Energy Research, vol 11, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1129311>.
4. Pei Jiang, Zuoxue Wang, Xiaobin Li, Xi Vincent Wang, Bodong Yang, Jiajun Zheng. (2023). Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. In: Journal of Manufacturing System, vol 70, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.009>.
5. Gümbel, P., Xiao He, Dröder, K. (2022). Precision optimized pose and trajectory planning for vertically articulated robot arms. In: Procedia CIRP, vol 106, 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.176>.
6. Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R. (2023). Optimization of energy consumption in industrial robots, a review. In: Cognitive Robotics, vol 3, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.05.003>.
7. Преобразование компоновок механизмов параллельной структуры в процессе реконфигурирования / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Д. А. Буравицын // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 93-98.
8. Грабарь, Д. М. Исследование методов и алгоритмов распознавания образов на изображениях / Д. М. Грабарь, Ю. С. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 20-27.
9. J. Kim, M. Jin, S. H. Park, S. Y. Chung, M. J. Hwang (2020). Task Space Trajectory Planning for Robot Manipulators to Follow 3-D Curved Contours. In: Electronics, vol 9, 1424, <https://doi.org/10.3390/electronics9091424>.
10. Gyawali, P., Bamoriya, S., Dwivedy, S. K. (2018). Joint Space Trajectory Tracking of 5R Manipulator using Open Source Hardware. In: International Conference on Mechanical Engineering (INCOM-2018).
11. Gorkavyi, A. I., Gorkavyi, M. A., Melnichenko, M. A., Kuznetsov, A. A. (2023). Hybrid approach to synthesis of electromechanical block control system of mechatronic module. In: AIP Conference Proceedings 2700, 040010. <https://doi.org/10.1063/5.0124875>.
12. Стельмашук, С. В. Система подчинённого управления электроприводом постоянного тока с последовательным возбуждением / Стельмашук С. В., Черепанов Н. И. // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 35-45.
13. Рабочий элемент мягкого захватного устройства / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, В. А. Карпенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 70-78.
14. Мягкие роботы / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I (49). – С. 83-91.
15. Стельмашук, С. В. Электропривод с компенсацией статического момента / С. В. Стельмашук, К. С. Аминов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (43). – С. 73-80.
16. B. T. Gibson, P. Mhatre, M. C. Borish, C. E. Atkins, J. T. Potter, J. E. Vaughan, L. J. Love, (2023). Controls and process planning strategies for 5-axis laser directed energy deposition of Ti-6Al-4V using an 8-axis industrial robot and rotary motion. In: Additive Manufacturing, vol. 58, 103048. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103048>.
17. D. Popov, A. Pashkevich, A. Klimchik (2023). Adaptive technique for physical human-robot interaction handling using proprioceptive sensors. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 126, part D, 107141. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107141>.
18. Раин, Т. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Т. Раин // Прикладная математика & Физика. – 2023. – Т. 55. – № 1. – С. 70-83.
19. M. Dupac (2023). Mathematical modeling and simulation of the inverse kinematic of a redundant robotic manipulator using azimuthal angles and spherical polar piecewise interpolation, in Mathematics and Computers in Simulation, vol. 209, pp. 282-298. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.02.010>.

20. S. Nahavandi, R. Alizadehsani, D. Nahavandi, Chee Peng Lim, K. Kelly, F. Bello (2024). Machine learning meets advanced robotic manipulation. In: Information Fusion, vol. 105, 2024, 102221. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102221>.
21. T. Sugihara (2011). Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg–Marquardt Method. In: IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, pp. 984-991. <https://doi.org/10.1109/tro.2011.2148230>.
22. Лепехина, С. Ю. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков, Ю. А. Давыдов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 68-75.
23. K. M. Lynch, F. C. Park (2017). Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control. In: Cambridge: Cambridge University Press.
24. F. N. Fritsch, R. E. Carlson (1980). Monotone Piecewise Cubic Interpolation. In: SIAM Journal on Numerical Analysis. vol. 17, pp. 238-246.
25. R. Featherstone (2008). Rigid Body Dynamics Algorithms. In: Springer US, <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7560-7>.
26. M. N. Vu, F. Beck, M. Schwegel, C. Hartl-Nesic, A. Nguyen, A. Kugi (2023). Machine learning-based framework for optimally solving the analytical in-verse kinematics for redundant manipulators. In: Mechatronics, vol. 91, 102970. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.102970>.



Купова А. В., Купов А. В., Соловьев В. А.
A. V. Kupova, A. V. Kupov, V. A. Solovyov

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ЯЗЫКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ

PROGRAM IMPLEMENTATION OF FUZZY COMPENSATING DEVICE REGULATOR IN THE LANGUAGE OF FUNCTIONAL BLOCKS

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

Купов Александр Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора по аддитивным технологиям ООО «ПЕЕК» (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: alek-epapu@mail.ru.

Alexander V. Kupov – Ph.D. in Technology, Deputy Director for Additive Technologies, PEEK LLC (Russia, Saint Petersburg). E-mail: alek-epapu@mail.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Engineering, Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. Показан вариант реализации однокаскадного нечёткого регулятора для стабилизации напряжения в системе электроснабжения с компенсирующим устройством применительно к общепромышленным логическим контроллерам (ПЛК) на языке функциональных блоков по стандарту ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016. Рассмотренный подход позволяет использовать универсальные ПЛК при отладке аппаратных макетов электротехнических систем, содержащих в контуре регулирования однокаскадные нечёткие регуляторы по Мамдани и Сугено.

Summary. The variant of implementation of a single-stage fuzzy regulator for voltage stabilization in the power supply system with a compensating device in relation to general industrial logic controllers (PLC) in the language of functional blocks according to GOST R IEC 61131-3-2016 standard is shown. The considered approach allows using universal PLCs when debugging hardware layouts of electrical systems containing in the control loop single-cascade fuzzy regulators by Mamdani and Sugeno.

Ключевые слова: нечёткая логика, компенсирующее устройство, стабилизация напряжения.

Key word: fuzzy logic, compensating device, voltage stabilization.

УДК 004.896

При проектировании регулятора для системы управления с быстроизменяющимися параметрами объекта бывает невозможно определить оптимальные коэффициенты для адаптивного регулятора, реализующего классические П-, ПИ- или ПИД-законы управления. Может наблюдаться как сильный разброс коэффициентов, исключающий возможность построения аппроксимирующей функции, так и определённая нечувствительность регулятора при некоторых состояниях объекта. В этом случае применение нечёткой логики (НЛ) в системе управления оправдано, т. к. позволяет справиться с перечисленными недостатками классических регуляторов.

Данный вывод подтверждают результаты исследований, выполненных на модели системы электроснабжения дуговой сталеплавильной печи, которая характеризуется как резкопеременная нагрузка [1; 2]. В данном случае нечёткая логика используется в системе управления статическим

тиристорным компенсатором для стабилизации уровня напряжения, что позволяет снизить колебательность измеряемых параметров и уровень статической ошибки, а также уменьшить время реакции системы управления.

Для широкого применения систем с нечёткой логикой требуется распространение аппаратных платформ с поддержкой операций нечёткой логики, таких как фаззификация, нечёткий вывод, дефаззификация и др. Несмотря на относительную простоту математического аппарата операций нечёткой логики [3; 4], далеко не всякий образец вычислительной платформы будет поддерживать полноценную работу с ней. Для этого потребуется как минимум формализация перечисленных операций на языке, понятном для исполнения данной ЭВМ.

Известно, что поддержку аппарата нечёткой логики на уровне промышленных логических контроллеров (ПЛК) предоставляют некоторые производители систем комплексной автоматизации, такие как Allen Bradley, Siemens и некоторые другие. Это не позволяет говорить о широкой доступности аппаратных платформ для реализации систем автоматизированного управления (САУ) с нечёткими регуляторами (НР). В связи с этим на этапе аппаратной отладки алгоритмов нечёткого регулирования приходится находить более доступные аппаратно-программные платформы и ПЛК, способные реализовать математический аппарат классического нечёткого регулятора, перечисленный выше. Одним из таких способов является отображение функций НР на одном из стандартных формальных языков, регламентированном по ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 [5]. Оптимальным был сочтён графический язык FBD как пригодный для визуального отображения проектируемого алгоритма. В полной мере аппарат языка FBD реализован отечественными разработчиками устройств для САУ «OWEN» в среде программирования Owen Logic. Однако, как говорилось выше, встроенная поддержка операций НЛ в среде Owen Logic отсутствует, что вынудило реализовать их вручную из имеющихся блоков математических и логических операций.

На рис. 1 показана структурная схема системы управления компенсирующим устройством для реализации на языке FBD. В соответствии с ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017 [6] в канале регулирования явным образом должен присутствовать интегратор. Остальные блоки соответствуют модели НР, показанной в [1; 2].

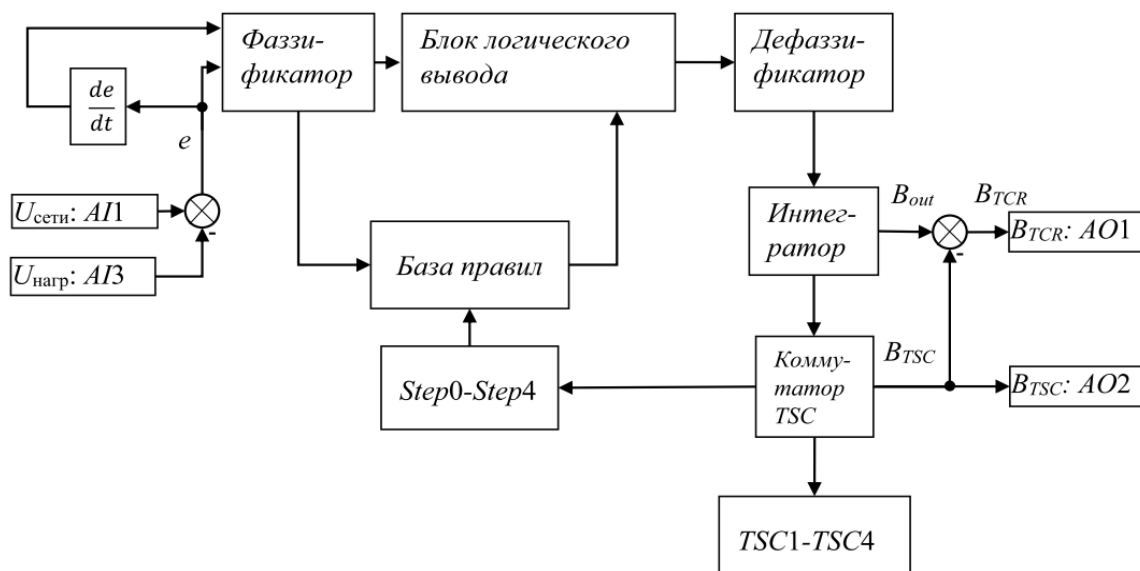


Рис. 1. Структурная схема системы управления компенсирующим устройством

На рис. 2 показаны функции принадлежности (ФП), используемые для фаззификации сигналов ошибки e и производной сигнала ошибки de/dt . В практической реализации входные переменные Step0 – Step4 представляют собой чёткие переменные, показывающие, какие фильтрокомпенсирующие цепи включены в настоящий момент. В НР эти переменные вводятся для исключения колебаний, которые появляются в результате частых переключений компенсирующих цепей.

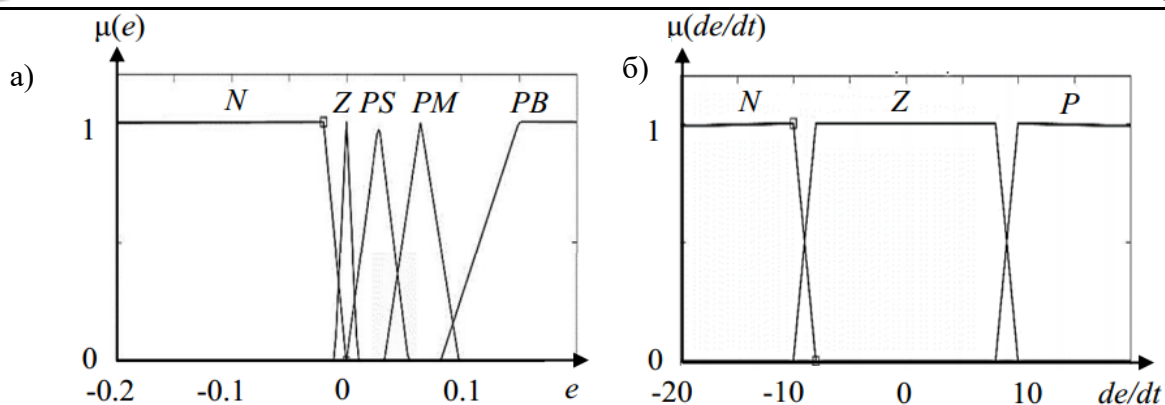


Рис. 2. Функции принадлежности сигналов ошибка e (а) и производная ошибки de/dt (б)

Для описания на языке функциональных блоков треугольные ФП были разделены на отрезки прямых $y(x) = kx$ и преобразованы к виду $Y = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$. Каждый из отрезков представлен отдельной функциональной единицей – макросом. Макрос может включать в себя подмакросы для улучшения восприятия и упрощения отладки программы.

Элементы треугольных ФП, представленные линейными уравнениями, показаны на рис. 3.

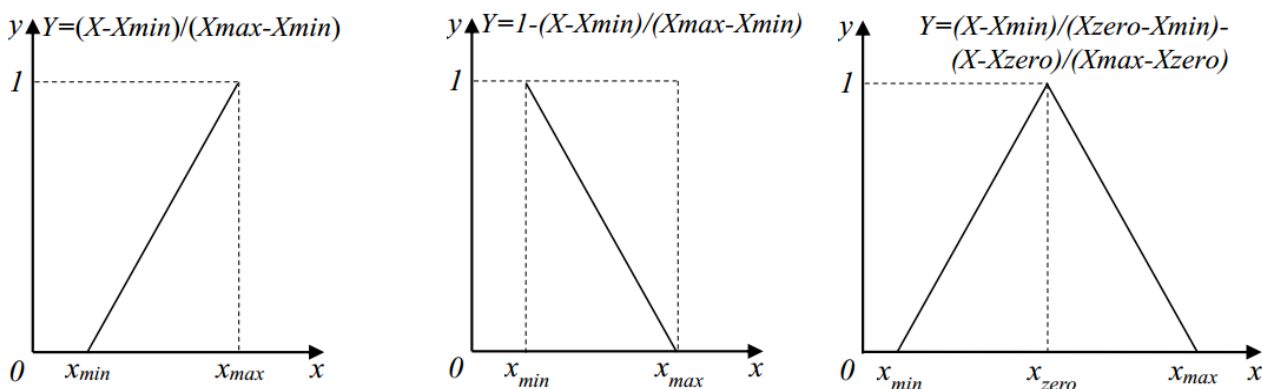


Рис. 3. Отображение уравнений трёхфазных ФП для фаззификации на языке FBD

Если $k > 0$, то уравнение прямой имеет вид

$$Y = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}),$$

где X – текущее значение входной переменной x_{in} ; X_{\min} – левая координата пересечения с осью абсцисс данной треугольной ФП; X_{\max} – координата максимума данной ФП.

Если $k < 0$, то уравнение прямой преобразуется в выражение

$$Y = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}).$$

Следовательно, для оцифровки треугольной ФП можно использовать выражение

$$Y = (X - X_{\min}) / (X_{\text{zero}} - X_{\min}) - (X - X_{\text{zero}}) / (X_{\max} - X_{\text{zero}}),$$

где X_{zero} – координата вершины треугольника ФП.

Пример формирования макроса для треугольной ФП показан на рис. 4. Блоки на приведённой схеме имеют следующие значения:

fSUB – определяет разность входных значений;

fDIV – вычисляет отношение значений на входе;

fGT – сравнивает входные значения. Если входные значения равны, то на выход подаётся логический 0, иначе логическая 1;

fSEL – условная операция сравнения. Если на первом входе логический 1, то на выход передаётся значение второго входа. Иначе на выход поступает значение третьего входа.

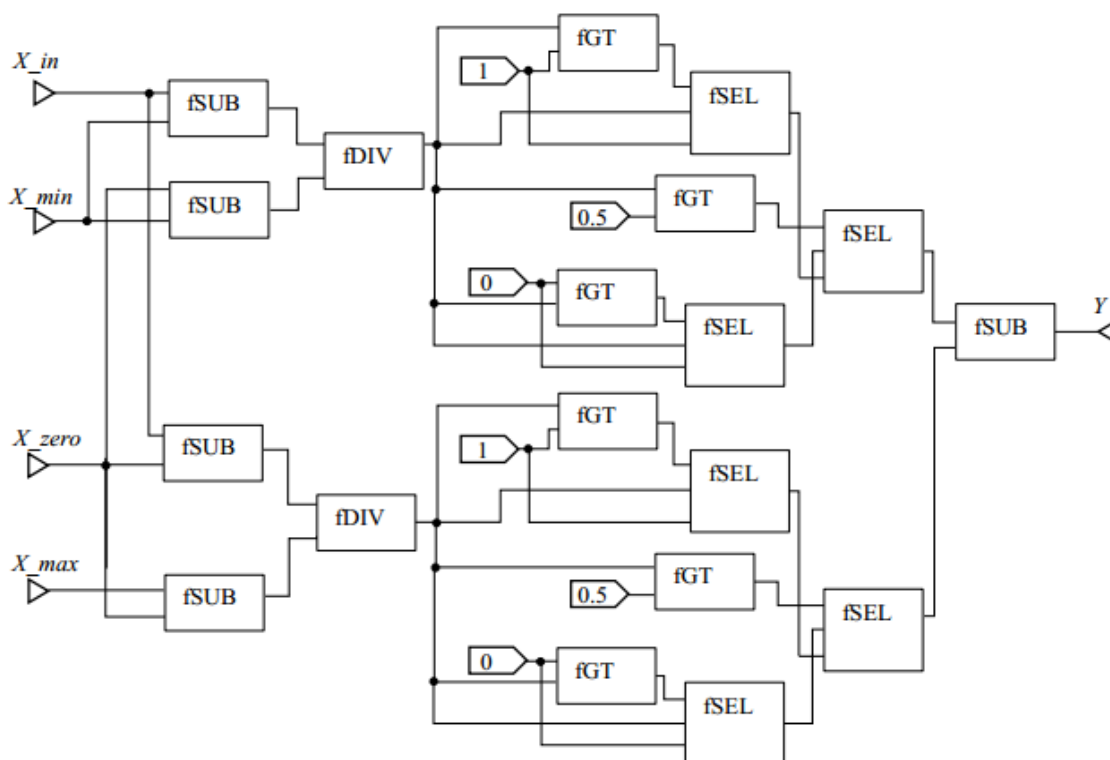


Рис. 4. Макрос для треугольных ФП

Для фаззификации по трапецеидальным ФП следует разделить их на два вида. Первый вид – трапеция, у которой одна из сторон уходит в бесконечность. К таким трапециям относятся ФП N , PB переменной e и ФП N и P переменной de/dt (см. рис. 2). В программе фаззификация выполняется в зависимости от попадания значения в диапазон существования наклонной линии: в пределах существования фаззификация выполняется по наклонной линии; вне пределов – по максимуму, равному 1. На рис. 5, 6 представлены примеры формирования макросов для них.

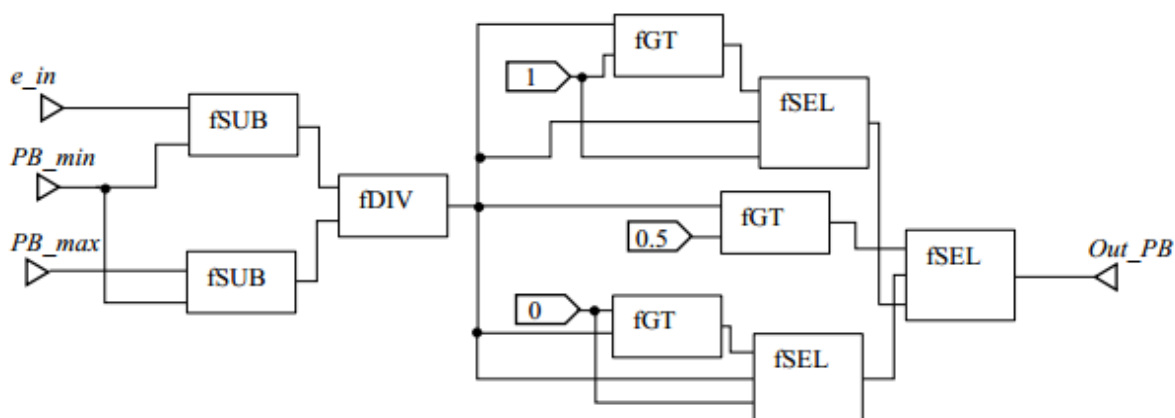


Рис. 5. Макрос, описывающий наклонную линию ФП PB

Второй вид трапеций – это трапеция вида ФП Z переменной de/dt (см. рис. 2). Её описание выполняется из выражений для треугольной ФП путём раздельного описания вершины треугольника двумя разнесёнными точками:

$$Y = (X - X_{min1}) / (X_{min2} - X_{min1}) - (X - X_{max1}) / (X_{max2} - X_{max1}).$$

Макрос, описывающий трапецидальную ФП, подобен показанному на рис. 4, но с использованием ещё одного входа. Таким образом, на первую пару блоков fSUB поступают сигналы X_{in} , X_{min2} , X_{min1} , на вторую пару – X_{in} , X_{max2} , X_{max1} .

Формирование базы правил нечёткого регулятора осуществляется на логических конструкциях вида «Если $TSC \& e \& de/dt$, то B » по табл. 1. B – выходная переменная, функции принадлежности которой показаны на рис. 7.

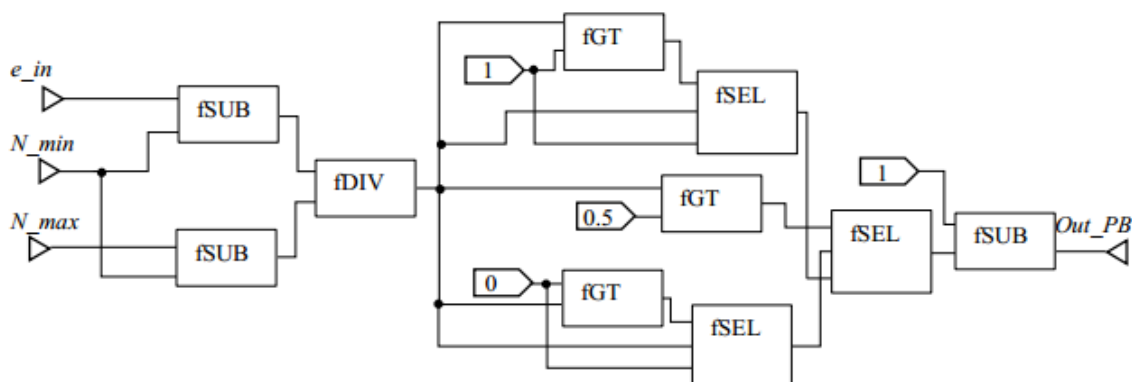


Рис. 6. Макрос, описывающий наклонную линию ФП N

Таблица 1

База правил нечёткого регулятора

de/dt	e	TSC				
		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
Z	N	C0	C0	C0	C0	C0
	Z	C0	C0	C0	C1	C1
	PS	C1	C1	C1	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C4	C4	C4	C4	C4
P	N	C0	C1	C2	C3	C4
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C1	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C2	C3	C4	C4	C4
N	N	C0	C0	C0	C1	C2
	Z	C0	C0	C1	C2	C3
	PS	C0	C0	C1	C2	C3
	PM	C0	C1	C2	C3	C4
	PB	C0	C1	C2	C3	C4

Процедура дефаззификации для вывода чёткого значения выходной величины B_{out} может быть реализована, в частности, по методу центра тяжести:

$$B_{out} = \frac{\int xz(x)dx}{\int z(x)dx}. \quad (1)$$

В данном случае в состав дефаззификатора будут входить одностипные макросы для описания числителя и знаменателя центроида как площади трапеции, показанной на рис. 8.

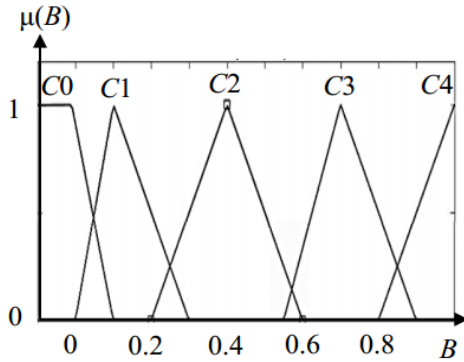


Рис. 7. Функции принадлежности выходной переменной B

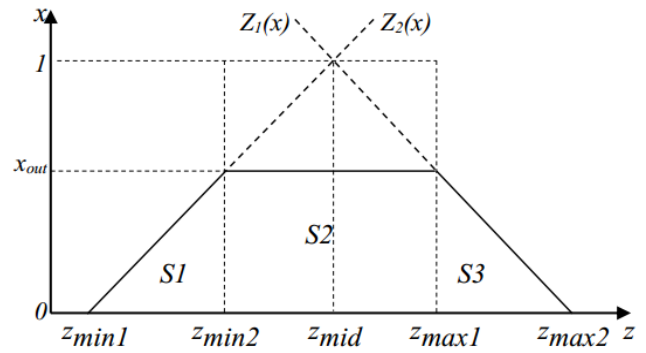


Рис. 8. Графическое представление формирования $z(x)$

Уравнения прямых:

$$Z_1(x) = x(Z_{mid} - Z_{min1}) + Z_{min1},$$

$$Z_2(x) = x(Z_{mid} - Z_{max2}) + Z_{max2}.$$

Координаты $Z_{min2}(x)$ и $Z_{max1}(x)$ определяются при $x = x_{out}$:

$$Z_{min2}(x) = Z_1(x_{out}),$$

$$Z_{max1}(x) = Z_2(x_{out}).$$

Площади результирующих многоугольников рассчитываются по выражениям

$$S_1 = \frac{x_{out}}{2} (Z_{min2}(x) - Z_{min1}) = \frac{x_{out}}{2} [x_{out} (Z_{mid} - Z_{min1}) + Z_{min1} - Z_{min1}] = \frac{x_{out}^2}{2} (Z_{mid} - Z_{min1});$$

$$S_2 = x_{out} (Z_{max1}(x) - Z_{min2}(x)) = x_{out} [(x_{out} (Z_{mid} - Z_{max2}) + Z_{max2}) - (x_{out} (Z_{mid} - Z_{min1}) + Z_{min1})];$$

$$S_3 = \frac{x_{out}}{2} (Z_{max2} - Z_{max1}(x)) = \frac{x_{out}}{2} [Z_{max2} - x_{out} (Z_{mid} - Z_{max2}) - Z_{max2}] = \frac{x_{out}^2}{2} (Z_{max2} - Z_{mid}).$$

Для представления на языке функциональных блоков интегрирование в выражении (1) может быть заменено суммой. На рис. 9 показан макрос, вычисляющий чёткое значение B_{out} .

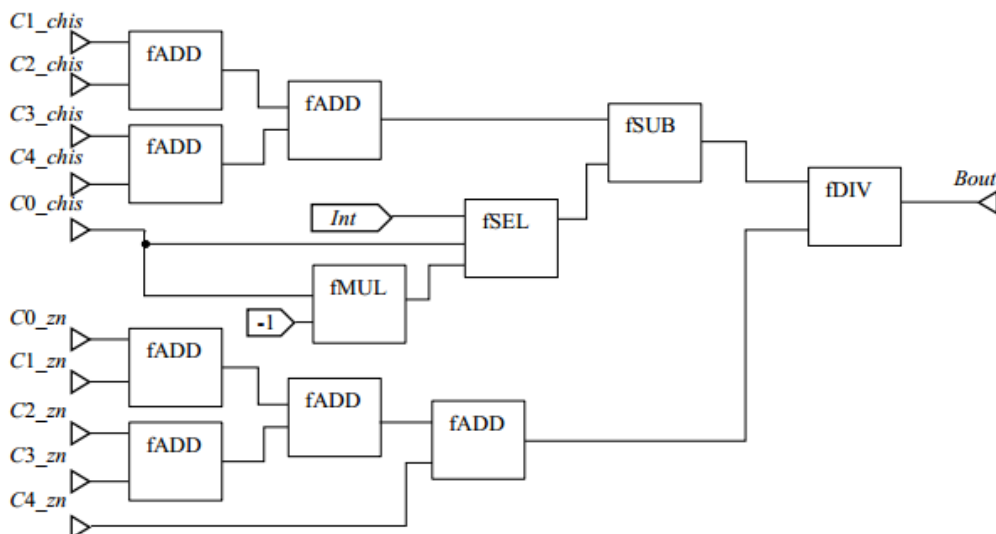


Рис. 9. Макрос, реализующий вычисление B_{out}

На рис. 9 приводятся функции суммирования значений входных сигналов $fADD$ и перемножения $fMUL$. Переменная Int используется для исключения неопределённости, возникающей при вычислениях $Bout$ в районе нулевых значений. Определение сигналов $C0_chis - C0_chis$, $C0_zn - C4_zn$ выполняется в макросе, описание которого показано на рис. 10. Входные сигналы в макрос задаются по функциям принадлежности выходной переменной B и сигнала x_out , полученного по базе правил HP .

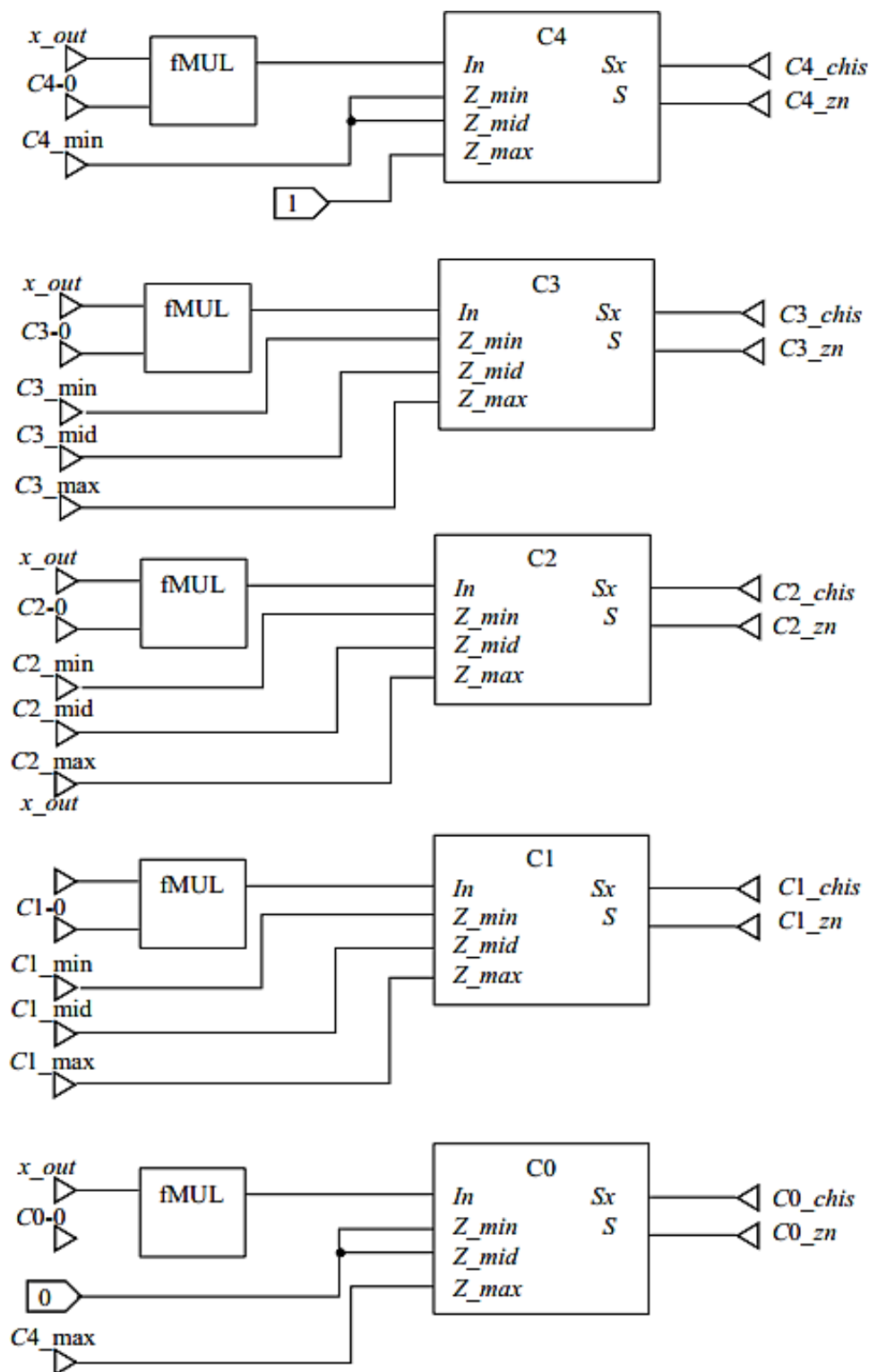


Рис. 10. Формирование сигналов $C0_chis - C0_chis$, $C0_zn - C4_zn$

На рис. 10 блоки C0 – C4 содержат подмакросы, определяющие значения $xz(x)$ и $z(x)$ для вычисления выходного сигнала по формуле (1). Их реализация показана на рис. 11.

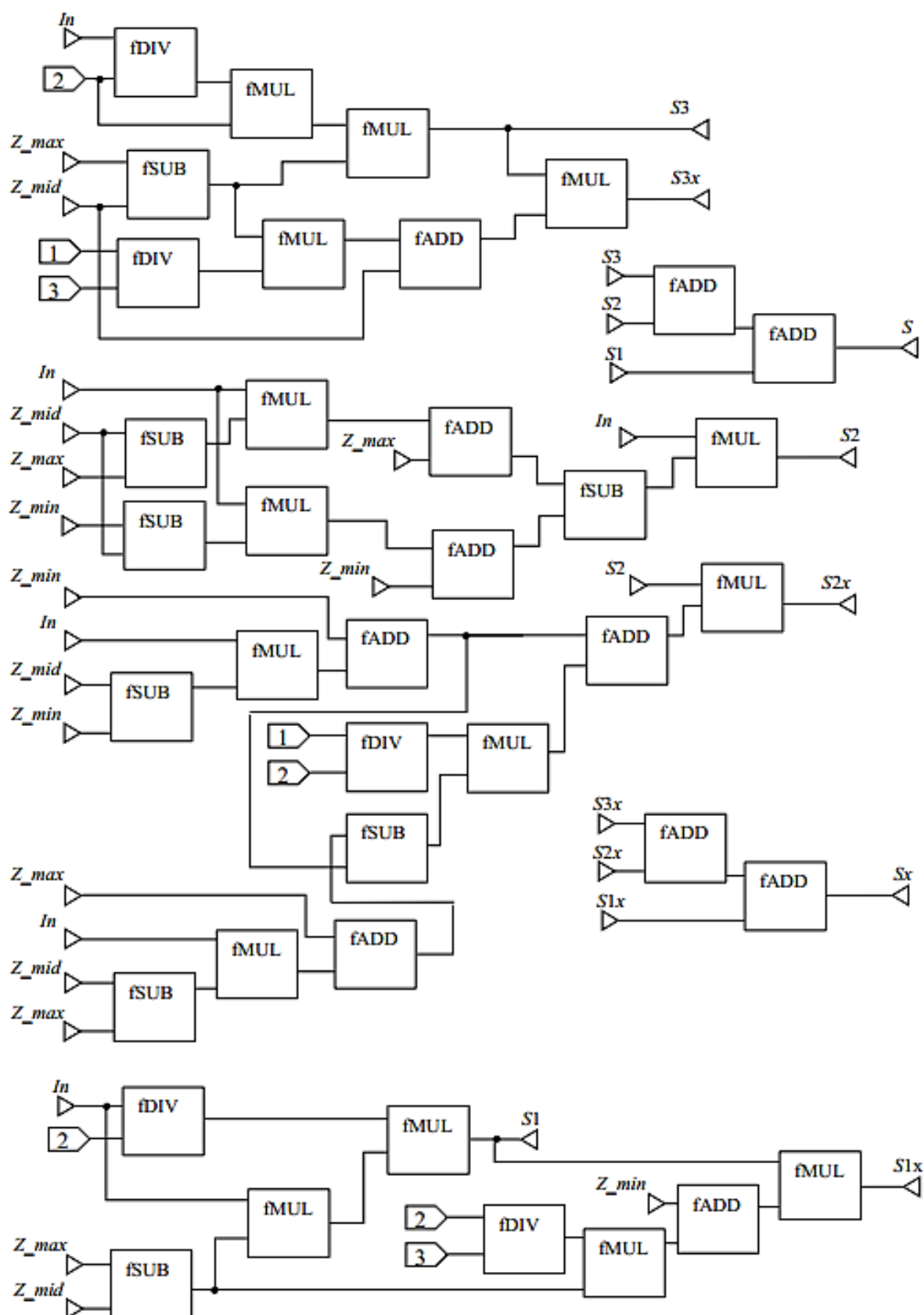


Рис. 11. Формирование значений $xz(x)$ и $z(x)$

Очевидно, что центростид площади, определённый рассматриваемой программой, не обеспечивает максимальное значение сигнала $B = 1$. При отладке было достигнуто максимальное значение $B = 0.933$. Поэтому было установлено единичное значение предела интегрирования $B_{out-I} = 1$, что обеспечило корректную работу коммутатора компенсатора TSC . Также в процессе отладки проявилась необходимость в коррекции определения выходного сигнала в районе нулевых значений и определения дополнительной переменной Int .

При выполнении натурных экспериментов на макете с программируемым реле ПР200 фирмы «OWEN» выявлено время выполнения одного цикла программного регулирования – менее 10 мс. Это обеспечивает регулируемость стационарных электромагнитных процессов в сетях промышленной частоты 50 Гц. В то же время было выявлено, что дискретизация аналоговых входов ПР 200 добавляет задержку в обработке сигналов порядка 33 мс. Однако практическая реализация нечёткого регулятора показала принципиальную возможность использования неспециализированных платформ для нечёткого управления компенсирующими устройствами с переменной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерюжкова, Н. Е. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова, В. А. Соловьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
2. Стабилизация напряжения статическим тиристорным компенсатором с нечётким регулятором в системе с переменной нагрузкой / А. В. Купова, В. А. Соловьев, А. В. Светлаков, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 48-57.
3. Демидова, Г. Л. Регуляторы на основе нечёткой логики в системах управления техническими объектами / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
4. Нечёткое моделирование и управление в технических системах: учеб. пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашенко, И. Ю. Кудинов, А. Ф. Пашенко. – СПб.: Лань, 2020. – 208 с.
5. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016. Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования = Programmable controllers. Part 3. Programming languages: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 мая 2016 г. № 313-ст: введён впервые: дата введения 2017-04-01 / подготовлен Негосударственным образовательным частным учреждением «Новая Инженерная Школа» (НОЧУ «НИШ»). – М.: Стандартинформ, 2016. – 227 с.
6. ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017. Контроллеры программируемые. Часть 7. Программирование нечёткого управления = Programmable controllers. Part 7. Fuzzy control programming: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 сентября 2017 г. № 1127-ст: введён впервые: дата введения 2018-09-01 / подготовлен Негосударственным образовательным частным учреждением «Новая Инженерная Школа» (НОЧУ «НИШ»). – М.: Стандартинформ, 2017. – 48 с.

Гренкин Г. В., Карпов В. В.
G. V. Grenkin, V. V. Karpov

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УПРОЩЁННОЙ INDOOR-НАВИГАЦИИ

COMPLEX METHOD OF SIMPLIFIED INDOOR NAVIGATION

Гренкин Глеб Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования Владивостокского государственного университета (Россия, Владивосток). E-mail: Gleb.Grenkin@vvsu.ru.

Gleb V. Grenkin – PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Mathematics and Modeling Department, Vladivostok State University (Russia, Vladivostok). E-mail: Gleb.Grenkin@vvsu.ru.

Карпов Вячеслав Васильевич – студент Владивостокского государственного университета (Россия, Владивосток). E-mail: dev.karpov0@gmail.com.

Vyacheslav V. Karpov – Student, Vladivostok State University (Russia, Vladivostok). E-mail: dev.karpov0@gmail.com.

Аннотация. Рассмотрена задача создания web-приложения для ориентировки внутри зданий. При этом предполагается, что все ключевые пункты здания можно идентифицировать по названию либо номеру. Целью работы является построение программного инструмента, строящего оптимальный маршрут между двумя заданными пунктами. План здания задаётся в упрощённом формате, содержащем графовую модель здания и не требующем ввода точной геометрической модели здания. Преимуществом такого подхода является простота ввода плана. Предлагаемый комплексный метод состоит в выводе маршрута в виде текста, сопровождаемого путевыми карточками и путевыми схемами. Выводимой информации оказывается достаточно для ориентировки внутри здания.

Summary. The paper concerns the problem of creating a web application for orientation inside buildings. It is assumed that all the key points of the building can be identified by name or number. The purpose is to construct software that finds an optimal route between two specified points. The building plan is represented in a simplified format with a graph-based model of the building. The advantage of this approach is simplicity of entering a plan. The proposed complex method consists in displaying the route in the form of text, accompanied by route cards and route schemes. The output information is sufficient to orientate inside the building, despite the fact that the exact geometric model of the building is not used.

Ключевые слова: indoor-навигация, ориентировка внутри зданий, web-приложение, кратчайший маршрут.

Key words: indoor navigation, orientation inside buildings, web application, shortest route.

УДК 004.42

Введение. Несмотря на широкую распространённость навигационных web-приложений, проблема indoor-навигации остаётся не вполне решённой. Большинство существующих сервисов основывается на открытой технологии OpenStreetMap [1; 2], которая ориентирована главным образом на геометрически точную пространственную модель. Однако упомянутая технология, несмотря на свою распространённость и наличие визуальных редакторов, всё же затрудняет ввод indoor-карт. Кроме того, автоматическое построение маршрута внутри зданий по данным OpenStreetMap представляет нетривиальную задачу, если учесть, что общепринятых соглашений по вводу indoor-информации в этом формате пока не предусмотрено. Чтобы решить эту проблему, авторы [3] предложили использовать этот формат для представления упрощённого плана здания. В работе [4] решалась аналогичная задача для совместного ввода планов.

В работах [5–9] рассматривалась задача indoor-навигации применительно к университетским городкам. Как правило, авторы стремятся представить как можно больше информации визуально. Тем не менее избыточность визуальных схем не всегда удобна. В действительности пеше-

ходу нужна только самая необходимая информация, чтобы, введя ориентир в том месте, где он находится, он мог сориентироваться, в каком направлении идти дальше.

Проблемой, которая существует в известных программных обеспечениях, является необходимость ввода большого количества информации. Для решения этой проблемы предлагается использовать вместо геометрически точной модели здания упрощённую модель. Эта информация может либо сопровождать план в формате OpenStreetMap, либо вводиться отдельно в другом формате. Таким образом, была поставлена задача разработки формата для ввода минимальной информации о плане здания.

Требования к программной системе включают простоту ввода плана любого здания, универсальность формата и достаточность выводимой информации для ориентировки в здании. В работе авторов [10] представлен программный инструмент, дающий возможность пользователю сориентироваться по текстовому выводу. В настоящей работе используется комплексный подход для построения диалога с пользователем, в котором текст маршрута дополняется путевыми карточками и путевыми схемами. Предлагаемое решение достаточно универсально, поскольку в упрощённом формате можно ввести план широкого класса зданий.

Упрощённая модель здания. Представим информацию о расположении основных элементов здания, подходящих для ориентировки, в виде графовой модели. Модель включает в себя сущности трёх типов: пункты, пути и стыки. При этом выделяется четыре возможных направления перемещения.

Пункт – это любой объект, представляющий интерес для ориентировки. Путь – это последовательность пунктов, ориентированная в одном из четырёх направлений. Стык – это место соединения путей.

Выделяются следующие типы пунктов: обычные и концевые. Концевым пунктом может быть выход, лестница, лифт или тупик.

Схема здания представляется отдельно для каждого этажа в виде дерева путей. Корневой путь начинается с концевого пункта и заканчивается стыком. В стыке от него отходят дочерние пути, причём для каждого дочернего пути задаётся направление, в котором он ориентирован относительно корневого пути. Далее от стыков, которыми заканчиваются дочерние пути, отходят новые пути и т. д.

Таким образом, дерево путей моделирует обход здания пешеходом. Поэтому, не имея в распоряжении поэтажного плана здания, можно заполнить такую структуру, просто перемещаясь по зданию и записывая направления перемещения и объекты вдоль каждого пути, обозначая стыки.

Формат представления плана. Для представления схемы здания в виде дерева путей используется формат XML. Внутри корневого тега <Plan> могут находиться вложенные теги <Floor>, обозначающие этажи, и теги <Point>, <Stairs>, <Elevator> или <Exit>, обозначающие концевые пункты соответствующего типа.

Внутри каждого тега <Floor> вводится дерево путей соответствующего этажа. Каждый путь задаётся тегом <Path> с атрибутами:

- *start* – этот атрибут присутствует только у корневых путей и обозначает концевой пункт, с которого начинается путь;
- *dir* – этот атрибут присутствует только у корневых путей и обозначает направление ориентации пути относительно глобальной системы координат;
- *rotate* – направление ориентации пути относительно родительского пути (forward, left или right);
- *scheme_text_forward*, *scheme_photo_forward* – текст на путевой схеме и изображение путевой схемы при перемещении вперёд;
- *scheme_text_backward*, *scheme_photo_backward* – текст на путевой схеме и изображение путевой схемы при перемещении назад.

В тег <Path> вложены теги <Point> с атрибутами:

- *id* – идентификатор пункта;
- *name* – название пункта;

- *to* – название пункта в родительном падеже;
- *wall* – по какую сторону находится пункт (*left* или *right*).

Перечисление пунктов пути заканчивается стыком, обозначаемым тегом `<Joint>` с атрибутами:

- *to* – название стыка в родительном падеже;
- *text_forward*, *text_backward*, *text_left*, *text_right* – текст путевой карточки в зависимости от направления перемещения;
- *photo_forward*, *photo_backward*, *photo_left*, *photo_right* – фотографии пункта в зависимости от направления.

После тега `<Joint>` идут дочерние пути, обозначаемые вложенными тегами `<Path>`.

Специальные пункты – лестницы `<Stairs>` и лифты `<Elevator>`. Идентификатор каждой лестницы или лифта должен совпадать на разных этажах.

На рис. 1 представлен фрагмент файла с планом, который легко вводится по поэтажным планам здания. Рисунок иллюстрирует, как выглядит формат представления плана здания.

```
<Joint to="экрана" name="Экран" fav="1" />
<Path rotate="left">
  <Joint to="студотрядов" />
  <Path rotate="forward">
    <Joint to="развилки" />
    <Path rotate="right">
      <Stairs id="stairs10" to="лестницы" />
    </Path>
    <Path rotate="right">
      <Room wall="left" id="1306" />
      <Room wall="left" id="1308" />
      <Joint to="перехода в 4 корпус" />
      <Path rotate="forward">
```

Рис. 1. Фрагмент файла с планом здания

Представление оптимального маршрута. После ввода идентификаторов начального и конечного пунктов скрипт вычисляет кратчайший путь между ними. Затем выводится текстовое описание маршрута с указанием направлений поворота, включающее дополнительные элементы:

1. *Подробная инструкция* – к тексту «Поверните направо и пройдите до конца коридора» добавляется список пунктов, мимо которых нужно пройти, который будет отображён при нажатии на кнопку с троеточием.

2. *Путевая карточка* привязана к стыку и показывает фотографию ключевого пункта с дополнительным текстом, который заменяет стандартный текст, сгенерированный алгоритмом.

3. *Путевая схема* привязана к пути и показывает фрагмент схемы здания либо любое другое изображение, сопровождаемое дополнительным уточняющим текстом.

Алгоритм генерации текста состоит в обходе построенного маршрута и выводе перечисленных элементов.

Пример вывода представлен на рис. 2.

Заключение. На основе описанной технологии упрощённой indoor-навигации разработана бета-версия web-приложения [11]. Практическая значимость состоит в возможности ввода в приложение плана широкого класса зданий, при этом задействуется только информация, содержащаяся в планах эвакуации. Благодаря комплексному выводу инструмент предоставляет достаточное количество информации для ориентировки в здании без необходимости ввода геометрически точной модели.

Начните движение с
Андеграунда.

Пройдите в сторону выхода.



Выйдите в тамбур.



Поверните налево и
пройдите до кофейни и
турникета.

Пройдите прямо до Ямы и
экрана.

Поверните направо и
пройдите до 1313.

мимо: 1311

Пройдите прямо до 1334.

мимо: 1315, 1317, 1314, 1316,
1319, 1318, 1320, 1322, 1324, 1321,
1326, 1323, 1328, 1325, 1330, 1327,
1332, 1331, 1329

Пройдите прямо до большой
лестницы.

Поднимитесь по лестнице с 3
этажа до 4 этажа.

Поверните налево и
пройдите прямо до 1443.

Вы на месте!

Рис. 2. Вывод оптимального маршрута

Отметим дальнейшие перспективы использования и развития технологии. Во-первых, текстовый формат навигации удобен своей компактностью, поэтому может быть востребован у людей с ограниченными возможностями [12].

Во-вторых, в дальнейшем на основе этой технологии может быть создан web-сервис для совместного наполнения планов. Для этого потребуется создание редактора XML-формата. Это может быть реализовано в виде редактирования непосредственно XML-файла с отрисовкой схемы и подсветкой на этой схеме выбранного пункта, пути или стыка.

В-третьих, возможна интеграция разработанной технологии с форматом OpenStreetMap. Для этого необходимо дополнить схему в этом формате маркерами, которые позволят автоматически извлечь описанную графовую структуру данных из этого плана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goetz M., Zipf A. Extending OpenStreetMap to indoor environments: bringing volunteered geographic information to the next level // Urban and Regional Data Management: UDMS Annual. – 2011. – V. 2011. – P. 47-58.
2. Wang Z., Niu L. A data model for using OpenStreetMap to integrate indoor and outdoor route planning // Sensors. – 2018. – V. 18. – № 7. – P. 2100.
3. Dumedah G. et al. A new spatial database framework for pedestrian indoor navigation based on the OpenStreetMap tag information // Transactions in GIS. – 2022. – Vol. 26, № 7. – P. 3090-3108.
4. Zhan Z., Huang H., Winter S., Van de Weghe N. Cognitive mapping of indoor environments: constructing an indoor navigation network from crowdsourced indoor route descriptions // Cartography and Geographic Information Science. – 2024. – Vol. 51, № 3. – P. 385-403.
5. Гмарь, Д. В. Навигация внутри зданий с использованием беспроводной сети (на примере кампуса ВГУЭС) / Д. В. Гмарь, К. И. Кротенок // Информационные технологии XXI века: материалы международ-

ной научной конференции, Хабаровск, 20-24 мая 2013 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2013. – С. 158-163.

6. Алути́н, Е. А. Система поиска и построения маршрутов внутри помещения с помощью путевых карточек / Е. А. Алути́н, С. В. Кривошеев // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2020): сборник научных трудов III Междунар. науч.-практ. конф. (студенческая секция). – Донецк, 2020. – С. 155-161.

7. Колышкина, Н. С. Анализ решения вопросов indoor-навигации / Н. С. Колышкина, Н. А. Борсук // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 2 (36). – С. 98-103.

8. Дусакаева, С. Т. Мобильное приложение для поиска оптимального маршрута в университетском городке / С. Т. Дусакаева, В. В. Савинов // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 13. – № 3 (49). – С. 455-464.

9. Ludwig B. et al. Urwalking: Indoor navigation for research and daily use // KI-Künstliche Intelligenz. – 2023. – Vol. 37. – № 1. – P. 83-90.

10. Гренкин, Г. В. Ориентировка внутри зданий по упрощённому плану / Г. В. Гренкин, В. В. Карпов, А. Е. Чусова // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2024): материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 апреля 2024 г. – Минск: БГУ, 2024. – С. 160-163.

11. Indoor-навигатор // GitHub: сайт. – URL: <https://github.com/lapkin25/Nav-any> (дата обращения: 21.07.2024). – Текст: электронный.

12. Fernando N., McMeekin D. A., Murray I. Route planning methods in indoor navigation tools for vision impaired persons: a systematic review // Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. – 2023. – Vol. 18. – № 6. – P. 763-782.



Краснов И. М., Григорьева А. Л.
I. M. Krasnov, A. L. Grigorieva

**К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧАСТИЧНО-ПОРИСТОГО КОНУСНОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА**

**ON THE PROBLEM OF DETERMINING THE STATIONARY CHARACTERISTICS
OF A PARTIALLY POROUS CONICAL GAS-STATIC BEARING**

Краснов Игорь Михайлович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Krasnov_im@mail.ru.

Igor M. Krasnov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Krasnov_im@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

Anna L. Grigorieva – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена задача математического моделирования, используемая для определения характеристик конусных частично-пористых газостатических подшипников, имеющих стационарный характер. На основе решения совокупной системы уравнений математической модели получено модифицированное уравнение Рейнольдса для определения поля давления в зазоре рассматриваемой конусной опоры.

Summary. The paper considers the problem of mathematical modeling used to determine the characteristics of cone partially-porous gas-static bearings having a stationary character. Based on the solution of the total system of equations of the mathematical model, a modified Reynolds equation is obtained for determining the pressure field in the gap of the cone bearing under consideration.

Ключевые слова: математическая модель, давление газа, математический алгоритм, подшипники, газостатические подшипники, конусные подшипники.

Key words: mathematical model, gas pressure, mathematical algorithm, calculation model, bearings, gas-static bearings, cone bearings.

УДК 621.822.174

Введение. Бурный рост промышленности, связанный с активной цифровизацией в сфере высоких технологий, определяет, в частности, потребность в более скоростной работе многих устройств: станочного оборудования, газотурбинных установок, детандеров и т. д. В связи с этим возникает потребность в совершенствовании процесса функционирования отдельных узлов оборудования. Одним из таких важных элементов машин и механизмов является подшипниковый узел, надёжная и эффективная работа которого во многом определяет параметрическую надёжность оборудования в целом.

В промышленных конструкциях (в зависимости от области применения) используются различные типы подшипников, которые классифицируют на опоры качения и скольжения. Остановимся на рассмотрении опор скольжения, поскольку в основном они позволяют роторам устройств достигать высоких скоростей вращения. Подшипник скольжения – это опора или направляющая машины и механизма, в которой трение происходит при скольжении сопряжённых поверхностей. К подшипникам скольжения относят: газостатические и газодинамические опоры, гидростатические и гидродинамические подшипники, а также магнитные и газоманитные опоры.

Радиальный подшипник скольжения размещается в корпусе, в который устанавливается рабочий элемент – вкладыш подшипника или втулка из антифрикционного материала. Зазор, который имеется между валом и вкладышем, заполняется специальным смазочным материалом. Смазочный материал даёт валу возможность свободно вращаться. Для определения величины зазора подшипника, работающего в режиме разделения поверхностей трения смазочным слоем, используются формулы из гидродинамической теории смазки. Основной задачей при определении стационарных характеристик подшипников скольжения становится определение поля давления смазки в зазоре опоры [1]. Информация о распределении давления позволяет без труда определить несущую способность подшипника, жёсткость смазочного слоя, расход смазочного материала и момент от перекоса оси вала.

Трение скольжения, возникающее при эксплуатации подшипника, может быть сухим, граничным, жидкостным и газодинамическим. Малое значение трения обеспечивается наличием смазки, это является одним из основных условий надёжной работы подшипника. С помощью смазки происходит функционирование различных частей подшипника, а также теплоотвод, защита от вредного воздействия окружающей среды и т. д. [2].

Выделяют различные виды смазки, которые определяются её состоянием:

- жидкая (минеральные и синтетические масла, вода для неметаллических подшипников);
- пластичная (на основе литиевого мыла и сульфоната кальция и др.);
- твёрдая (графит, дисульфид молибдена и др.);
- газообразная (воздух, различные инертные газы, азот и др.).

Также подшипники скольжения разделяют на контактные и бесконтактные. В табл. 1 показаны преимущества и недостатки контактных и бесконтактных опор [7–8].

Таблица 1

Сравнительные характеристики подшипников различного типа

Тип подшипника	Плюсы	Минусы
Контактные	Высокая грузоподъёмность	Высокий уровень трения и износа
	Надёжное удержание смазки	Более высокий уровень вибрации и шума
	Хорошая устойчивость к ударным нагрузкам	Требуется регулярное техническое обслуживание
		Более сложная конструкция
Бесконтактные	Низкий уровень трения	Ограниченная грузоподъёмность
	Более длительный срок службы	Менее надёжное удержание смазки (гидростатические)
	Низкий уровень вибрации и шума	Чувствительность к загрязнениям
	Обеспечивается высокая скорость вращения вала	Могут требовать более тщательной установки
	Простота конструкции	Меньшая устойчивость к ударным нагрузкам

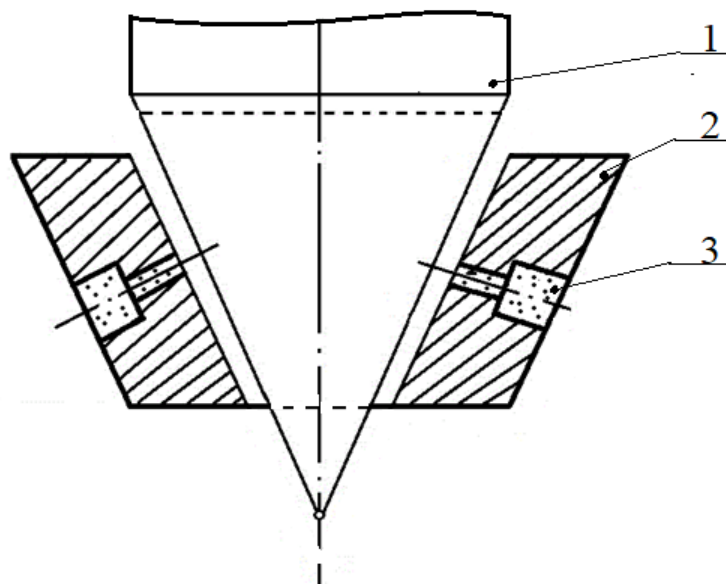
Из представленных в табл. 1 данных видно, что бесконтактные подшипники обладают рядом уникальных характеристик, которые делают их незаменимыми при определённых условиях эксплуатации. Особенно это касается областей промышленности, где минимизация трения и вибраций имеет критическое значение. Одним из часто используемых в промышленности видов бесконтактных подшипников являются газостатические опоры, которые используют внешнее нагнетание газа в зазор для создания своей несущей способности (грузоподъёмности).

Газостатические подшипники, в отличие от контактных, обеспечивают почти идеальные условия для высокоскоростных и высокоточных приложений. Их применение особенно важно там, где даже малейшие вибрации или тепловыделения могут негативно сказаться на работе оборудования [2].

Газостатические подшипники в зависимости от воспринимаемой нагрузки делятся на цилиндрические, упорные, конические и сферические.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете выполнен широкий круг теоретических и экспериментальных исследований частично-пористых цилиндрических газостатических подшипников [3–5]. Комплекс экспериментов показал неоспоримые преимущества частично-пористых опор по сравнению с другими видами газовых подшипников, имеющими иной тип ограничителей расхода газа. Преимущества частично-пористых опор чётко проявляются при высокой частоте вращения ротора [6].

Характеристики конических газостатических подшипников с частично-пористой поверхностью вкладыша (см. рис. 1), в отличие от цилиндрических, к настоящему времени остаются практически не исследованы. Между тем внедрение в конструкцию высокоскоростных устройств конусных опор позволяет существенно упростить конструкцию подшипниковых узлов машин и механизмов, используемых в автомобильной и железнодорожной промышленности, в сельскохозяйственной технике, строительной, аэрокосмической и горнодобывающей промышленности, а также в полупроводниковой и текстильной промышленности [7–12].



1 – вал; 2 – вкладыш; 3 – пористая вставка

Рис. 1. Конический газостатический подшипник с частично-пористой поверхностью вкладыша

В целом, исследованиями, связанными с изучением конусных газостатических подшипников, занимаются Й. Ларссон [13], Ван Хуэй [14], Ф. Кастеллини [15], М. Ф. Ахмед [16] и др.

Математическая модель для определения стационарных характеристик частично-пористого газостатического подшипника содержит дифференциальные уравнения в частных производных, составляющих систему, которая имеет вид [17]:

- уравнения политропы $\frac{p}{\rho^n} = \text{const}$;
- уравнения неразрывности $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho V) = 0$;
- уравнения движения $\rho \frac{dV}{d\tau} = \rho \bar{f} - \text{grad } p + 2 \text{div}(\mu E) - \frac{2}{3} \text{grad}(\mu \text{div} V)$;
- уравнения энергии $\rho \frac{d}{d\tau} (c_p T) = \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{dp}{d\tau} + \text{div}(\chi_t \text{grad } T) + \Phi$,

где p – давление в слое жидкости; ρ – плотность газа; μ – динамическая вязкость жидкости; τ – время; V – скорость газа; \vec{f} – внешняя сила, отнесённая к единице массы газа; E – тензор скоростей деформации; c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; Q – внутренняя теплота; χ_i – коэффициент теплопроводности; Φ – диссипативная функция, которая равна

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{dV_x}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dV_z}{dz} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{dV_x}{dy} + \frac{dV_y}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dz} + \frac{dV_z}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dV_z}{dx} + \frac{dV_x}{dz} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu (\operatorname{div} V)^2.$$

Для определения величины поля давления, возникающего в зазоре цилиндрической частично-пористой газостатической цапфы, применялся подход из работ [6] и [17]. В связи с чем, используя полученные выше выводы, можно утверждать, что, применяя сферическую систему координат для уравнения неразрывности из приведённой выше системы дифференциальных уравнений в частных производных, можно получить уравнение, позволяющее определить давление газа в зазоре конической частично-пористой газостатической опоры. Данное уравнение представлено в виде модифицированного уравнения Рейнольдса, которое имеет вид

$$rr \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{h^3}{\mu} rr \frac{\partial p^2}{\partial rr} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p^2}{\partial \varphi} \right) = \frac{12 \cdot k_p \cdot (p_s^2 - p^2) \cdot ff}{\delta^2 \mu} + 12V \cos \varphi \cdot \sin \theta \frac{\partial(ph)}{\partial r} + \frac{\sin \varphi}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial(ph)}{\partial \varphi},$$

где rr – радиус-вектор сферической системы координат; φ – азимутальный угол; ff – специальный коэффициент, позволяющий разбить область интегрирования на части в зависимости от материала области, в данном случае коэффициент может принимать значения: 1 – при исследовании области пористых вставок, 0 – области вне пористых вставок; h – толщина газового слоя, зависящая от углов θ (полярный угол) и φ ; θ – угол конусности; p_s – давление надува газа.

В дальнейших исследованиях представленное уравнение Рейнольдса будет решаться численным способом – методом конечных разностей.

Заключение. Детальное исследование особенностей характеристик конусных газостатических подшипников, воспринимающих опорно-упорные нагрузки, открывает широкую возможность не только их надёжного внедрения в конструкции высокоскоростных роторных систем с целью удешевления устройств, но и регулировки значения среднего радиального зазора, поскольку он, как показывают многочисленные исследования, весьма сильно влияет на значения характеристик подшипника. Это, в частности, является предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Червинский, Н. М. Основы трибологии / Н. М. Червинский, В. Л. Червинский. – М.: Лань, 2011. – 288 с.
2. Морозов, Л. А. Подшипники в машинах и установках / Л. А. Морозов, В. В. Недорубов. – М.: Машиностроение, 2010. – 448 с.
3. Ваньков, А. А. Описание динамики высокоскоростного ротора / А. А. Ваньков, В. С. Щетинин, А. В. Космынин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 76-79.
4. Космынин, А. В. Методики определения влияния режимных и конструктивных параметров на траекторию движения ротора на газостатических опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. А. Ваньков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 48-52.



5. О теории газовой смазки и одной её задаче / А. В. Космынин, А. С. Хвостиков, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 94-98.
6. Шпиндельные узлы металлорежущих станков на опорах с внешним наддувом газа для финишной обработки отверстий малого диаметра / В. С. Щетинин, А. В. Космынин, А. В. Ульянов, А. А. Ваньков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-19. – С. 4192-4196.
7. Паршаков, В. Н. Подшипники скольжения / В. Н. Паршаков, Ю. Г. Коротков. – М.: Машиностроение, 2005. – 360 с.
8. Справочник инженера-конструктора. Машиностроение / под ред. И. Ф. Платонова. – М.: Машиностроение, 2004. – 1032 с.
9. Гондин, Ю. Н. Внутршлифовальный станок с головкой на подшипниках с воздушной смазкой / Ю. Н. Гондин, Л. И. Вильк // Станки и инструменты. – 1970. – № 8. – С. 14-15.
10. Андреев, В. И. Техническая трибология / В. И. Андреев. – М.: Высш. шк., 2008. – 360 с.
11. Мартынов, Г. М. Трибология и смазка технологического оборудования / Г. М. Мартынов, В. Н. Корнев. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 368 с.
12. Трибология: учеб. для вузов / под ред. А. А. Берещенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 528 с.
13. Larsson. Non-equilibrium wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers // U. S. National Science Foundation. – URL: https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1453633.
14. Обзор анализа трибологических отказов и исследований технологии смазки подшипников ветроэнергетики / Хан Пэн, Хай Чжан, Линьцзянь Шангуань, Йиса Фань // 1996-2024 MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/15/3041> (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
15. Сяндую, П. Технологии подшипников с длительным сроком службы по материальному аспекту: доклад конференции / П. Сяндую, Я. Шимизу, Н. Митамура // 2024 Springer Nature. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03653-8_319 (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
16. Разработка и реализация операционной стратегии на основе искусственного интеллекта для снижения вибрации подшипника вала сверхкритической паровой турбины / В. М. Ашраф, Я. Рафик, Г. М. Уддин, Ф. Риаз, М. Асим, М. Фарук, А. Хуссейн, Ч. А. Салман // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, Issue 3. – P. 1864-1880. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821005093> (дата обращения: 12.03.2024). – Текст: электронный.
17. Константиnescу, В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константиnescу. – М.: Машиностроение, 1968. – 718 с.

Щетинин В. С., Космынин А. А., Марьин С. Б.
МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА
НА БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОРАХ С ВНЕШНИМ НАДДУВОМ ГАЗА

Щетинин В. С., Космынин А. А., Марьин С. Б.
V. S. Schetinin, A. A. Kosmynin, S. B. Maryin

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОРАХ С ВНЕШНИМ НАДДУВОМ ГАЗА

METHODOLOGY FOR CALCULATION OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNIT ON CONTACTLESS SUPPORTS WITH EXTERNAL GAS SUPERCHARGING

Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

Vladimir S. Shchetinin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: schetynin@mail.ru.

Космынин Артем Александрович – аспирант кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: avkosm@mail.ru.

Artem A. Kosmynin – Postgraduate Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: avkosm@mail.ru.

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: as@knastu.ru.

Sergey B. Maryin – Doctor of Technical Sciences, Head of Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: as@knastu.ru.

Аннотация. Описана методика расчёта основных эксплуатационных характеристик шпиндельного узла: силы резания и жёсткости, – определяемых на режущем инструменте, расположенном на консоли шпинделя. При этом полагается, что шпиндель установлен на газостатические опоры с внешним наддувом газа. Подробно изложен алгоритм расчёта, и представлена его блок-схема. Приведено сопоставление результатов теоретического расчёта с результатами физических наблюдений, которое показало вполне удовлетворительное для инженерной практики согласование данных.

Summary. The method of calculating the main operational characteristics of the spindle assembly – cutting force and stiffness, determined on a cutting tool mounted on the spindle console, is described. In this case, it is assumed that the spindle is mounted on gas-static supports with an external gas boost. The calculation algorithm is described in detail and its block diagram is presented. A comparison of the results of the theoretical calculation with the results of physical observations is presented, which showed that data matching is quite satisfactory for engineering practice.

Ключевые слова: методика расчёта, шпиндельный узел, газостатические подшипники, сила резания, жёсткость, сравнительный анализ.

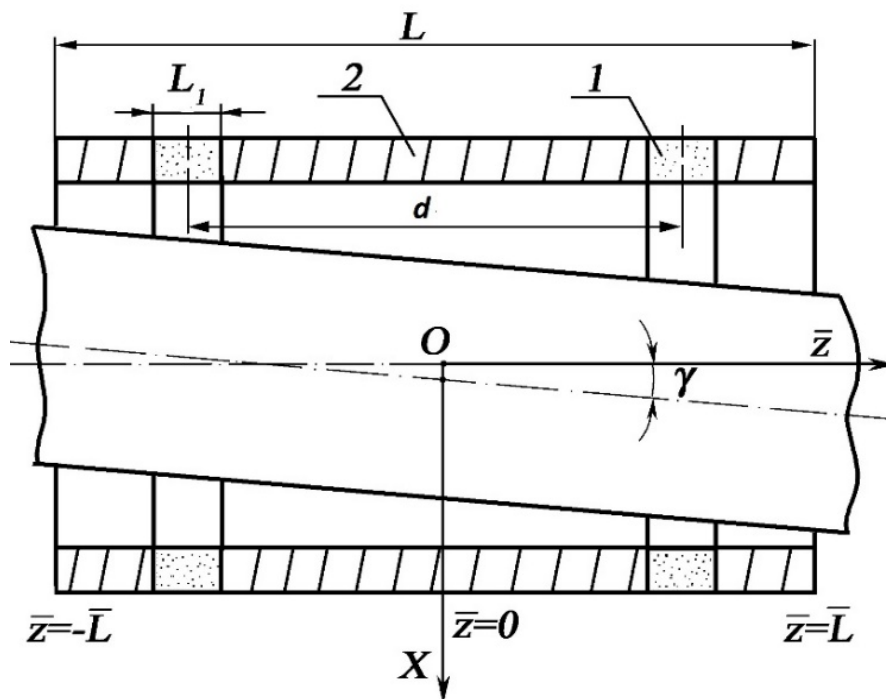
Key words: calculation method, spindle assembly, gas-static bearings, cutting force, stiffness, comparative analysis.

УДК 62-229.331:621.924

Основными достоинствами высокоскоростной обработки (ВСО) деталей на металлообрабатывающих станках являются повышение производительности труда, обеспечение качественного изготовления [8], возможность эффективно работать с труднообрабатываемыми материалами [5] и

т. д. Реализовать все преимущества ВСО способны станки со шпиндельными узлами на газовых опорах [7].

Рассмотрим методику расчёта силы резания и жёсткости на режущем инструменте шпиндельного узла металлорежущего станка, шпиндель которого установлен на газостатические опоры с частично пористой стенкой вкладыша. Заметим, что организация нагнетания газа в зазор таких бесконтактных подшипников может происходить через пористые матрицы, имеющие форму цилиндра, шпонки, кольцевой вставки и т. д. [1]. Так, например, конструкция подшипника с кольцевыми пористыми вставками показана на рис. 1.



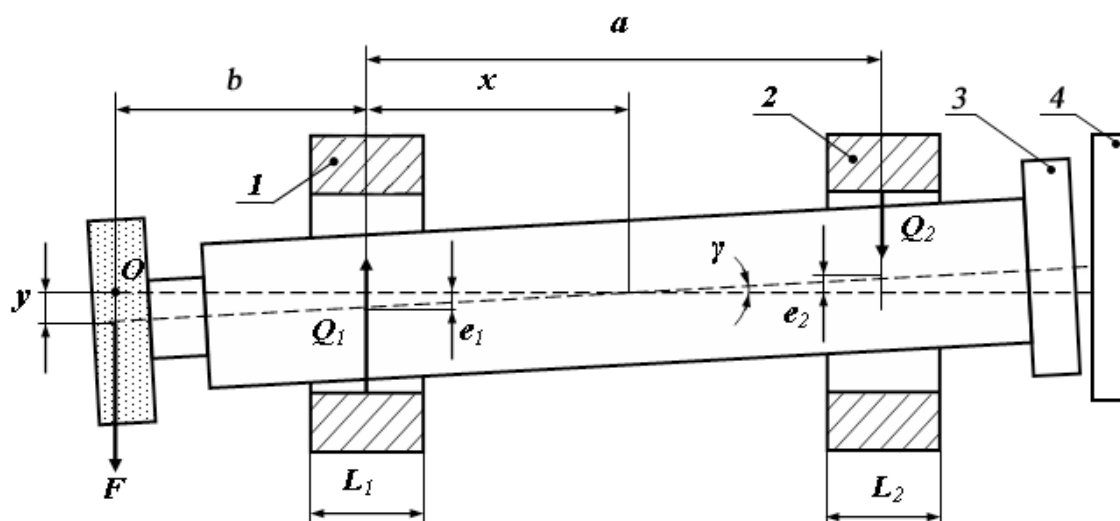
- 1 – кольцевой пористый ограничитель расхода газа;
2 – газонепроницаемый вкладыш подшипника

Рис. 1. Конструкция двухрядной газостатической опоры шпинделя

На рис. 1 величина L – длина подшипника; L_1 – ширина кольцевой пористой вставки; d – раздвижка линий наддува сжатого газа; γ – угол перекося оси шпинделя.

На рис. 2 представлена принципиальная схема шпиндельного узла с креплением режущего инструмента, в частности шлифовального круга, на консоли шпинделя.

Условные обозначения величин на рис. 2 следующие: F – сила резания; y – смещение оси режущего инструмента; e_1 – эксцентриситет между осями передней опоры и шпинделя; e_2 – эксцентриситет между осями задней опоры и шпинделя; R – радиус вкладыша подшипника; b – вылет шпинделя; a – раздвижка газостатических опор; L_1 – длина передней опоры; L_2 – длина задней опоры; Q_1 – нагрузка на передней опоре; Q_2 – нагрузка на задней опоре.



1 – передняя опора; 2 – задняя опора; 3 – подпятник;
4 – пята упорного газостатического подшипника

Рис. 2. Принципиальная схема шпиндельного узла с газостатическими опорами

Исходя из схемы, представленной на рис. 2, и рекомендаций [6] запишем два уравнения статики: сумма проекций сил на ось Y

$$Q_1 - Q_2 - F = 0 \quad (1)$$

и уравнение моментов относительно точки O

$$Q_2(a + b) + M - Q_1b = 0, \quad (2)$$

где M – восстанавливающий момент от перекоса, который в свою очередь равен

$$M = M_1 + M_2 + M_3. \quad (3)$$

В уравнении (3) M_1 – момент от перекоса переднего подшипника; M_2 – момент от перекоса заднего подшипника; M_3 – момент от перекоса упорного газостатического подшипника.

Дальнейший расчёт силы резания и жёсткости на режущем инструменте строится следующим образом.

Запишем выражения для эксцентриситетов переднего и заднего подшипников исходя из того, что угол перекоса γ весьма мал. Получим

$$e_1 = x\gamma; \quad e_2 = (a - x)\gamma,$$

откуда

$$e_2 = a\gamma - e_1.$$

Запишем последнее уравнение в безразмерных величинах:

$$\varepsilon_2 = \bar{\gamma}_1 \frac{a}{R\bar{L}_1} - \varepsilon_1, \quad (4)$$

где $\varepsilon_2 = e_2/c$ – относительный эксцентриситет в задней опоре; $\varepsilon_1 = e_1/c$ – относительный эксцентриситет в передней опоре, здесь c – средний радиальный зазор между шпинделем и вкладышем газостатической опоры; $\bar{\gamma}_1$ – параметр перекоса передней опоры; $\bar{L}_1 = L_1/D$ – относительная длина передней опоры.

Параметр перекоса $\bar{\gamma}_1$ равен

$$\bar{\gamma}_1 = \gamma R\bar{L}_1/c$$

и изменяется от $\varepsilon_1 R\bar{L}_1/a$, что соответствует $\varepsilon_2 = 0$, до $2\varepsilon_1 R\bar{L}_1/a$, что достигается при $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$.

Расчёт выполняется в следующей последовательности. Задаётся значение относительного эксцентриситета ε_1 в передней опоре шпиндельного узла и некоторое значение параметра перекоса $\bar{\gamma}_1$. По известным методикам расчёта характеристик газостатических подшипников, например изложенным в работах [2; 3; 4], определяются нагрузка Q_1 и восстанавливающий момент от перекоса M_1 передней опоры. Далее при заданных относительном эксцентриситете ε_1 и параметре перекоса $\bar{\gamma}_1$ из выражения (4) находится относительный эксцентриситет в задней опоре шпиндельного узла ε_2 , определяется её параметр перекоса

$$\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_1 \bar{L}_2 / \bar{L}_1 \quad (5)$$

и проводится расчёт эксплуатационных характеристик, а именно: нагрузки Q_2 и момента от перекоса M_2 . Считая зависимость момента от перекоса в упорном газостатическом подшипнике $M_3 = f(y)$ известной, выполняется проверка равенства (2). Если ошибка вычислений больше заданной точности, то, не изменяя значение относительного эксцентриситета ε_1 , задаём новое значение параметра перекоса $\bar{\gamma}_1$ и расчёт выполняем снова. При достижении заданной точности вычислений из уравнения (1) находится сила резания F , а из выражения

$$y = c \left(\varepsilon_1 + \frac{b\bar{\gamma}_1}{R\bar{L}_1} \right)$$

смещение оси режущего инструмента y . Затем задаётся другое значение относительного эксцентриситета ε_1 и расчёты выполняются вновь. Исходя из соображения отсутствия контакта шпинделя с вкладышами газостатических опор, предельное теоретическое значение относительного эксцентриситета ε_1 не должно превышать

$$\varepsilon_{1\max} = 1 - \frac{2L_1}{L_1 + L_2 + 2a}.$$

В результате выполненного комплекса расчётов устанавливается зависимость $F = f(y)$. Как показали расчёты, с достаточной для инженерной практики точностью эта зависимость достаточно близка к линейной, т. е. имеет вид

$$F = ty.$$

Тогда, исходя из того, что жёсткость на режущем инструменте определяется по формуле $k_F = dF/dy$, окончательно получим $k_F = t$.

Блок-схема расчёта выходных характеристик шпиндельного узла на газостатических опорах представлена на рис. 3.

Для проверки корректности разработанной методики выполнены расчёты и проведены экспериментальные исследования характеристик шпиндельного узла, имеющего следующие параметры: длина передней и задней опоры $L_1 = L_2 = 60$ мм, диаметр вкладыша передней и задней опоры $D_1 = D_2 = 50$ мм, раздвижка линий наддува в газовых опорах 24 мм; раздвижка опор $a = 240$ мм, вылет шпинделя $b = 70$ мм. Давление наддува газа в опоры составляло 5 ати.

На рис. 4 показано сравнение теоретической и экспериментальной зависимости $F = f(\varepsilon_1)$.

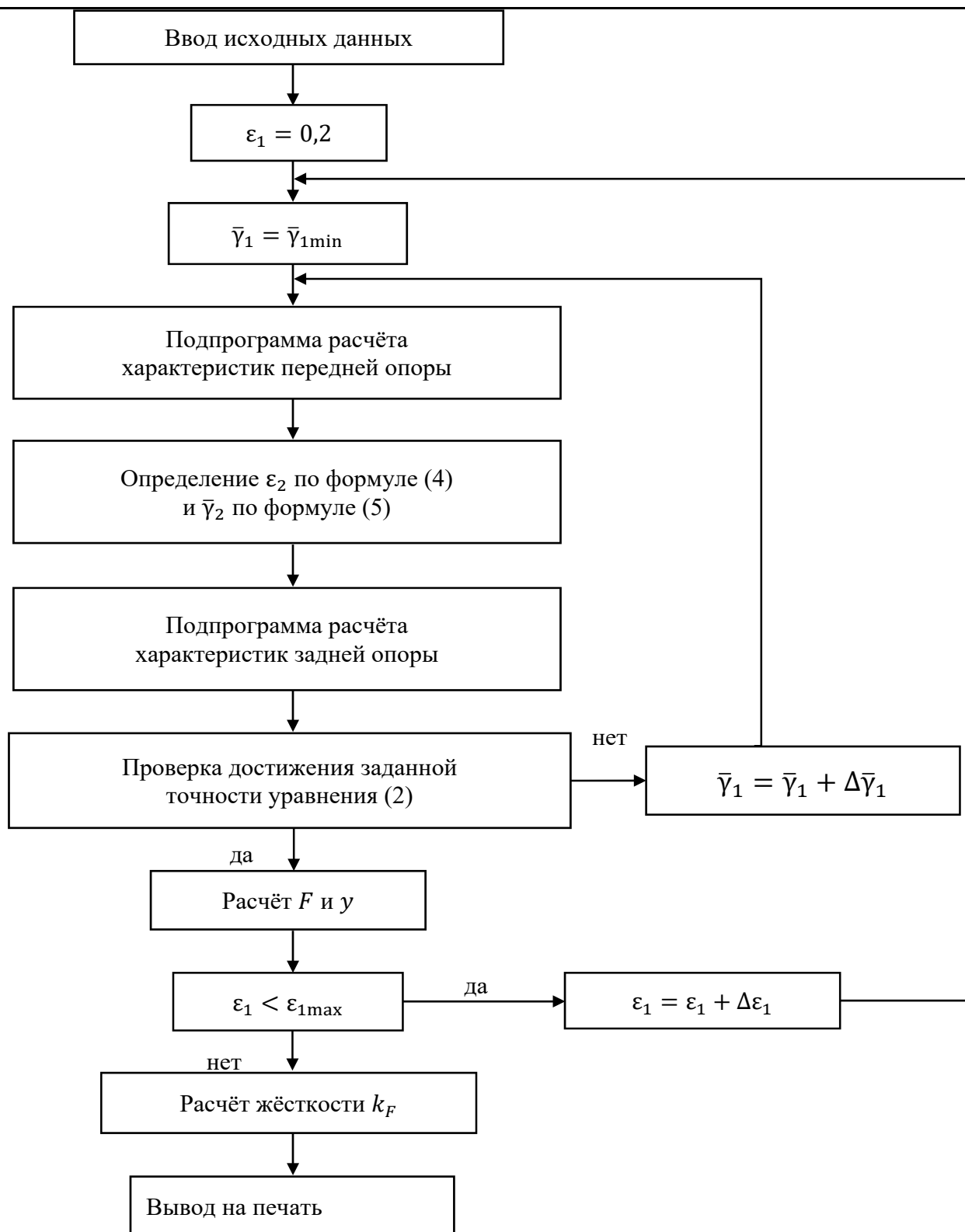


Рис. 3. Блок-схема расчёта силы резания и жёсткости на консоли шпинделя, установленного на газостатические опоры

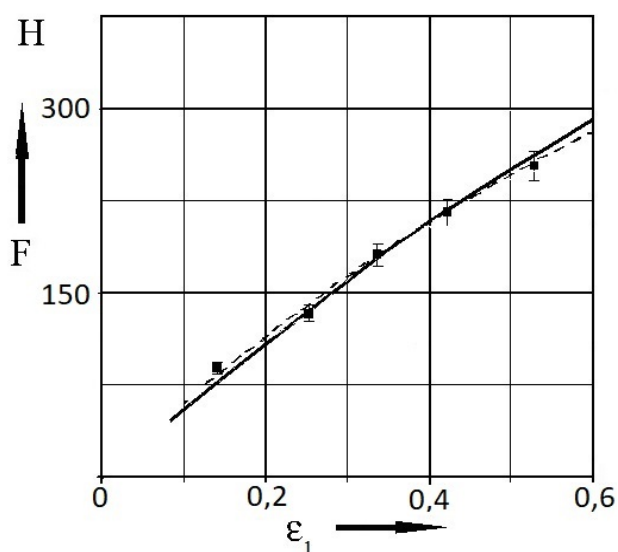


Рис. 4. Зависимость силы резания F от относительного эксцентриситета ε_1 :
——— — теория; - - - - - эксперимент

Элементарный анализ представленных зависимостей показывает вполне удовлетворительное качественное и количественное согласование. Относительное расхождение между теоретическими результатами и данными физического эксперимента в диапазоне $\varepsilon_1 = 0,14 \dots 0,6$ не превосходит 4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 372 с.
2. Космынин, А. В. Методика определения влияния режимных и конструктивных параметров на траекторию движения ротора / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. А. Ваньков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 45-52.
3. Космынин, А. В. Методика расчёта несущей способности газоманитного подшипника высокоскоростного шпиндельного узла / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова // Вестник Самарского ГТУ. – 2010. – № 4. – С. 226-229.
4. Методика расчёта частично пористых газовых подвесов шпиндельных узлов / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков [и др.] // Гидродинамическая теория смазки – XXI: материалы международного научного симпозиума (Орел, 17-18 мая 2016 г.). – Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2016. – С. 97-99.
5. Мокрицкий, Б. Я. Фрезерование высокотвёрдых материалов сборной торцевой фрезой / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Скрипилев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 98-101.
6. Опоры скольжения с газовой смазкой / С. А. Шейнберг, В. П. Жедь, М. Д. Шишеев и др.; под ред. С. А. Шейнберга. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.
7. Саблин, П. А. Повышение точности механообработки с помощью использования бесконтактных опор / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51). – С. 104-106.
8. Самар, Е. В. Новый подход к управлению параметрами технологической системы резания / Е. В. Самар, Б. Я. Мокрицкий // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 76-82.

Иванов С. Н., Колесник М. Б., Ким К. К., Азимов Х. Х., Андрианов И. К.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ
МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Иванов С. Н., Колесник М. Б., Ким К. К., Азимов Х. Х., Андрианов И. К.
S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, K. K. Kim, Kh. Kh. Azimov, I. K. Andrianov

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

DETERMINATION OF OUTPUT PARAMETERS OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE SEALED VALVE OF THE MAIN PIPELINE

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Колесник Максим Борисович – аспирант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Maxim B. Kolesnik – Postgraduate Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head Theoretical Electrical Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Азимов Хурсандмурод Хакимович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Khursandmurod Kh. Azimov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Mr. Ivan K. Andrianov – PhD, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Аннотация. В данной статье определены расчётные параметры механической характеристики электропривода герметичной задвижки. Получены графики зависимостей сил давления на клин от степени закрытия задвижки. Описана тенденция изменения этих сил в зависимости от габаритов, давления и скорости потока жидкости. На основе предыдущих результатов получены механические характеристики электропривода при закрытии и открытии задвижки. Приведены графики зависимостей вращающего момента от номинального диаметра и шага резьбы. Определено взаимное влияние диаметра и шага на механический момент.

Summary. In this article, the calculated parameters of the mechanical characteristics of the electric drive of a sealed valve are determined. Graphs of the dependences of the pressure forces on the wedge on the degree of closure of the valve are obtained. The tendency of these forces to change depending on the dimensions, pressure and velocity of the fluid flow is described. Based on the previous results, the mechanical characteristics of the electric drive were obtained when closing and opening the valve. Graphs of the dependences of the torque on the nominal



diameter and thread pitch are given. The mutual influence of diameter and pitch on the mechanical moment is determined.

Ключевые слова: моделирование потока, движение, давление, вращающий момент, диаметр резьбы, шаг резьбы.

Key words: flow simulation, motion, pressure, torque, thread diameter, thread pitch.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00089, <https://rscf.ru/project/24-29-00089>).

УДК 621.313:621.25

Введение. На сегодняшний день принципиально в качестве приводного механизма могут использоваться грузовые, пружинные, тепловые, пневматические, гидравлические, электромагнитные, электромеханические устройства, а также их различные сочетания. В технических системах привода таких типов находят практическое применение, начиная с маломощных механизмов и заканчивая уникальными установками перемещения сооружений [1–5]. Большинство из перечисленных приводов обеспечивает линейное перемещение. Однако не все привода удовлетворяют тем или иным показателям, например, таким как габариты, масса, надёжность, стоимость и другие технико-экономические показатели, поэтому целью исследования является повышение эффективности приводных механизмов путём улучшения данных показателей. Частной задачей, решаемой в рамках данного исследования, является разработка высокоэффективного привода герметичной задвижки.

По отношению к частной цели актуальной данная тема является ещё потому, что в России протяжённость магистральных трубопроводов составляет более 250 тыс. км. При этом из-за большой территории страны есть участки трубопроводов, до которых в случае аварии люди не могут быстро добраться, либо в них не могут быстро найти место аварии, это также относится и к участкам трубопроводов, проходящим под водой. Поэтому актуально не только повышение надёжности привода, но и осуществление контроля за состоянием трубопровода и дистанционное управление задвижкой.

Применение такого типа привода, соответственно, может найти широкое применение в нефтяной и газовой промышленности, в водоснабжении, на железной дороге, в авиастроении и в других отраслях.

Научная новизна связана с разработкой электромеханического преобразователя на базе асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента, включающей отдельный модуль в виде передаточного механизма путём совмещения функций передаточного и исполнительного механизма в одном устройстве. Также она заключается в том, что привод проектируется под конкретные эксплуатационные условия, в частности, по отношению к приводу герметичной задвижки необходимо максимально учесть все напряжения и нагрузки, оказываемые на клин и, как следствие, на исполнительный элемент и двигатель в процессе эксплуатации. После этого сначала необходимо определить параметры передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений, затем определить выходные параметры электродвигателя, такие как вращающий момент и скорость перемещения. По выходным параметрам спроектировать двигатель с наибольшими значениями коэффициента полезного действия и коэффициента мощности [6–9]. В данной статье определяются требуемые механические характеристики электропривода.

Определение расчётных параметров механической характеристики. Для нахождения механической характеристики электропривода задвижки необходимо знать, какие силы сопротивления нужно преодолеть при перемещении – закрытии или открытии задвижки. Одними из составляющих являются силы давления жидкости, действующие на клин.

В соответствии с постановлением Правительства № 354 от 31 июля 2021 г., давление в системе холодного водоснабжения в точке водоразбора должно находиться в пределах от 0,03 до

0,6 МПа, а скорость потока – от 0,5 до 1,5 м/с. Поэтому для решения данной задачи в качестве исходных данных сначала задаются наименьшие значения давления и скорости потока, а затем – наибольшие, формируется область проектирования, в которой будут изменяться силы, действующие на клин. При построении графиков эти силы раскладываются на составляющие по трём осям координат.

Расчётная модель привода герметичной задвижки представлена на рис. 1. В ходе решения задачи ось X будет совпадать с направлением течения жидкости в трубопроводе. План, в соответствии с которым осуществляется моделирование течения жидкости, представлен в табл. 1. Все расчёты выполнены в пакете SolidWorks Flow Simulation, общее количество опытов 300. Распределение давления по поверхности клина в промежуточном положении представлено на рис. 2.

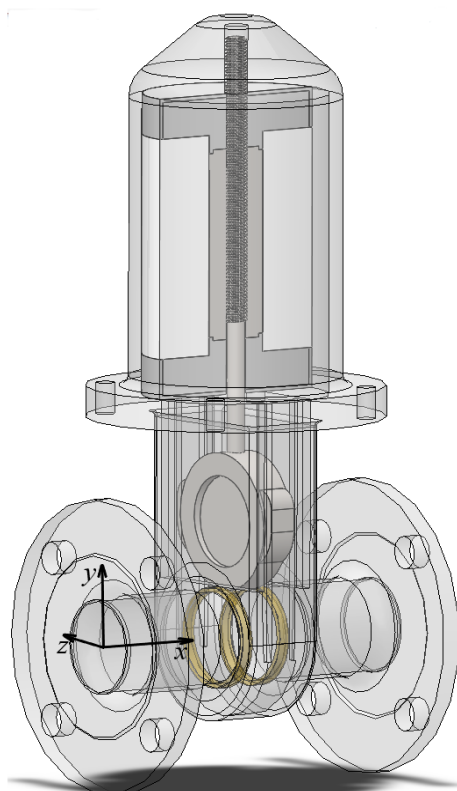


Рис. 1. Модель привода герметичной задвижки

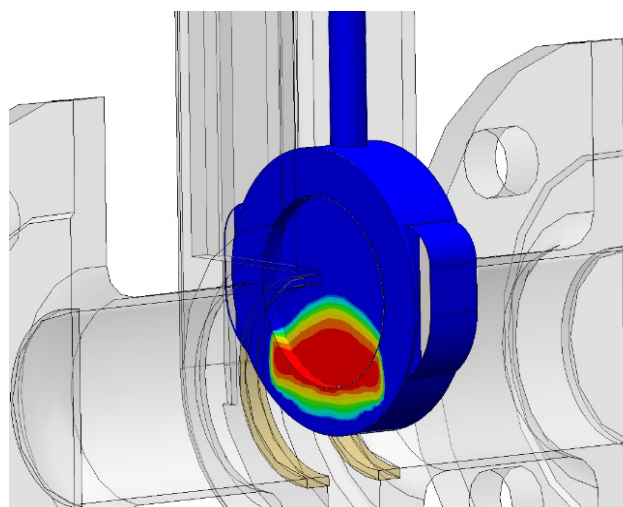


Рис. 2. Распределение давления по поверхности клина

Таблица 1

План расчёта

Номер опыта	Полное давление на входе, кПа	Скорость потока на выходе, м/с	Силы, действующие на клин, Н		
			$F_x = f(\gamma)$	$F_y = f(\gamma)$	$F_z = f(\gamma)$
1	30,0	0,50	F_{x1}	F_{y1}	F_{z1}
2	30,0	1,00	F_{x2}	F_{y2}	F_{z2}
3	30,0	1,50	F_{x3}	F_{y3}	F_{z3}
4	315,0	0,50	F_{x4}	F_{y4}	F_{z4}
5	315,0	1,00	F_{x5}	F_{y5}	F_{z5}
6	315,0	1,50	F_{x6}	F_{y6}	F_{z6}
7	600,0	0,50	F_{x7}	F_{y7}	F_{z7}
8	600,0	1,00	F_{x8}	F_{y8}	F_{z8}
9	600,0	1,50	F_{x9}	F_{y9}	F_{z9}

Результаты проведённых экспериментов представлены в виде графиков на рис. 3-4. По оси ординат показаны силы, действующие на клин. За ось абсцисс принята степень закрытия задвижки γ в процентах от 0 до 100 %, где 0 – задвижка полностью открыта, 100 % – задвижка полностью закрыта.

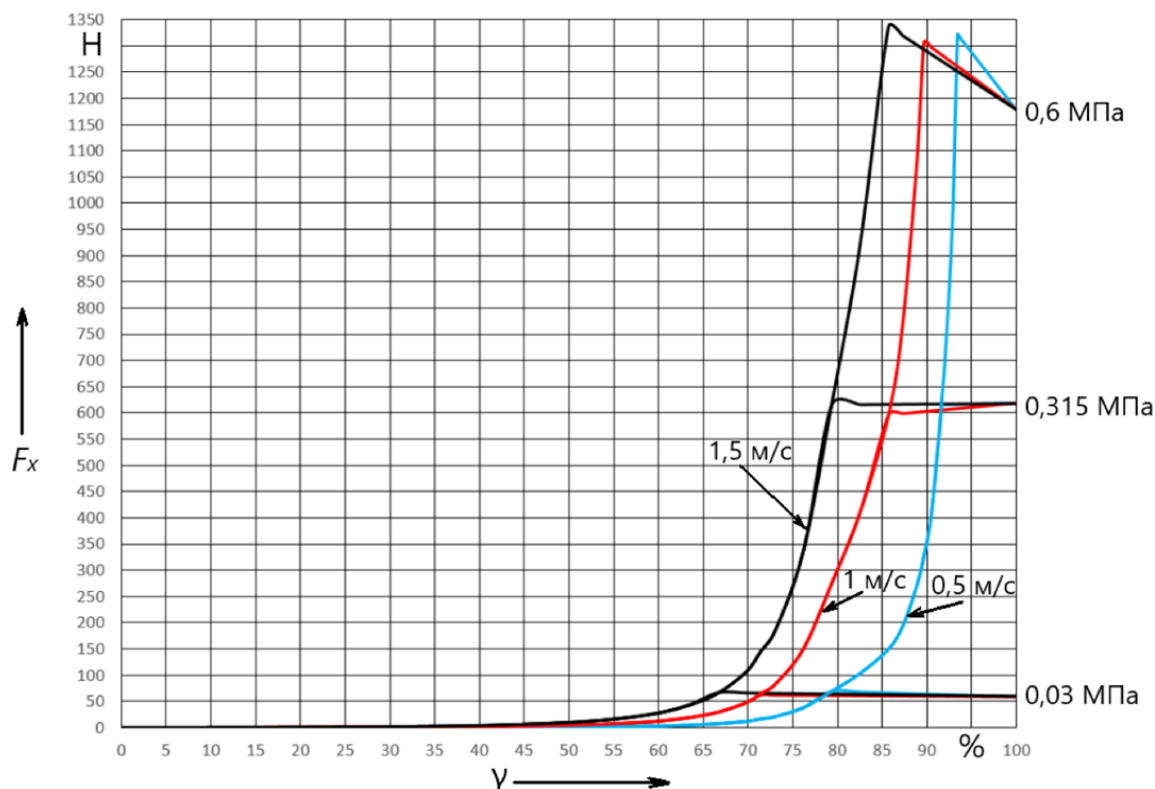


Рис. 3. Силы, действующие на клин в направлении оси X

Анализ распределения давления по поверхности клина, приведённого на рис. 3, показывает:

- при закрытии задвижки силы действия F_x возрастают в соответствии с нелинейной зависимостью;

- графики сил F_x при различных давлениях жидкости на входе и одинаковой скорости потока на выходе накладываются друг на друга, следовательно, можно сделать вывод, что вид графика определяется не входным давлением, а необходимой скоростью потока жидкости на выходе;

- входное давление определяет только границу, или степень закрытия задвижки, до пересечения с которой перекачивающее устройство может обеспечить течение жидкости с сохранением её скорости на выходе. При преодолении этой границы, или при дальнейшем закрытии задвижки, давление достигнет своего максимума и возрастать не будет, а скорость течения жидкости на выходе будет уменьшаться, как и её расход.

По отношению к силам F_y , действующим в вертикальном направлении, можно сказать следующее:

- положение графиков на координатной плоскости по высоте определяется в большей степени давлением и в меньшей – скоростью течения жидкости;

- графики с заданным одинаковым давлением на входе с меньшей скоростью течения жидкости находятся выше графиков с большей скоростью течения;

- при степени закрытия от 0 до 20 % положение графика определено давлением жидкости на входе и сам график практически параллелен оси абсцисс;

- при дальнейшем закрытии, примерно до 60-80 %, значение сил F_y плавно уменьшается в сторону отрицательного направления оси ординат;

- последние участки графиков, начиная с 60-95 % (в зависимости от входного давления), находятся в области, в которой моделирование течения жидкости не приводит к получению достоверного результата (это обусловлено формой клина и тем, что давление в жидкости передаётся во всех направлениях одинаково), поэтому эти участки линейаризованы и направлены в точку $F_y = 0$ и $\gamma = 100$ %.

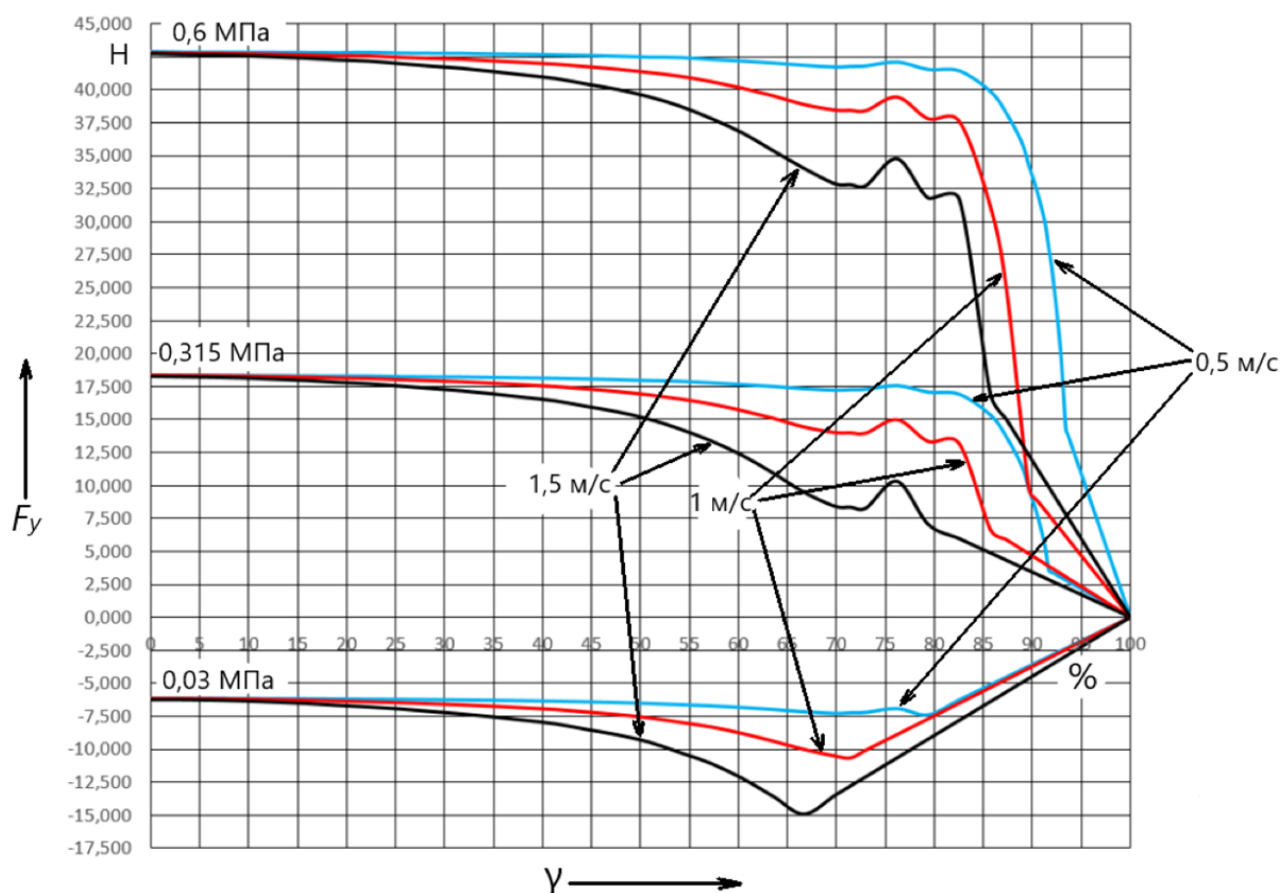


Рис. 4. Силы, действующие на клин в направлении оси Y

Силы, действующие вдоль оси Z , имеют незначительную величину, и поэтому учитывать их влияние нет необходимости.

Таким образом, проанализировав полученные графики, можно спрогнозировать, как будут изменяться силы действия на клин при изменении входного давления, скорости на выходе и габаритов задвижки:

- при сохранении габаритов задвижки и скорости течения жидкости на выходе и увеличении давления на входе в 2 раза графики сил $F_x = f(\gamma)$ сместятся вверх также в 2 раза, но не на всём диапазоне закрытия, а только на конечном участке, представленном так называемой полкой. Графики $F_y = f(\gamma)$, напротив, сместятся вверх в два раза на всём диапазоне.

- при сохранении скорости течения жидкости на выходе и давления на входе и увеличении габаритов в 2 раза абсолютно все действующие силы должны увеличиться в 4 раза, т. к. площадь поверхности пропорциональна квадрату линейного размера.

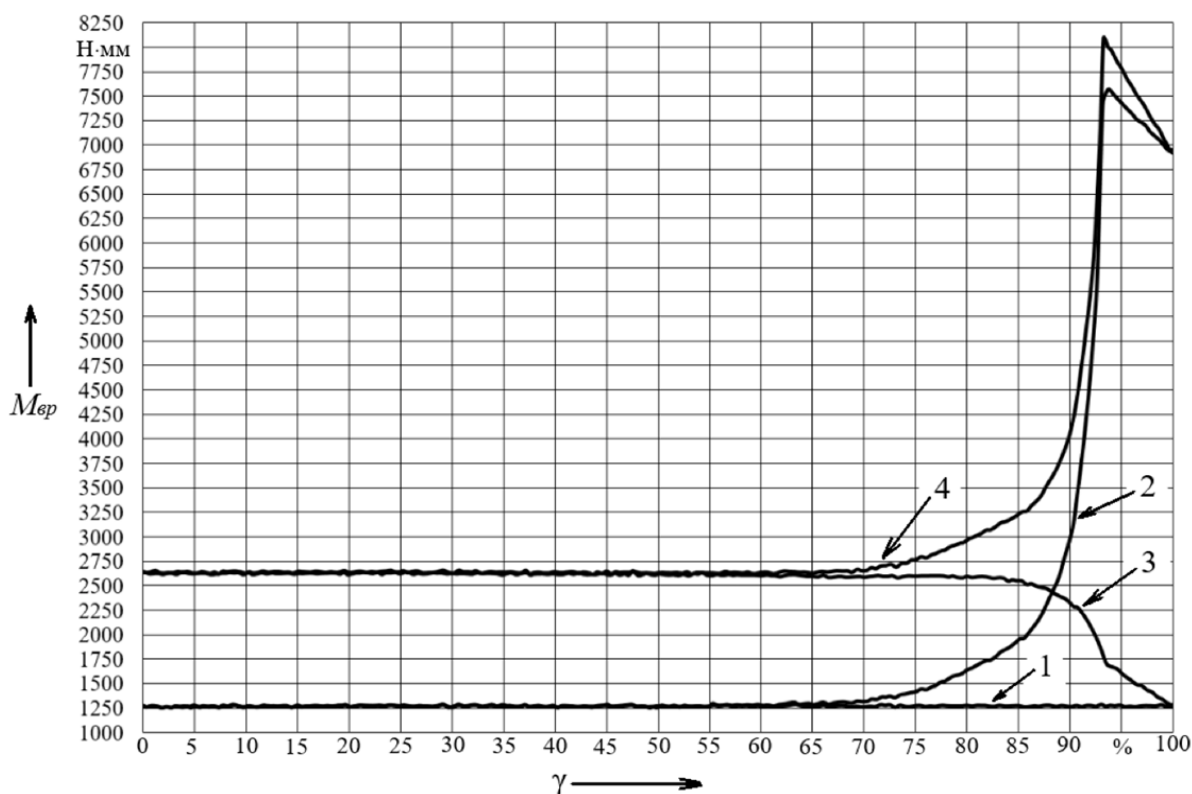
- при сохранении габаритов задвижки и давления на входе и увеличении скорости течения жидкости на выходе в 2 раза графики сил $F_x = f(\gamma)$ сместятся влево примерно в 2 раза относительно предыдущего положения, а графики $F_y = f(\gamma)$ сместятся вниз в сторону отрицательного направления оси ординат также в 2 раза относительно предыдущего положения.

Для более точного нахождения сил давления необходимо аналитически задать функцию, в которой в качестве параметров будут выступать габариты, скорость и давление.

Определение механической характеристики. Механическую характеристику электродвигателя определим с помощью пакета SolidWorks Motion [10–13]. В качестве внешних нагрузок зададим графики сил, полученные в модуле Flow Simulation. На рис. 5 приведены графики вращающего момента для случая, когда полное давление на входе составляет 600 кПа и скорость на выходе 0,5 м/с. Также на данном рисунке отражено то, из каких составляющих складывается результирующий вращающий момент, а именно: из механического момента, необходимого для перемещения исполнительного элемента без нагрузки, под нагрузкой F_x и F_y . Для более существенного отражения увеличения вращающего момента по сравнению с механической характеристикой без нагрузки силы давления были увеличены в 100 раз. Следует отметить, что значения этих сил не являются запредельными, т. к., например, в магистральном нефтепроводе давление может составлять 5-10 МПа, а скорость течения жидкости – 10-12 км/ч, что эквивалентно 2,78-3,33 м/с. Также диаметр трубопровода может составлять до 1200 мм, а выполненные расчёты в Flow Simulation проводились на задвижке диаметром 50 мм. Поэтому только увеличение диаметра задвижки до 50 см, или в 10 раз, эквивалентно увеличению сил давления в 100 раз.

По графику 4 на рис. 5 видно, что наибольшего значения результирующий вращающий момент достигает в закрытом или почти закрытом положении. Здесь однозначного ответа пока дать нельзя, т. к. границу, до пересечения с которой расчёт выполняется верным, трудно определить.

При перемещении клина из закрытого положения в открытое график механического момента будет иметь иной вид, график 3 на рис. 5 отразится вниз относительно графика 1 и будет не препятствовать, а помогать движению, график 2 останется в прежнем положении, т. к. он представляет собой преодолеваемую силу трения. Таким образом, результирующий график 4 опустится вниз на величину отражённого графика 3 и суммарный момент уменьшится.



1 – без нагрузки; 2 – нагрузка F_x ; 3 – нагрузка F_y ; 4 – результирующий момент

Рис. 5. Составляющие вращающего момента

На рис. 6 приведено семейство графиков результирующих вращающих моментов при закрытии для всех случаев течения жидкости, указанных в данной статье.

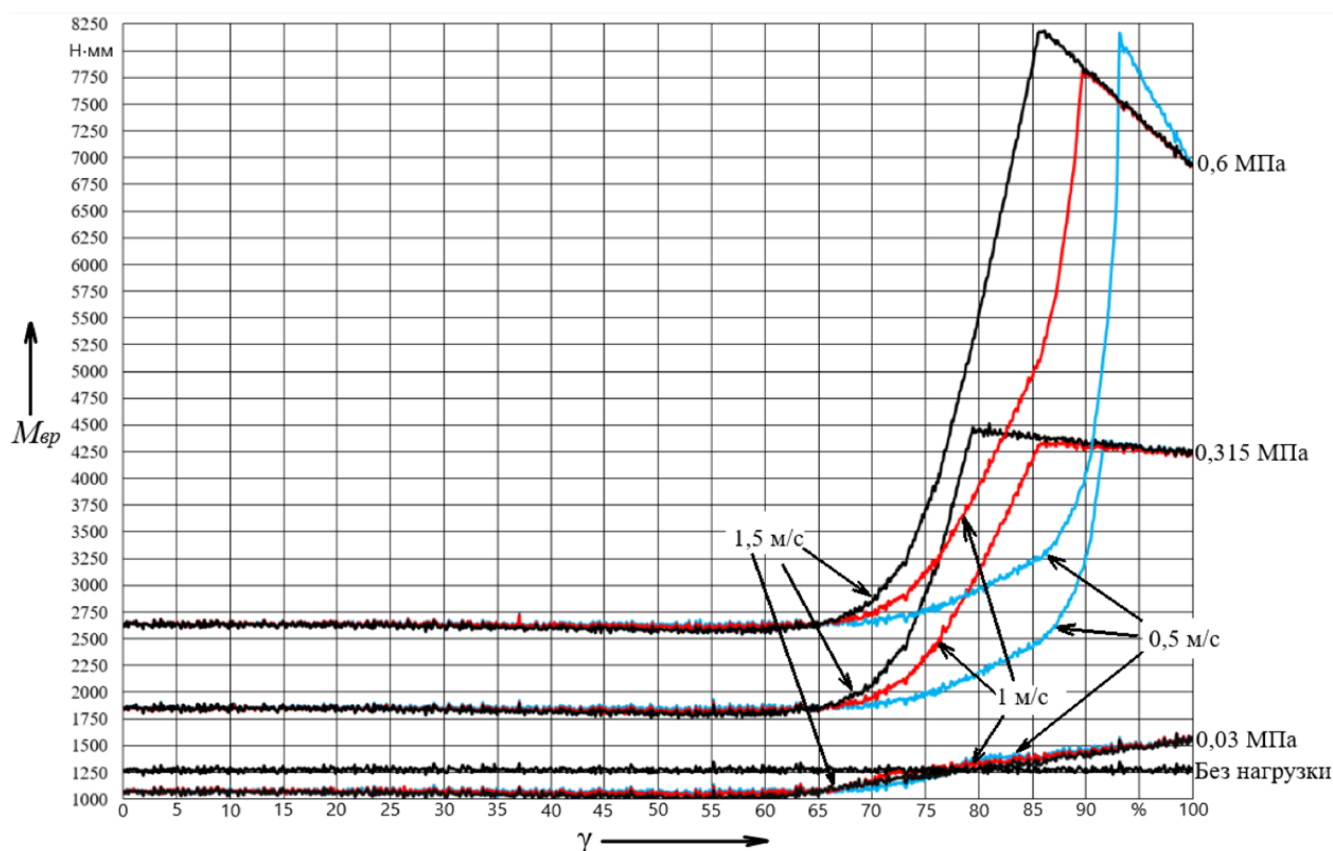


Рис. 6. Графики результирующих вращающих моментов при закрытии

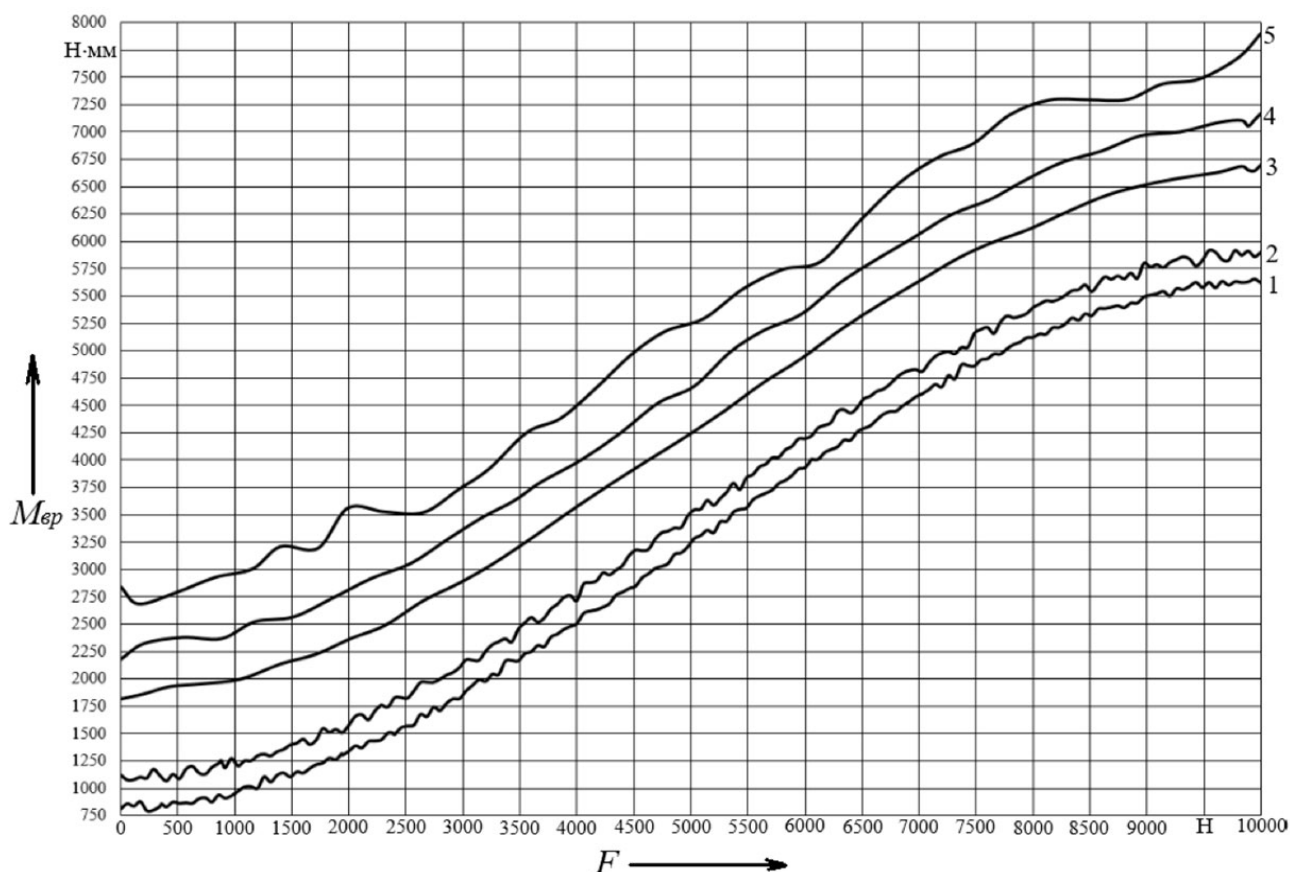
Аналогично, как в случае с определением тенденции изменения силы давления на клин, можно спрогнозировать изменение механического момента.

Так, при сохранении всех исходных параметров и повышении давления на входе в 2 раза график сместится вверх также в 2 раза, но может образоваться провал на участке 65–85 %, т. к. в данном случае составляющая F_y сместится вверх на всём диапазоне, а F_x — только на участке «полки». Изменение габаритов (в большую сторону) в 2 раза ведёт к возрастанию механического момента в 4 раза на всём его диапазоне. При увеличении скорости течения жидкости на выходе в 2 раза график сместится влево на величину, связанную с взаимным снижением сил F_y и смещением влево F_x . Также, как видно из рис. 3, заметное изменение направления графиков в сторону роста наблюдается при разных процентах закрытия задвижки: 55 % — для 1,5 м/с, 60 % — для 1 м/с, 65 % — для 0,5 м/с.

На графике моментов этого различия не видно и видимые изгибы всех кривых наблюдаются фактически из одной точки, т. е. совместное влияние сил вдоль осей X и Y нивелирует данный момент, и графики имеют вид «полки» до одного и того же значения процента закрытия задвижки.

Влияние выбранного размера и шага резьбы на механическую характеристику. Все приведённые выше расчёты были выполнены с номинальным диаметром резьбы d 12 мм и шагом P 2 мм. Чтобы узнать, как влияет выбранный размер и шаг резьбы на вращающий момент, был проведён эксперимент. В результате были получены графики зависимостей вращающих моментов от действующей силы сопротивления, в данном случае сила F линейно изменяется от 0 до 10 кН. Графики приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что кривые расположены параллельно друг другу, следовательно, если вычесть из каждой кривой величину вращающего момента, необходимого

для поворота винта без нагрузки, то графики накладываются друг на друга. Таким образом, изменение диаметра резьбы влияет на механический момент, необходимый для вращения без нагрузки, и при увеличении диаметра момент увеличивается.



1 – $d = 12$ мм; 2 – $d = 14$ мм; 3 – $d = 22$ мм; 4 – $d = 24$ мм; 5 – $d = 26$ мм

Рис. 7. Механический момент при $P = 3$ мм в зависимости от номинального диаметра резьбы

На рис. 8 приведены графики зависимостей вращающего момента от шага резьбы. Как видно из графиков, изменяется и механический момент без нагрузки, и угол наклона характеристики, который при увеличении шага резьбы также увеличивается. Таким образом, в зависимости от выбранной нагрузки можно найти такой шаг резьбы, при котором механический момент, необходимый для перемещения исполнительного элемента, будет минимальным [14].

На рис. 9 приведено семейство механических характеристик. Следует отметить, что при увеличении шага резьбы разница между значениями моментов при разных диаметрах уменьшается, и при шаге $P = 5$ мм она почти не видна. Однако до конца данный вопрос не изучен, и для отражения полной картины необходимо увеличить диапазон исследуемых размеров трапецидальной резьбы.

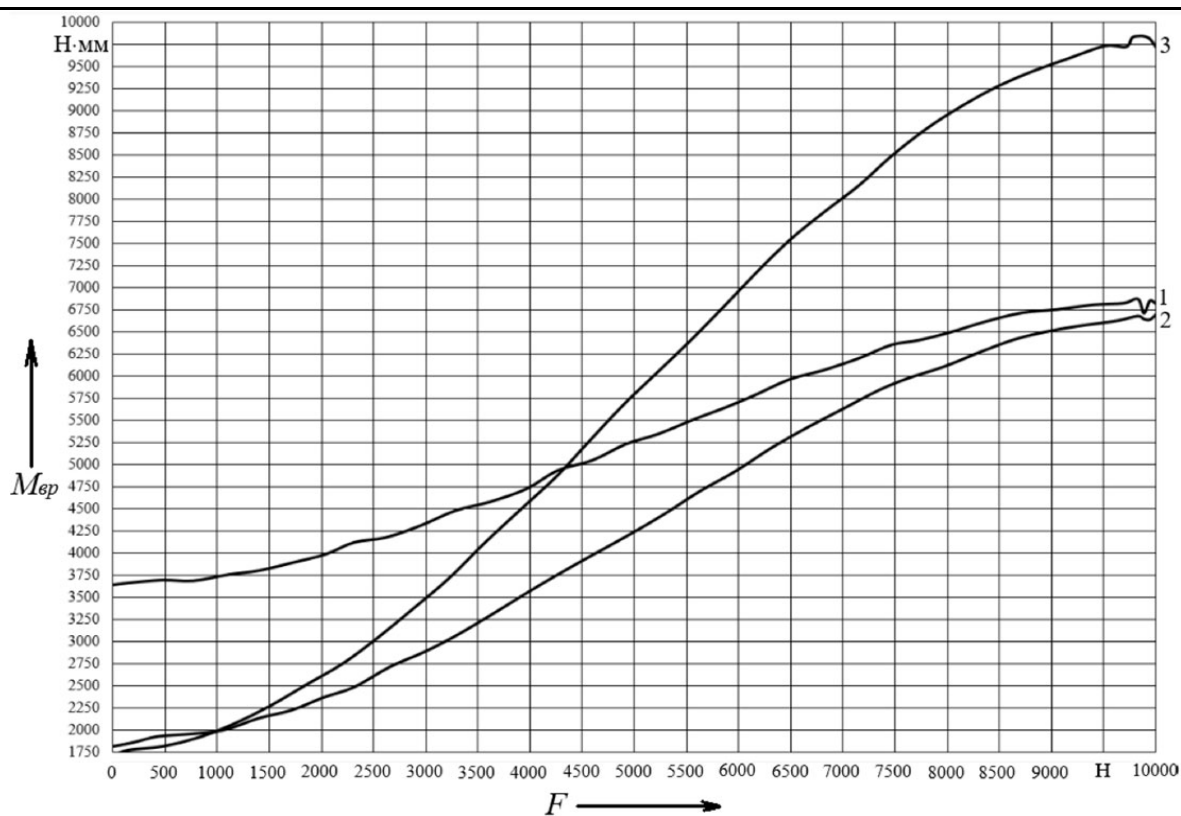


Рис. 8. Механический момент при $d = 22$ мм в зависимости от шага резьбы

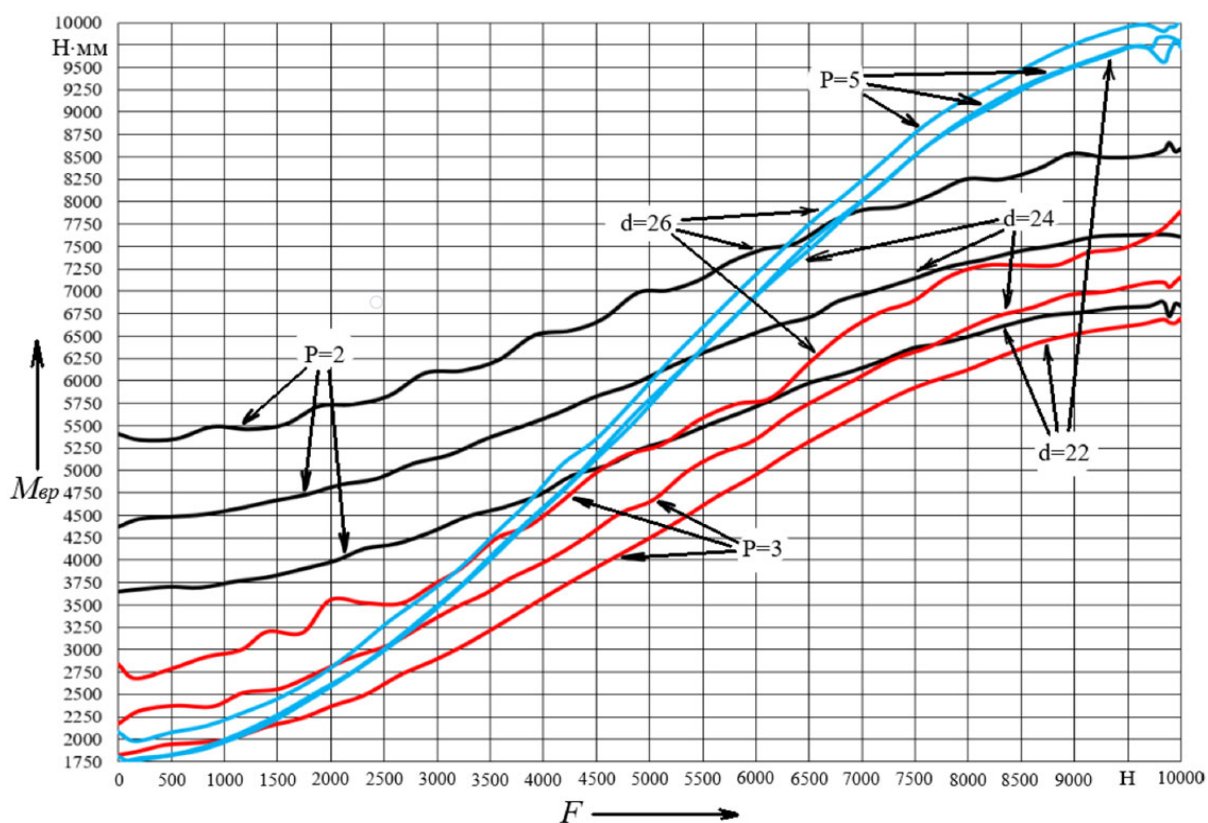


Рис. 9. Зависимость механического момента от усилия при вариации диаметра и шага резьбы



Заключение. В результате проведённых исследований были получены механические характеристики электропривода герметичной задвижки и описана их тенденция при изменении таких параметров, как габариты задвижки, полное давление на входе, скорость потока жидкости на выходе. Также затронута тема влияния номинального диаметра и шага резьбы на механический момент, необходимый для преодоления одной и той же силы сопротивления. Сделаны соответствующие выводы. Таким образом, имея данные результаты, можно получить механическую характеристику для любого привода такого типа в зависимости от его габаритов, давления и скорости потока. Для более точного определения было бы полезно получить аналитическую формулу, отразив в ней данные параметры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, В. А. Макаренко, Т. К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 44-50.
2. Колесник, М. Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 14-19.
3. Ivanov, S. N. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
4. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
5. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / М. Б. Колесник [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
6. Разработка электромеханической системы с резкопеременной нагрузкой / В. А. Дружинин [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 47-58.
7. Азимов, Х. Х. Алгоритмические основы исследования электромагнитных процессов в электроприводе герметичной задвижки / Х. Х. Азимов, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Российская Арктика. – 2024. – Т. 6. – № 1. – С. 14-25.
8. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-4 (55). – С. 43-47.
9. Колесник, М. Б. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, Ю. Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.
10. Andrianov, I. K. Optimization Model of Thermal Loading of Multilayer Shells Based on the Strength Criterion 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934017.
11. Bobkov, A. Features of Rotor Friction Losses Balancing in Centrifugal Electric-Driven Pumps for Spacecrafts Lecture Notes in Mechanical Engineering. P. 329-335. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_37.
12. Bobkov, A. Method of energy efficiency increase of low power radial impeller micromachines Lecture Notes in Mechanical Engineering (Issue 9783319956299), pp. 1895-1902. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_203.
13. Bormotin, K. S., Aung, W. Optimization of Panel Forming Processes in Creep Mode Using CAE-Technologies 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 4 January 2019, Article number 8602593. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602593.
14. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

Носков С. И., Овсянников И. В.
S. I. Noskov, I. V. Ovsyannikov

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ РИСКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ НЕЗАВИСИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

ESTIMATION OF PARAMETERS OF A PIECEWISE LINEAR RISK FUNCTION WITH NONLINEAR TRANSFORMATIONS OF INDEPENDENT VARIABLES

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); Россия, 664074, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems and Information Protection Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Овсянников Иван Владимирович – студент Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); Россия, 664074, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(950)087-23-14. E-mail: bidanocka@gmail.com.

Ivan V. Ovsyannikov – Student, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(950)087-23-14. E-mail: bidanocka@gmail.com.

Аннотация. В работе предложен алгоритмический способ построения кусочно-линейной функции риска с нелинейными преобразованиями независимых переменных. Этот способ сводится при задействовании метода наименьших модулей для идентификации неизвестных параметров к задаче линейно-булева программирования. Разработаны две версии функции риска для средних цен на жильё в России: обычная и с нелинейными преобразованиями предикторов. Вторая обладает значительно меньшей средней относительной ошибкой аппроксимации.

Summary. The paper proposes an algorithmic method of constructing a piecewise linear risk function with nonlinear transformations of independent variables. This method is reduced to a linear-Boolean programming problem when using the least moduli method to identify the unknown parameters. We have developed 2 versions of the risk function for average housing prices in Russia – the usual and with nonlinear transformations of predictors. The second one has a much smaller average relative approximation error.

Ключевые слова: регрессионная модель, кусочно-линейная функция риска, преобразования переменных, задача линейно-булева программирования, метод наименьших модулей, цены на жильё.

Key words: regression model, piecewise linear risk function, variable transformations, linear-Boolean programming problem, least modulus method, housing prices.

УДК 519.852

Введение. Исследование различных сложных систем, в том числе технических, с помощью методов математического моделирования, в частности регрессионного, часто сопровождается необходимостью анализа ситуаций, связанных с риском в самых разных его возможных трактовках, например оцениваемым уровнем опасности (безопасности). Так, в работе [13] с использованием моделей географически взвешенной логистической регрессии изучаются и анализируются пространственно-временные изменения вкладов факторов, вызывающих лесные пожары в Испании. Изучены несколько подмножеств возникновения пожаров, объединяющих причины (халатность/авария и поджог), сезон (лето-весна и зима-осень) и размер (<1 га, 1...100 га и >100 га). Полученные результаты свидетельствуют о том, что человеческий фактор теряет свою значимость, а климатические факторы выходят на первый план, что в конечном счёте может быть связано с



успехом проводимой в последнее время политики профилактики. Кроме того, обнаружены сильные различия в эффективности моделей возникновения пожаров в разных подмножествах, поэтому модели, основанные на долгосрочных исторических данных о пожарах, могут привести к ошибочным выводам. В [10] предложен метод построения нечёткой линейной регрессии, использующий данные реального времени для точного прогнозирования суточного пикового расхода воды для рек Боу и Локоть в Южной Альберте (Канада). В качестве независимой переменной использовался среднесуточный расход воды с задержкой в один, два, три или семь дней. При реализации модели был разработан уникальный гибридный подход, в котором пиковый расход рассматривался как вероятностный, а среднесуточный – как возможный. В статье [14] линейные регрессионные модели Блэка и Шоулза используются для анализа финансовых рисков морских перевозок.

Работа [12] посвящена применению методов регрессионного анализа для оценки риска подтопления городов из-за ливней с учётом шести пространственных факторов городских поверхностей: плотности населения, плотности дорог, расстояния до водных объектов, процента противодиффузионной поверхности, нормализованного индекса различий растительности и цифровой модели рельефа. Модель смогла объяснить риск подтопления в Ханое (Вьетнам) с уровнем достоверности 67,6 %. Этот результат очень важен при стратегическом планировании для предотвращения и контроля подтопления. Статья [6] основана на применении ранее разработанной авторами модели логистической регрессии для прогнозирования кредитного риска со стороны продавцов с целью его уменьшения в банковской сфере вследствие проявления мошеннических действий. В [7] модель логистической регрессии применяется к данным кредитного скоринга португальского финансового учреждения для оценки риска дефолта по потребительским кредитам. Было выявлено, что риск дефолта увеличивается в зависимости от размера кредита, срока кредита и возраста клиента, но снижается, если клиент владеет большим количеством кредитных карт. Кроме того, клиенты, получающие зарплату в том же банковском учреждении, где выдаётся кредит, имеют меньше шансов на неисполнение обязательств, чем клиенты, получающие зарплату в другом учреждении.

В статье [8] разработана упорядоченная модель логистической регрессии для обеспечения проверки качества оценок внутреннего контроля риска финансовых операций внутренними аудиторами и владельцами бизнеса. Результаты показывают, что предложенная модель может служить инструментом повышения эффективности аудита и обучения, который неспециалисты могут использовать для получения экспертных знаний. В [9] исследуются риски разрушения оползневых плотин. На основе японских данных в работе использовались метод логистической регрессии и техника складного ножа для определения важных геоморфических переменных, таких как максимальный расход (или площадь водосбора), высота плотины, её ширина и длина, влияющих на устойчивость оползневых плотин. В [11] рассматриваются нечёткие модели линейной регрессии с нечёткими входными данными. Разрабатываются модели нечёткой линейной регрессии, нейтральные к риску, не склонные к риску и стремящиеся к риску. Наконец, работа [15] посвящена разработке надёжной и эффективной оценке геологического риска и благоприятности залегания углеводородов для принятия значимого решения о разведке. В статье рассмотрены и обсуждены модели, имеющие отношение к оценке геологического риска и благоприятности, а также представлена процедура, основанная на логистической регрессии. В этом методе количественная логистическая регрессионная связь между наличием углеводородов и ключевыми геологическими факторами получается путём интеграции доступной геолого-геофизической информации и текущих результатов разведки. Это крайне важно для определения вероятности появления углеводородов в простой и понятной форме с более объективным и воспроизводящим результатом.

Расширение пространства переменных кусочно-линейной регрессионной функции риска. Традиционная форма этой функции имеет вид [1]:

$$y_k = \max(\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km}) + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая переменная; x_i – i -я независимая переменная; α_i – i -й подлежащий оцениванию параметр; ε_k – ошибки аппроксимации; k – номер наблюдения; n – число наблюдений (длина выборки). Будем считать все переменные модели (1) детерминированными и неотрицательными.

В модели (1) переменные имеют, как правило, негативный по отношению к исследуемому объекту смысл (уровень риска, величина убытка, уровень уязвимости, цены на ресурсы и т. д.). При этом в соответствии с её правой частью непропорциональное уменьшение значений одной независимой переменной (локального риска) не приведёт к уменьшению значения выходного фактора (глобального риска).

В [11] задача оценивания параметров модели (1) по методу наименьших модулей, т. е. путём минимизации функции потерь

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|$$

сведена к задаче линейно-булева программирования (ЛБП).

В работе [12] для кусочно-линейной регрессионной функции Леонтьева

$$y_k = \min(\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km}) + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n} \quad (2)$$

сформулирована задача назначения из некоторой совокупности элементарных преобразований

$$F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\}$$

лучшего преобразования для каждого предиктора в смысле минимума заданной функции потерь $J(\alpha)$. В качестве f_j могут выступать в том числе некоторые элементарные функции $\ln(x)$, $\exp(x)$, x^{-1} , x^2 , x^3 , \sqrt{x} и т. д. При этом $f_1(x) = x$. Тем самым осуществляется переход от кусочно-линейной регрессии (2) к функции Леонтьева с нелинейными предикторами:

$$y_k = \min(\bar{\alpha}_1 f_{j_1}(x_{k1}), \bar{\alpha}_2 f_{j_2}(x_{k2}), \dots, \bar{\alpha}_m f_{j_m}(x_{km})) + \bar{\varepsilon}_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где f_{j_i} – преобразование с номером j , оказавшееся лучшим в смысле минимума функции потерь $J(\alpha)$ для i -й объясняющей переменной. Очевидно, что регрессия (3) будет характеризоваться меньшими ошибками аппроксимации в смысле манхэттенской метрики, чем кусочно-линейная зависимость (2).

Задача перехода от регрессии (2) к зависимости (3) в [2] также сведена к задаче ЛБП следующим образом.

Сформируем следующие матрицы:

$$Z^j = \left\| z_{ki}^j \right\|, \quad j = \overline{1, p} \quad k = \overline{1, n} \quad i = \overline{1, m},$$

где $z_{ki}^j = f_j(x_{ki})$. Тогда задача ЛБП для построения регрессии (3) примет вид

$$d_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$d_k - \sum_{j=1}^g \beta_i^j z_{ki}^j \leq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^g \beta_i^j z_{ki}^j - d_k + M_1 \sigma_{ki} \leq M_1, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \sigma_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\beta_i^j - M_2 \delta_i^j \leq 0, \quad j = \overline{1, g}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^g \delta_i^j = 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$\beta_i^j \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, g}, \quad (10)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (11)$$

$$\delta_i^j \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, g}, \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + l \sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^m \beta_i^j \rightarrow \min, \quad (13)$$

где M_1 и M_2 – заранее заданные большие положительные числа; l – наперёд заданная малая положительная константа.

После решения задачи ЛБП (4) – (13) параметры модели (3) рассчитываются по формуле

$$\bar{\alpha}_i = \sum_{j=1}^g \beta_i^j,$$

при этом лучшее преобразование для i -й независимой переменной соответствует номеру j при $\delta_i^j = 1$.

Воспользуемся идеей преобразования модели (2) в модель с нелинейными предикторами (3) по отношению к кусочно-линейной функции риска с той же совокупностью преобразований $F(x)$, т. е. поставим задачу перехода от функции риска (1) к кусочно-линейной функции с нелинейными независимыми переменными:

$$y_k = \max(\bar{\alpha}_1 f_{j_1}(x_{k1}), \bar{\alpha}_2 f_{j_2}(x_{k2}), \dots, \bar{\alpha}_m f_{j_m}(x_{km})) + \bar{\varepsilon}_k, \quad k = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Используем при этом некоторые приёмы построения простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии [3].

Для сведения задачи построения кусочно-линейной функции риска с нелинейными независимыми переменными (14) к задаче ЛБП необходимо в задаче (4) – (13) заменить ограничения (5) и (6) соответственно на

$$d_k - \sum_{j=1}^g \beta_i^j z_{ki}^j \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (15)$$

и

$$\sum_{j=1}^g \beta_i^j z_{ki}^j - d_k \geq (\sigma_{ki} - 1)M_1, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Таким образом, для построения кусочно-линейной функции риска с нелинейными независимыми переменными (14) необходимо решить задачу ЛБП с ограничениями (4), (15), (16), (7) – (12) и целевой функцией

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) - l \sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^m \beta_i^j \rightarrow \min. \quad (17)$$

Заметим, что знак второго слагаемого в (17) противоположен (13), как это сделано в работе [4]. И вновь, как и ранее, после решения задачи ЛБП (4), (15), (16), (7) – (12), (17) параметры модели (14) рассчитываются по формуле

$$\bar{\alpha}_i = \sum_{j=1}^g \beta_i^j, \quad i = \overline{1, m},$$

а лучшее преобразование для i -й независимой переменной соответствует номеру j при $\delta_i^j = 1$.

Численный пример. Воспользуемся описанным выше способом построения кусочно-линейной функции риска с нелинейными независимыми переменными для построения регрессионной модели цен на жильё. В качестве исходных данных используем поквартальную статистическую информацию за период с первого квартала 2017 г. по четвёртый квартал 2020 г. [5].

Введём обозначения: y – средняя цена квадратного метра общей площади на рынке квартир в России, р./м²; x_1, x_2, x_3, x_4 – соответственно средние цены на силикатные блоки, железобетонные плиты перекрытий и песчано-гравийные смеси, р./м².

Обычная кусочно-линейная функция риска (1), построенная на основе ретроспективных данных, примет вид

$$y = \max(17.13x_1, 7.89x_2, 13.79x_3, 67.47x_4), \quad (18)$$

$$E = 3.85 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 4, 3, 3, 2, 2, 2, 4, 2, 2),$$

где E – средняя относительная ошибка аппроксимации; λ – вектор срабатываний, где λ_k указывает на номер независимой переменной, на которой максимум в модели (18) «сработал» в k -м наблюдении.

Теперь построим модель (14), включив в совокупность $F(x)$ четырнадцать степенных, показательных и логарифмических преобразований:

$$y = \max(16132.4 \log_{10} x_1, 0.089x_2^{1.5}, 13.79x_3, 67.47x_4), \quad (19)$$

$$E = 3.15 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 4, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2).$$

Сравнение кусочно-линейных функций риска (18) и (19) показывает, что вторая существенно точнее первой по критерию E . При этом в обеих моделях, судя по значениям вектора срабатываний, цена квадратного метра жилья в основном зависит от цены на железобетонные плиты перекрытий – максимум в моделях (18) и (19) на переменной x_2 сработал в одиннадцати наблюдениях из шестнадцати.

Приведём ещё несколько пар кусочно-линейных функций риска (1) и (14) с разными наборами регрессоров среди x_1, \dots, x_4 , подтверждающих тезис о большей точности второй из них:

$$y = \max(17.14x_1, 7.95x_2, 13.80x_3),$$

$$E = 4.35 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2),$$

$$y = \max(0.32x_1^{1.5}, 14921.4 \log_{10} x_2, 0.22x_3^{1.5}),$$

$$E = 3.44 \%, \lambda = (2, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 3, 3),$$

$$y = \max(17.06x_1, 7.95x_2, 67.47x_4),$$

$$E = 4.08 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2),$$

$$y = \max(16066.5 \log_{10} x_1, 0.087x_2^{1.5}, 20756.33 \log_{10} x_4),$$

$$E = 3.18 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2),$$

$$y = \max(18.06x_1, 14.54x_3, 67.47x_4),$$

$$E = 4.42 \%, \lambda = (2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2),$$

$$y = \max(16739.59 \log_{10} x_1, 0.223x_3^{1.5}, 2.045x_4^{1.5}),$$

$$E = 3.16 \%, \lambda = (2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2).$$

Заметим, что фактор x_1 в последней модели не «сработал» ни разу.



Закключение. В работе предложен способ построения кусочно-линейной функции риска с нелинейными независимыми переменными, сводящийся в случае применения метода наименьших модулей для вычисления оценок параметров к задаче линейно-булева программирования. Построены обычная функция риска и её аналог с нелинейными предикторами для средних цен на жильё в Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носков, С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска / С. И. Носков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 417-421.
2. Носков, С. И. Подход к построению функции Леонтьева с нелинейными предикторами / С. И. Носков, Е. С. Попов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 105-108.
3. Носков, С. И. Идентификация параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 57-61.
4. Уточнение способов идентификации параметров некоторых кусочно-линейных регрессий / С. И. Носков, М. С. Жукова, Т. К. Кириллова, Ю. О. Купитман, А. А. Хоняков // Научные труды КубГТУ. – 2023. – № 2. – С. 75-81.
5. Носков, С. И. Применение функции риска для модельного описания колебания цен на рынке недвижимости / С. И. Носков, А. А. Хоняков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 3 (37). – С. 77-82.
6. Agarwal, N.; Sharma, M. Vikalpa: The Journal for Decision Makers, 39 (3), 2014. – P. 67-76.
7. Costa, E.; Cristina, I.; Correia, A.; Fariac, S. Journal of Applied Statistics, 47, 2020. – P. 2879-2894.
8. Issa, H.; Kogan, A. Journal of Information Systems, 28 (2), 2014. – P. 209-229.
9. Jia-Jyun, D.; Yu-Hsiang, T.; Chien-Chih, C.; Jyh-Jong, L.; Yii-Wen, P. Engineering Geology 117 (1-2). 2011. – P. 52-61.
10. Khan, U.; Valeo, C. Journal of Environmental Informatics, 2016.
11. Modarres, M.; Nasrabadi, E.; Mehdi Nasrabadi, M. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. Vol. 12 (5), 2004. – P. 635-649.
12. Tran, D.; Xu, D.; Dang, V.; Alwah, A. Water, 12 (3), 2020. – 879 p.
13. Rodríguez, M.; Jiménez-Ruano, A.; Peña-Angulo, D.; Fernández, J., Journal of Environmental Management, 225, 2018. P. 177-192.
14. Yazır, D.; Şahin, B. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 11 (4), 2017. – P. 635-640.
15. Zhaoqun, Z.; Chengyan, L.; Xianguo, Z.; Kai, W.; Jingjing, X.; Sudong, W. Marine and Petroleum Geology, 92, 2018. – P. 65-77.

Петрова А. Н., Фролов Д. О.
A. N. Petrova, D. O. Frolov

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОИСКА В НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

OPTIMIZING SEARCH IN SCIENTIFIC PUBLICATIONS USING DEEP LEARNING

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Technical Sciences, Head of the Department «Design, Management and Development of Information Systems», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. В статье представлен новый подход к автоматическому поиску в научных данных, основанный на использовании модели рекуррентной свёрточной нейронной сети. С учётом увеличения объёма научных публикаций и сложности выбора алгоритмов данный метод направлен на улучшение автоматического обнаружения и анализа алгоритмов, предложенных в текстах научных статей. В рамках работы описаны два ключевых модуля: первый из них направлен на обнаружение псевдокода с применением Multi-Layer Perceptron, а второй – на извлечение целевых текстовых строк, содержащих информацию об эффективности алгоритмов, с использованием Region-based Convolutional Neural Network. Оба модуля реализованы в фреймворке PyTorch, а для обработки данных используется метод встраивания слов. Проанализированы методы автоматического извлечения элементов документа, таких как псевдокод, таблицы, рисунки и графики, а также предложен способ создания краткого текста для улучшения понимания их содержания. Описана система поиска алгоритмов, которая включает создание синопсиса, индексирование документов и использование современного метода поиска для ранжирования результатов. Экспериментальная часть демонстрирует, что улучшенная модель машинного обучения существенно превосходит базовую модель по всем ключевым метрикам: точность возросла с 75,95 до 98,8 %, запоминаемость увеличилась с 71,02 до 97,9 %. Результаты подчёркивают значительный вклад предложенного метода в автоматизацию поиска и анализа научных данных, что может значительно облегчить процесс выбора и оценки алгоритмов в научных исследованиях.

Summary. The paper presents a new approach to automatic search in scientific data based on the use of a recurrent convolutional neural network model. Taking into account the increase in the volume of scientific publications and the complexity of choosing algorithms, this method is aimed at improving the automatic detection and analysis of algorithms proposed in the texts of scientific articles. The work describes 2 key modules: the 1st of them is aimed at detecting pseudocode using Multi-Layer Perceptron, and the 2nd is aimed at extracting target text strings containing information about the efficiency of algorithms using Region-based Convolutional Neural Network. Both modules are implemented in the PyTorch framework, and the word embedding method is used for data processing. The methods for automatic extraction of document elements such as pseudocode, tables, figures, and graphs are analyzed, and a method for creating a short text for improving the understanding of their content is proposed. The algorithm search system is described, which includes synopsis creation, document indexing, and the use of a modern search method for ranking results. The experimental part demonstrates that the improved machine learning model significantly outperforms the baseline model in all key metrics: accuracy increased from 75.95% to 98.8%, memorability increased from 71.02% to 97.9%. The results highlight the significant contribution of the proposed method to the automation of scientific data search and analysis, which can significantly facilitate the process of selecting and evaluating algorithms in scientific research.



Ключевые слова: автоматический поиск, научные данные, рекуррентная свёрточная нейронная сеть, машинное обучение, обнаружение псевдокода, семантические метаданные, встраивание слов.

Key words: automatic search, scientific data, recurrent convolutional neural network, machine learning, pseudo-code detection, semantic metadata, word embedding.

УДК 517.95

Введение. В последние десятилетия учёные предлагали алгоритмы для решения вычислительных задач, которые затем применялись в других областях. Например, алгоритмы для выравнивания биопоследовательностей и обнаружения частых закономерностей изначально создавались для других задач. В связи с ростом объёма научных данных выбор подходящего алгоритма становится сложной задачей.

Научные данные содержат сотни тысяч статей, многие из которых предлагают новые алгоритмы. Существуют методы поиска алгоритмов на основе метаданных, но они не учитывают специфические функции, такие как временная сложность. Поиск подходящего алгоритма часто основывается на опыте человека, а не на систематическом анализе данных.

Автоматический поиск алгоритмов в научных данных – непростая задача, требующая анализа как текста, так и элементов документа, таких как таблицы и графики. Традиционные методы не справляются с задачей извлечения информации о результатах и эффективности алгоритмов. В статье представлен улучшенный подход на основе машинного обучения для обнаружения алгоритмов, который достигает 96,5 % точности.

Обнаружение элементов документа. Извлечение элементов документа, таких как псевдокод, таблицы, рисунки и графики, из цифровых статей способствует обобщению результатов, описанию инструкций и визуализации идей. Автоматическое извлечение и индексирование этих элементов открывают новые возможности для применения в интеллектуальном анализе данных. Методы оптического распознавания символов и компьютерного зрения, такие как системы для автоматического извлечения научных изображений, позволяют извлекать результаты из графических объектов и эффективно индексировать их для поиска.

Научные библиотеки, такие как «Многопрофильный научный журнал», публикуемый Public Library of Science, и «Цифровая библиотека и поисковая система для научных публикаций», поддерживают поиск по таблицам и рисункам, но не предоставляют текстовое обобщение содержимого этих элементов. Для решения этой задачи был предложен метод автоматического создания краткого текста, описывающего элемент документа, что помогает пользователям лучше понять его релевантность их информационным запросам.

Система поиска алгоритмов использует машинное обучение для автоматического извлечения и индексирования псевдокода в текстовых документах, создавая метаданные для поиска по запросам пользователей. Хотя точность обнаружения псевдокода в такой системе достаточна для практического использования, она может быть улучшена. Для этого была предложена улучшенная техника машинного обучения на основе нейронных сетей Multi-Layer Perceptron.

Нейронные сети для анализа текста. Развитие глубоких нейронных сетей и методов обучения представлению способствовало решению проблемы разреженности данных и улучшению понимания словарных представлений. Встраивание слов позволяет оценивать семантическую связанность, и предварительно обученные встраивания вместе с глубокими нейронными сетями доказали свою высокую эффективность в задачах обработки естественного языка и текстовой классификации. Для определения семантической связанности в научных текстах модели на основе Region-based Convolutional Neural Network (RCNN) особенно важны для текстовой классификации и обнаружения перефразирования. RCNN используется для выделения строк текста, где обсуждаются алгоритмы с точки зрения их эффективности (точности и полноты).

Извлечение семантических данных. На рис. 1 описывается подход к извлечению семантических метаданных. Он состоит из двух подмодулей. Первый модуль улучшает существующий

алгоритм обнаружения псевдокода с использованием нейронной сети, обученной на 15 функциях документа, и обеспечивает более высокую точность. Второй модуль – обнаружение оценочных метрик (определение метрик оценки) – извлекает строки текста, содержащие обсуждение алгоритмов и экспериментов, основанных на оценочных метриках. Второй модуль использует сегментацию документов для извлечения соответствующих разделов и определяет целевые строки с помощью Region-based Convolutional Neural Network, обученного на вручную размеченном наборе данных.

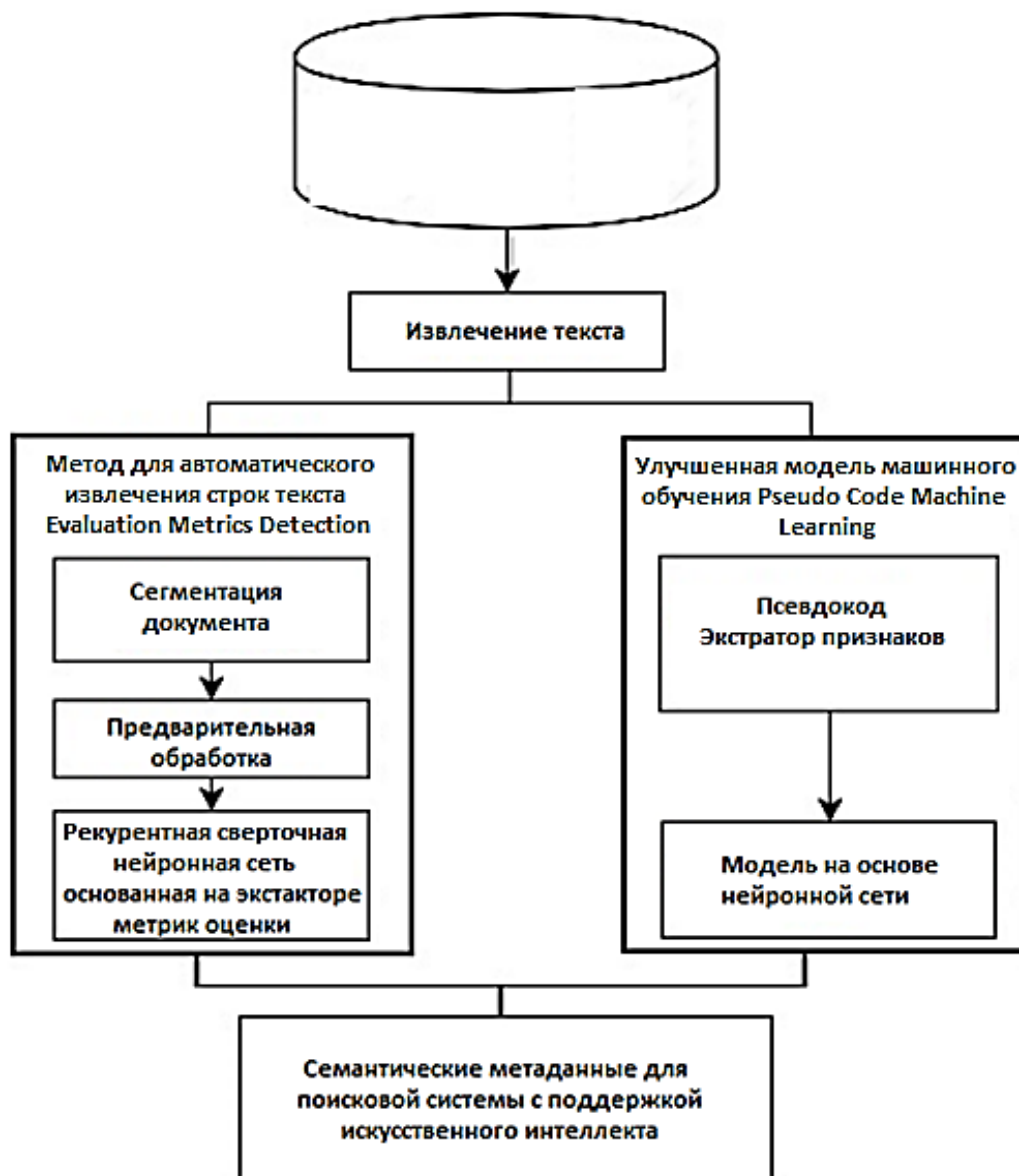


Рис. 1. Подход к извлечению семантических метаданных

Модель нейронной сети на основе глубокого обучения. На рис. 2 представлена структура Region-based Convolutional Neural Network. Эта модель использует слова и контекст в качестве представлений слов. Двухнаправленная Region-based Convolutional Neural Network применяется для захвата контекста слов.

Для левого и правого контекста слова w_i вычисляются векторы $c_r(w_i)$ и $c_l(w_i)$ с использованием специального уравнения

$$c_l(w_i) = f((w^{(l)})c_l(w_{i-1}) + (w^{(sl)})e(w_{i-1})),$$

где $w^{(l)}$ служит для преобразования контекста между скрытыми слоями, а $w^{(st)}$ объединяет контекст левого слова с текущим словом. Вектор $e(w_{i-1})$ представляет собой встраивание предыдущего слова w_{i-1} с элементами вещественного значения, в то время как $c_l(w_{i-1})$ обозначает левый контекст этого слова.

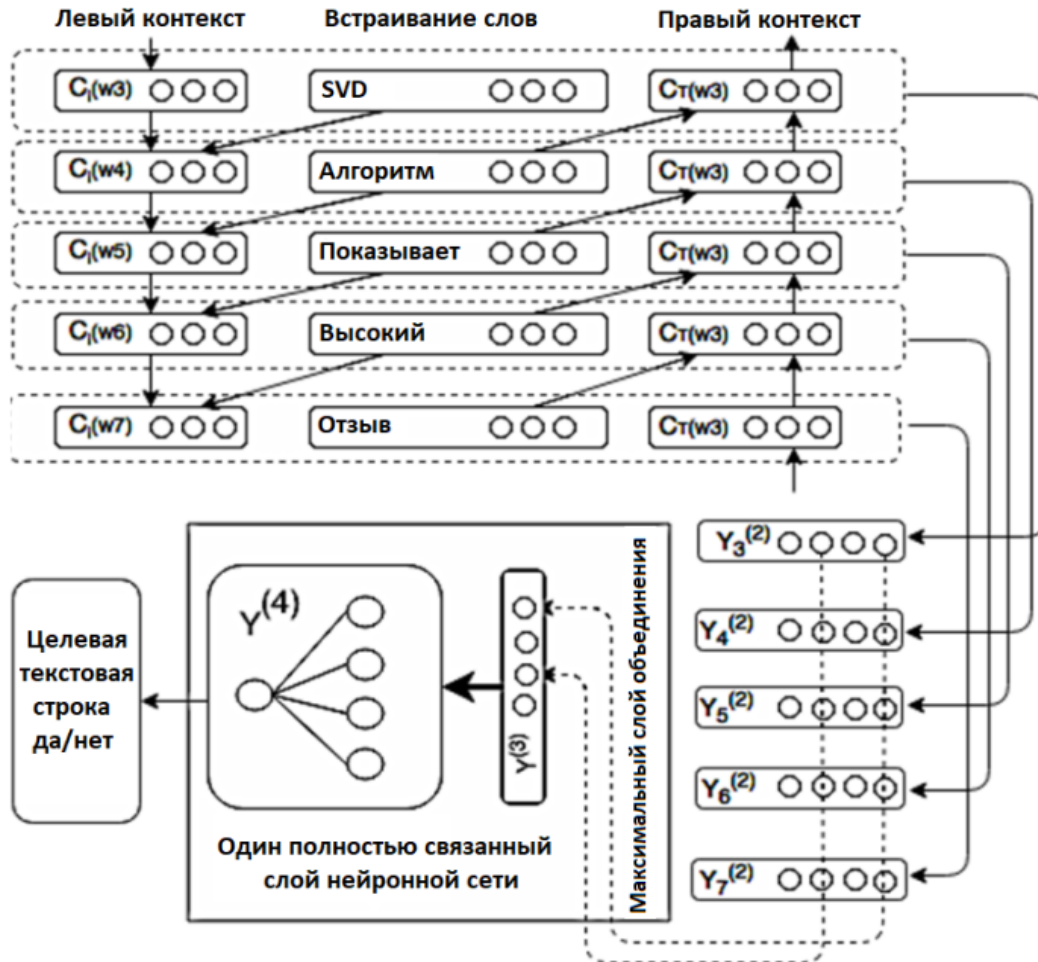


Рис. 2. Структура сети Region-based Convolutional Neural Network, включающая индексы, которые обозначают положение каждого слова в предложении

Аналогичным образом вычисляется $c_r(w_i)$:

$$c_r(w_i) = f((w^{(r)})c_r(w_{i-1}) + (w^{(sr)})e(w_{i-1})).$$

На рис. 2 вектор $c_l(w_7)$ включает контекст и семантику всех левых слов в форме кодировок. Левый контекст сети – алгоритм разложения сингулярных значений (Singular Value Decomposition) – демонстрирует высокий уровень взаимодействия со всеми предыдущими словами предложения. Аналогично $c_r(w_7)$ содержит правый контекст.

Представление слова w_i формируется путём объединения левого и правого контекстов:

$$x_i = [c_l(w_i); e(w_i); c_r(w_i)].$$

Модель получает все значения c_l и c_r при прямом и обратном проходах соответственно. После изучения представления слова в x_i было применено линейное преобразование с функцией активации \tanh , чтобы добавить некоторую нелинейность:

$$y_i^{(2)} = \tanh(W^{(2)}x_i + b^{(2)}),$$

где $y_i^{(2)}$ представляет скрытый семантический вектор, который включает в себя наиболее значимые и мощные факторы для представления текста, анализируя каждый семантический компонент.

Модель также включает слой максимального пула, как показано в сетевой архитектуре на рис. 2. Слой объединения преобразует текст разной длины в вектор фиксированной длины, что помогает выделить наиболее важную информацию во всём тексте.

Таким образом, после изучения представления всех слов был использован слой максимального пула:

$$y^{(3)} = \max_{i=2}^n y_{(i)}^{(2)},$$

где функция \max применяется поэлементно и максимум k -го элемента $y_{(i)}^{(2)}$ находится в k -й позиции $y^{(3)}$.

Модель включает один полностью связанный скрытый слой, который служит выходным слоем:

$$y^{(4)} = W^{(4)} y^{(3)} + b^{(4)}.$$

Наконец, была применена сигмовидная функция активации, чтобы получить число вероятности:

$$p_{(i)} = \frac{\exp(y_k^4)}{1 + \exp(y_k^4)}.$$

Обучение модели RCNN. Для обучения модели RCNN первоначально были определены все параметры модели для обучения Θ :

$$\Theta = \{E, b^{(2)}, b^{(4)}, c_l(w_1), c_r(w_n), W^{(2)}, W^{(4)}, W^{(l)}, W^{(r)}, W^{(sl)}, W^{(sr)}\},$$

где векторы $b^{(2)}, b^{(4)}$ являются значимыми векторами, а E – вещественные вложения слов, тогда как $W^{(2)}, W^{(4)}, W^{(l)}, W^{(r)}$ и $W^{(sl)}, W^{(sr)}$ представляют собой преобразования матрицы и $c_l(w_1), c_r(w_n)$ – начальные вектора вещественного значения левого и правого контекста. Целью было максимизировать вероятность (логарифм правдоподобия) относительно Θ .

Далее для оптимизации процесса обучения использовался стохастический градиентный спуск:

$$\Theta \rightarrow \sum_{c \in D} \log p(class_c | D, \Theta),$$

где D представляет собой набор документов, а $class_c$ обозначает положительный класс текстовых данных.

В качестве представления слов было применено встраивание на основе модели для обработки естественного языка (NLP). Поскольку набор данных страдал от проблемы дисбаланса классов, были использованы следующие методы для балансировки модели:

- случайная избыточная выборка, при которой примеры класса меньшинства случайным образом дублируются до достижения равенства классов;
- случайная недостаточная выборка, при которой примеры большинства класса случайным образом удаляются до тех пор, пока оба класса не станут равными.

Для обучения использовались 68 % данных, а для тестирования – 32 %, как и в модели Pseudo Code Machine Learning. После применения методов балансировки у нас оказалось 4337 положительных образцов (целевые строки) и 4770 отрицательных образцов (строки, не содержащие информации об эффективности алгоритма). Наконец, были скорректированы гиперпараметры сети, такие как размер скрытого слоя N (до 100), скорость обучения (до 0,001), размер словаря V (до 3000) и количество эпох обучения (до 100).

Поисковая система с автоматическим поиском в научных данных. Разработанная поисковая система также включает в себя поддержку искусственного интеллекта. В поисковой системе выполняются важные ключевые этапы:



- создание синопсиса для каждого документа с применением улучшенной модели машинного обучения и методики определения оценочных метрик;
- стандартное индексирование как синопсиса, так и полнотекстовых документов;
- использование современного метода поиска для ранжирования результатов на основе пользовательских запросов и проведения сравнительного анализа.

Эксперимент. Эксперименты состояли из двух ключевых модулей:

1. обнаружение псевдокода с использованием нейронной сети Multi-Layer Perceptron;
2. обнаружение целевых текстовых строк (содержащих информацию об эффективности алгоритма) с использованием Region-based Convolutional Neural Network. Для реализации Region-based Convolutional Neural Network был использован фреймворк PyTorch.

Набор данных включал 327 научных статей. Для обоих модулей использовался одинаковый набор данных, что позволило провести сравнение между базовой моделью и улучшенной моделью машинного обучения. В нашем наборе данных, содержащем около 41 240 текстовых строк, только 7,1 % представляет собой целевой текст, передающий информацию об эффективности соответствующего алгоритма.

Сравнение моделей машинного обучения. Индексы стандартной точности, полноты, f -меры и точности используются для оценки как обнаружения псевдокода, так и обнаружения целевых текстовых строк.

В табл. 1 представлено сравнение базовой версии модели машинного обучения и улучшенной модели для обнаружения псевдокода. Результаты показали, что улучшенная модель, использующая Multi-Layer Perceptron, превзошла базовую модель по всем показателям. С улучшенной моделью была достигнута точность 98,8 %, в то время как базовая модель показала результат 75,95 %, что на 27 % хуже. Также наблюдается значительное улучшение в других метриках: запоминаемость возросла с 71,02 до 97,9 %, точность – с 76,52 до 98,2 %, а общий показатель $f1$ – с 76,25 до 97,1 %.

Таблица 1

Показатели сравнения моделей машинного обучения

Метод	Запоминаемость	Точность	Общий показатель
Базовая модель машинного обучения	71,02	76,52	76,25
Улучшенная модель машинного обучения	97,9	98,2	97,1

Заключение. В данной статье представлен новый подход к автоматическому поиску алгоритмов в научных данных, использующий модель рекуррентной свёрточной нейронной сети. Предложенный метод эффективно решает проблему выбора подходящих алгоритмов из множества научных статей и учитывает как текстовые, так и визуальные элементы документа.

Разработанные модули для обнаружения псевдокода и целевых текстовых строк показали значительное улучшение по сравнению с базовыми моделями. Использование Multi-Layer Perceptron для обнаружения псевдокода и Region-based Convolutional Neural Network для извлечения информации об эффективности алгоритмов продемонстрировало высокую точность и эффективность. Применение встраивания слов и методов балансировки классов обеспечило надёжность и стабильность модели.

Результаты экспериментов подтверждают, что улучшенная модель машинного обучения значительно превосходит базовые подходы: увеличение точности на 27 % и существенное улучшение других метрик. Эти достижения подчёркивают потенциал предложенной системы в улучшении автоматизации поиска и анализа алгоритмов, что может значительно облегчить работу исследователей, занимающихся обработкой больших объёмов научной информации.

Данный подход открывает новые возможности для интеграции интеллектуального анализа данных в поисковые системы, способствуя более точным и эффективным извлечению и оценке информации из научных публикаций. В будущем предполагается дальнейшее развитие методов и

технологий, что может привести к улучшению качества автоматического поиска и анализа данных в различных областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet Allocation. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 993-1022.
2. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of NAACL-HLT 2019*.
3. Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press.
4. Joulin, A., Mikolov, T., Grave, E., Bojanowski, P., Mikolov, T., & Tsvetkov, A. (2017). Bag of Tricks for Efficient Text Classification. *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*.
5. Chen, J., & Zhou, Y. (2016). A Survey on Deep Learning for Data Mining. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*.
6. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*.
7. Liu, X., & Zhang, J. (2020). Deep Learning for Text Classification: A Comprehensive Review. *Journal of Computer Science and Technology*, 35 (5), 923-950.
8. Kumar, V., & Ailawadhi, A. (2020). Deep Learning-Based Text Representation for Document Retrieval. *Journal of Computational Information Systems*, 16 (7), 129-141.
9. Liu, Y., & Zhang, X. (2019). A Survey of Text Mining Techniques and Applications. *Information Processing & Management*, 56 (5), 1035-1060.
10. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (2015). Learning to Learn Using Gradient Descent. *Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning (ICML)*.
11. Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. (2014). Sequence to Sequence Learning with Neural Networks. *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*.
12. Ghani, R., & Le, M. T. (2020). Improving Search Performance with Deep Learning Models. *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*.
13. Yin, P., & Yao, X. (2021). Transfer Learning for Natural Language Processing: A Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54 (2), 1-35.
14. Xia, Y., & Li, X. (2018). Deep Neural Networks for Document Classification and Search. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 30 (10), 1892-1905.
15. Zhang, C., & Li, W. (2020). A Comprehensive Review of Deep Learning-Based Text Mining Techniques. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 11 (4), 1-30.

Стельмаков В. А., Федорченко С. К.
V. A. Stelmakov, S. K. Fedorchenko

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫКРАШИВАНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЁРЕН
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ**

**STUDY OF ABRASIVE GRINDING WHEEL GRIT ABRASION PROCESS DURING
CENTERLESS GRINDING**

Стельмаков Вадим Александрович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); Россия, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: stelmakov_92@mail.ru.

Vadim A. Stelmakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Pacific State University (Russia, Khabarovsk); Russia, 680035, Khabarovsk, 136 Pacific Street. E-mail: stelmakov_92@mail.ru.

Федорченко Сергей Константинович – аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: s.k.fedor@mail.ru.

Sergey K. Fedorchenko – Post-Graduate Student, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: s.k.fedor@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены различные марки шлифовальных кругов, используемых при бесцентровом шлифовании, на предмет выкрашивания и разрушения абразивных зёрен. В ходе работы был проведён ряд экспериментальных исследований, в ходе которых было установлено, что у каждого из исследованных абразивных инструментов имеется своя интенсивность разрушения зёрен, доля вырванных зёрен из связки, свой уровень вовлечения объёмов инструментального материала в разрушение и свой механизм разрушения материала в целом.

Summary. In this paper, different grades of grinding wheels used in centerless grinding are examined for abrasive grain pitting and fracture. In the course of the work, a number of experimental studies were conducted, during which it was found that each of the studied abrasive tools has its own intensity of grain fracture, the proportion of torn grains from the bond, its own level of involvement of volumes of tool material in the destruction and its own mechanism of material destruction in general.

Ключевые слова: шлифование, бесцентровое шлифование, экспериментальные исследования, выкрашивание, абразивное зерно.

Key words: grinding, centerless grinding, experimental studies, abrasion, abrasive grain.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEME-2024-0010).

УДК 621.9

В крупносерийном и массовом производстве широко используется и в качестве предварительного метода обработки, и в качестве финишной обработки прецизионных деталей бесцентровое шлифование [3]. Этот метод обработки характерен очень высокой производительностью и очень высокой экономической точностью операционных размеров. Исходя из анализа технической литературы, бесцентровое шлифование надёжно обеспечивает точность диаметральных размеров и шероховатость обработанной поверхности [2; 3].

Развитие современной машиностроительной отрасли предъявляет повышенные требования к точности и качеству обработки исполнительных поверхностей деталей [4; 5]. Для специального машиностроения и оборонной промышленности растут требования к качеству процессов шлифо-

вания, в том числе к процессу бесцентрового шлифования [6–11]. Общее представление о схеме бесцентрового шлифования даёт рис. 1.

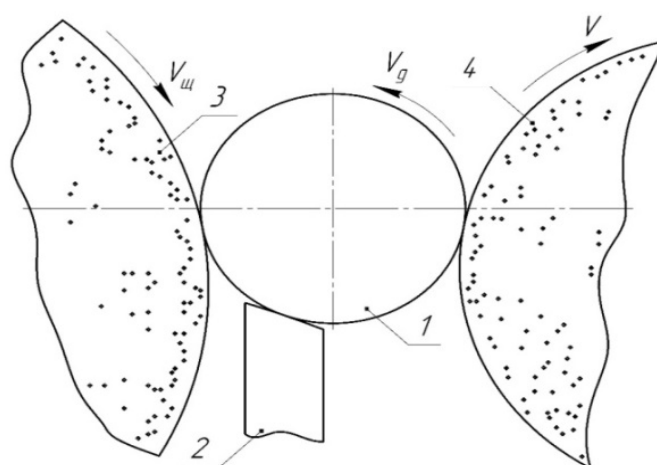


Рис. 1. Схема бесцентрового шлифования: 1 – шлифуемая заготовка детали; 2 – нож опорный; 3 – абразивный инструмент; 4 – ведущий круг

Требования, оговариваемые чертежами деталей, высокие. Пример таких требований по точности диаметра и шероховатости поверхности после операции шлифования показан на рис. 2 для двух разных деталей.

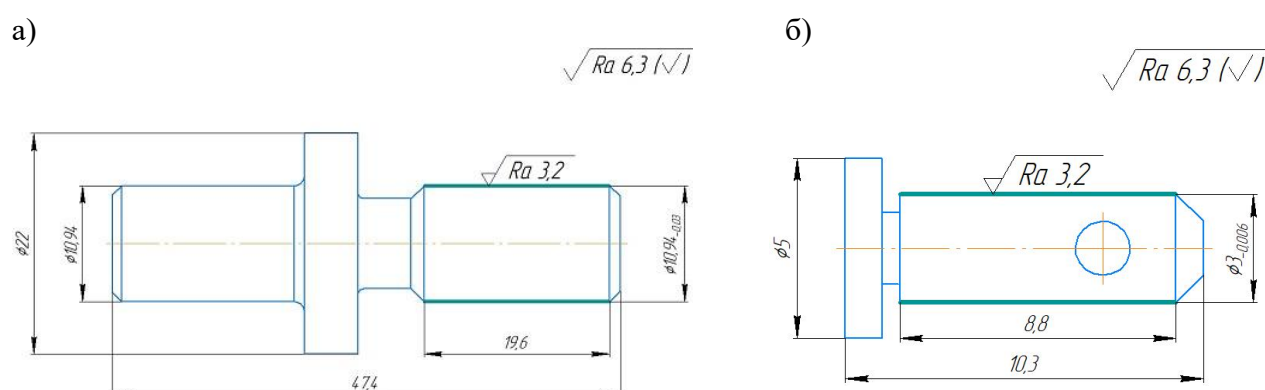


Рис. 2. Эскизы деталей: а – штырь; б – валик

Имеются детали, у которых требования по шероховатости ещё более высокие, например, по параметру $Ra\ 1,25$. При этом предъявляются требования по исключению прижога материала деталей. В таких условиях встают задачи по обеспечению правильного выбора абразивного инструмента. Однако даже при условии правильных марки абразивного инструмента и его характеристик стоит вопрос о частоте выполнения правки абразивного инструмента, иначе выдержать требования чертежа по точности диаметрального размера на всей длине шлифуемой поверхности не представляется возможным. Таким образом, целью данной работы является исследование процесса выкрашивания абразивных зёрен из инструмента с целью установления факторов, влияющих на продолжительность работы инструмента до выполнения правки. С этих позиций ниже приведены некоторые результаты такого исследования состояния абразивных режущих инструментов в ходе их эксплуатации.

Исследование характера разрушения и выкрашивания зёрен разных абразивных инструментов выполнено и документировано на мультисенсорном измерительном центре модели

Mikro Vu Sol 161, обеспечивающем точность измерения до 0,001 мм. Внешний вид такой системы показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид мультисенсорного измерительного центра модели Mikro Vu Sol 161

Для пояснения обозначений абразивных инструментов (обозначения по ГОСТ Р 52781-2007), используемых в проведённом исследовании, ниже показан пример абразивного инструмента марки 1 350x100x203 25A с параметрами:

1. F60 O6V;
2. F80 O6V;
3. F60 Q6V;
4. F80 N7V.

Параметр 25A указывает материал абразивных зёрен (электрокорунд белый). Приведённые здесь обозначения следующие:

Для 1 350x100x203: 1 – прямая форма шлифовального круга; 350 – наружный диаметр круга, мм; 100 – ширина круга, мм; 203 – внутренний диаметр круга, мм.

Для параметров F60 O6V, F80 O6V, F60 Q6V и F80 N7V:

– F60 O6 и F60 Q6 – электрокорунд белый с зёрнами, имеющими размер основной фракции 250 мкм;

– F80 O6 и F80 N7 – средний размер основной фракции 160 мкм.

Символ Q6 означает: Q – твёрдость (на две позиции твёрже, чем в круге с твёрдостью O).

Символ N7 означает: N – твёрдость, средняя; 7 – структура средняя, более открытая, по сравнению с 6.

Символ V обозначает, что связка в шлифовальном круге (абразивном инструменте) вулканическая.

На рис. 4 показаны примеры фотографий разрушения абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 O6V после 20 минут его работы.

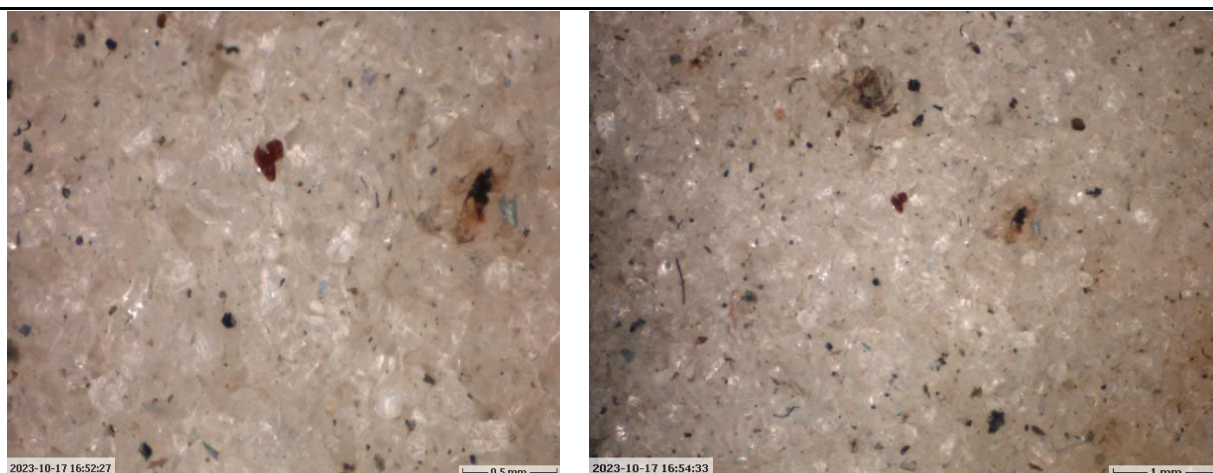


Рис. 4. Фотографии структуры абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 O6V при разных увеличениях (указаны в правых нижних углах фото)

Из рис. 4 следует, что часть абразивных зёрен отсутствует (вырваны из керамической связки) полностью (это тёмные пятна на фото), большая часть зёрен разрушена сколом (бледно-белые пятна на фото). В выполнении численного анализа тех и других зёрен не было необходимости.

На рис. 5 показано фото разрушения абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 O6V после 20 минут его работы.

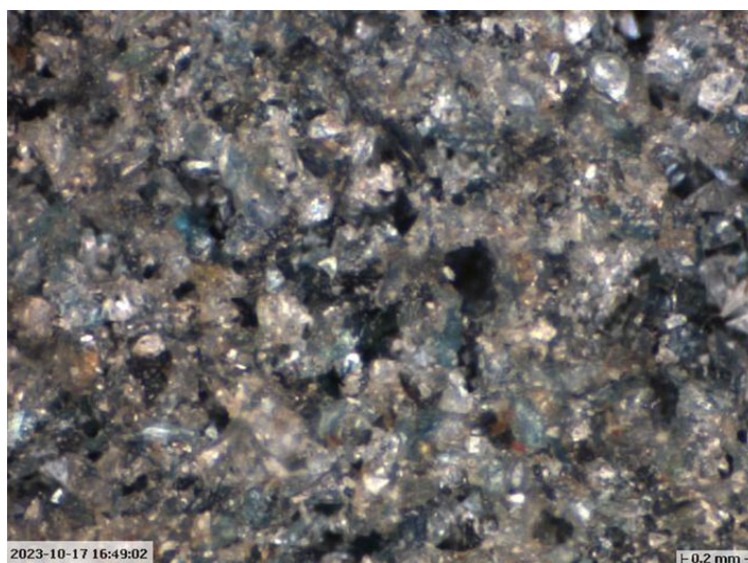


Рис. 5. Фотографии структуры абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 O6V в процессе его эксплуатации в течение 20 мин

Из рис. 5 следует, что часть зёрен вырвана (чёрные пятна), часть зёрен сколота (белый цвет), остальные зёрна оголены. Данный факт значительно отличает рис. 4 и 5.

Структура разрушения режущего инструмента с характеристиками 25A F60 O6V во многом схожа со структурой, показанной ниже на рис. 6 (абразивный инструмент с характеристиками 25A F80 N7V), но масштаб разрушения абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 O6V значительно больше.

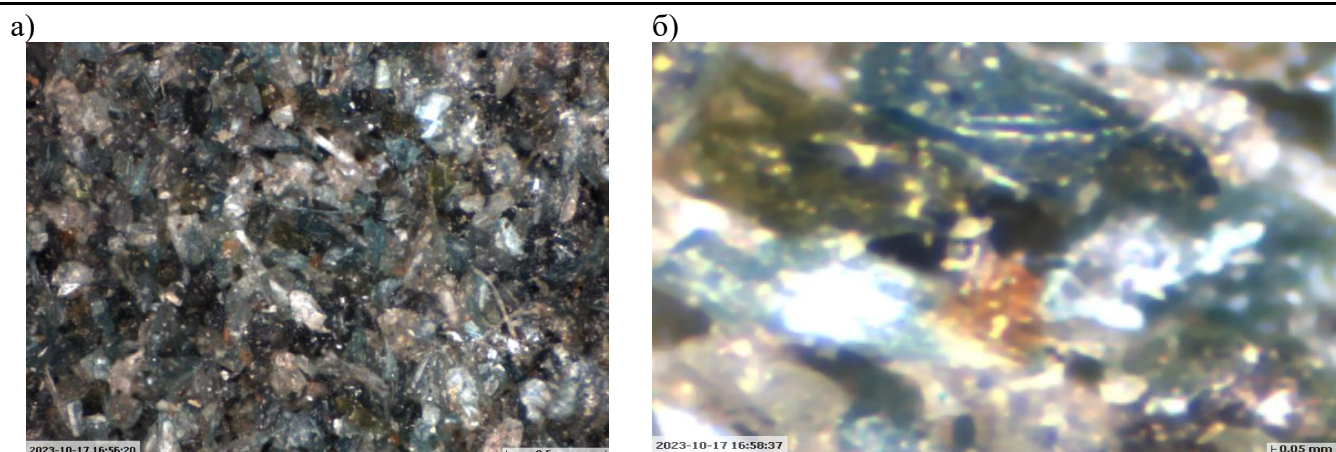


Рис. 6. Фотографии структуры абразивного инструмента с характеристиками 25A F80 N7V при разных увеличениях: а – увеличение в 65 раз; б – увеличение в 390 раз

Из рис. 6 следует, что в разрушение абразивного инструмента вовлечены большие объёмы материала. Зёрна претерпевают не только разрушение сколом, но и деформацию и поворот в связке. Данные факты, очевидно, повлекут в последующей эксплуатации вырыв зерна из связки. Иначе говоря, температура в зоне резания такого абразивного инструмента была при шлифовании настолько высока (более 800 °С), что керамическая связка оказалась не в состоянии выдержать эту тепловую нагрузку.

На рис. 7 показано влияние времени работы абразивного инструмента с характеристиками 25A F60 Q6V на изменение его структуры и на масштаб вовлечения структуры в разрушение.

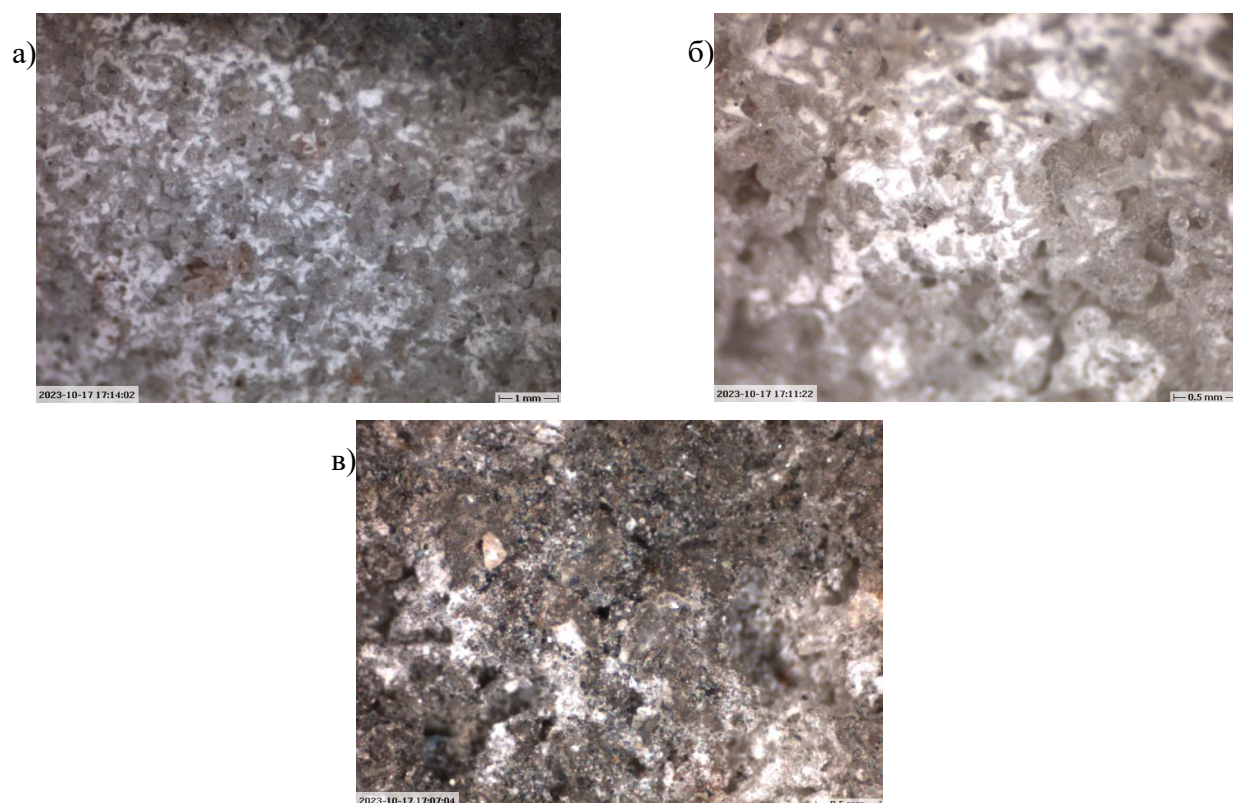


Рис. 7. Фотографии структуры абразивного режущего инструмента с характеристиками 25A F60 Q6V, полученные при разных увеличениях (а – в 21 раз; б – в 46 раз) и разном времени работы (а и б – 20 минут; в – 40 минут)

Из рис. 7 следует, что абразивный инструмент с характеристиками 25A F60 Q6V способен выдерживать длительную эксплуатацию (40 минут без правки), вовлекаемые в разрушение объёмы материала значительны, но объём разрушения структуры незначителен. Инструмент пригоден ещё и для дальнейшей работы.

На рис. 8 показана кинетика процесса разрушения абразивного инструмента с характеристиками 25A F80 O6V.

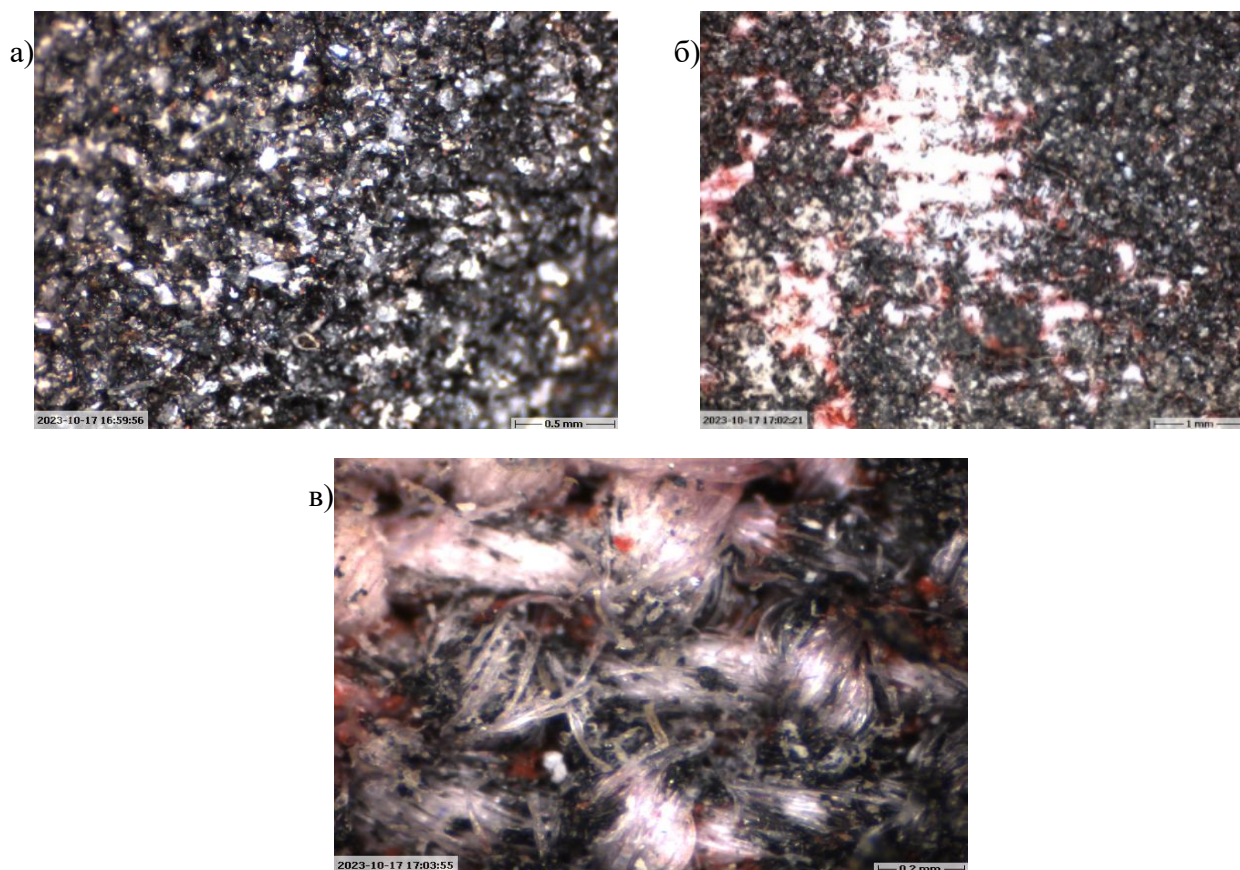


Рис. 8. Фотографии структуры абразивного инструмента с характеристиками 25A F80 O6V:
а – режущий инструмент новый, не был в эксплуатации; б – инструмент работал 10 минут;
в – инструмент работал 20 минут (а и б – увеличение в 32 раза, в – увеличение в 130 раз)

Из рис. 8 следует, что абразивный инструмент с характеристиками 25A F80 O6V в исходном состоянии (см. рис. 8, а) уже имеет разрушенные зёрна (светлые пятна), число разрушенных зёрен растёт значительно за первые 10 минут работы (см. рис. 8, б), а за 20 минут работы (см. рис. 8, в) происходит не только разрушение групп зёрен, но и «засаливание» инструмента продуктами материала шлифуемой заготовки детали.

Выводы:

Таким образом, выполненные исследования показали:

1. У каждого из исследованных абразивных инструментов имеется своя интенсивность разрушения зёрен, доля вырванных зёрен из связки, свой уровень вовлечения объёмов инструментального материала в разрушение и свой механизм разрушения зёрен и материала в целом.
2. Каждый из рассмотренных инструментальных материалов имеет свои преимущества, свои недостатки и, соответственно, свою область применения.
3. Изложенные результаты дают основание полагать, что для повышения работоспособности абразивного инструмента необходимы меры по закреплению абразивных зёрен в инструменте, что может снизить выкрашивание зёрен из связки. В качестве такой меры может быть нанесено



покрытие на зёрна до спекания абразивного инструмента. В процессе спекания материал покрытия по разным механизмам взаимодействия со связкой закрепит зерно в связке инструмента. Аналогичные решения известны [1; 11; 12] на примере изготовления абразивных инструментов с использованием отходов естественных и искусственных алмазов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарин, П. П. Взаимосвязь структуры межфазной зоны алмаз-матрица с работоспособностью инструмента, полученного технологией, совмещающей металлизацию алмазов со спеканием матрицы / П. П. Шарин, М. П. Акимова, В. И. Попов // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 111-123.
2. Ашкиназий, Я. М. Бесцентровые круглошлифовальные станки / Я. М. Ашкиназий. – М.: Машиностроение, 2003. – 352 с.
3. Бесцентровое шлифование // под ред. З. И. Кремня. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1986. – 92 с.
4. Дружинский, И. А. Концепция конкурентоспособных станков / И. А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 247 с.
5. Сарилов, М. Ю. Исследование влияния параметров электроэрозионной обработки на шероховатость обработанной поверхности / М. Ю. Сарилов, А. И. Копылов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-1 (42). – С. 110-116.
6. Непогожев, А. А. Анализ влияния характеристики абразивного инструмента на температуру при процессе шлифования без применения смазочно-охлаждающих технологических сред / А. А. Непогожев, А. М. Романенко // Современная наука: проблемы, идеи, тенденции: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. И. Вострцова [Электронный ресурс] / Vydavatel «Osviceni», Научно-издательский центр «Мир науки». – Электрон. текст. данн. (5,94 Мб).
7. Попов, С. А. Анализ схем стружкообразования в связи с геометрией рабочей поверхности шлифовального круга / С. А. Попов // Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. – М.: Машиностроение, 1960. – 176 с.
8. Попов, С. А. Эксплуатационные свойства высокопористых абразивных кругов / С. А. Попов, Р. В. Ананьян // Станки и инструмент. – 1977. – № 3. – С. 22-23.
9. Редько, С. Г. Расположение абразивных зёрен в рабочей поверхности шлифовального круга / С. Г. Редько, А. В. Королев // Станки и инструмент. – 1976. – № 5. – С. 40-41.
10. Резников, В. А. Исследование мгновенной контактной поверхности при шлифовании / В. А. Резников, В. В. Минаков // Вестник машиностроения. – 1974. – № 9. – С. 48.
11. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно стойких сталей на примере 12X18H10T / А. М. Романенко, Д. Б. Шатько, А. А. Непогожев, Я. С. Караваев // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2021. – № 3. – С. 98-106.
12. Шиц, Е. Ю. Явление структурообразования полиолефинов при введении технических шлифпорошков алмазов природного происхождения / Е. Ю. Шиц, В. В. Корякина // Перспективные материалы. – 2012. – № 4. – С. 53-60.
13. Охлопкова, А. А. Структура и свойства композитов на основе политетрафторэтилена и порошков природных алмазов / А. А. Охлопкова, Е. Ю. Шиц // Механика композитных материалов. – 2004. – Т. 40. – № 2. – С. 225-234.

Ким Е. Д., Дзюба Г. С., Щекин А. В., Дорофеев С. В., Войнов А. Р.
ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ, ЛИКВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ
И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al_x -Ti-Cr-Ni-V-Zr, ПОЛУЧЕННЫЕ СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ

Ким Е. Д., Дзюба Г. С., Щекин А. В., Дорофеев С. В., Войнов А. Р.
E. D. Kim, G. S. Dzyuba, A. V. Shchekin, S. V. Dorofeev, A. R. Voynov

**ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ, ЛИКВАЦИОННЫЕ
ПРОЦЕССЫ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ
 Al_x -Ti-Cr-Ni-V-Zr, ПОЛУЧЕННЫЕ СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ**

**THE INFLUENCE OF ALUMINUM ON THE STRUCTURE FORMATION, LIQUATION
PROCESSES AND PROPERTIES OF A HIGH-ENTROPY ALLOY OF THE Al_x -Ti-Cr-Ni-V-Zr
SYSTEM OBTAINED BY SHS METALLURGY**

Ким Евгений Давидович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)202-27-52. E-mail: jenya_1992g@mail.ru.

Evgenii D. Kim – PhD in Engineering Sciences, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; tel. 8(914)202-27-52. E-mail: jenya_1992g@mail.ru.

Дзюба Геннадий Саввич – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)544-88-13. E-mail: 001012@pnu.edu.ru.

Gennady S. Dzyuba – PhD in Engineering Sciences, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; tel. 8(914)544-88-13. E-mail: 001012@pnu.edu.ru.

Щекин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)546-16-98. E-mail: 000396@pnu.edu.ru.

Andrey V. Shchekin – PhD in Engineering Sciences, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(914)546-16-98. E-mail: 000396@pnu.edu.ru.

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(924)306-24-68. E-mail: 005541@pnu.edu.ru.

Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering Sciences, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(924)306-24-68. E-mail: 005541@pnu.edu.ru.

Войнов Александр Робертович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)774-06-94. E-mail: 006326@pnu.edu.ru.

Alexander R. Voynov – PhD in Engineering Sciences, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(914)774-06-94. E-mail: 006326@pnu.edu.ru.

Аннотация. С использованием метода электронной сканирующей микроскопии, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов изучены особенности образования структуры и свойства (твёрдость HRA, микротвёрдость HV) многокомпонентных сплавов системы Al_x -Ti-Cr-Ni-V-Zr. Установлены закономерности изменения структуры исследуемых сплавов (№ 1-3) в зависимости от атомного процента алюминия. Идентифицированы твёрдые растворы исследованных сплавов с различным содержанием алюминия методом микрорентгеноспектрального анализа. Наличие твёрдых растворов в исследованных сплавах подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа.



Summary. The features of structure formation and properties (hardness HRA, microhardness HV) of multicomponent alloys of Alx-Ti-Cr-Ni-V-Zr system have been studied using electron scanning microscopy, micro-X-ray spectral and X-ray structural analyses. The regularities of structure changes of the studied alloys (No.1-3) depending on the atomic pro-percentage of aluminum have been established. Solid solutions of the studied alloys with different aluminum content were identified by the method of micro-X-ray spectral analysis. The presence of solid solutions in the studied alloys is confirmed by the results of X-ray diffraction analysis.

Ключевые слова: сплав, структурообразование, микротвёрдость, высокоэнтропийные сплавы.

Key words: alloy, structure formation, microhardness, high-entropy alloys.

Исследования проводились в ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «ТОГУ» при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках НИР № FEME-2023-0009.

УДК 669.1

Введение. Спрос на лёгкие (ЛВ) материалы выше, чем когда-либо, из-за растущей потребности в таких областях применения, как автомобилестроение, авиация и другие транспортные отрасли, где энергоэффективность и сокращение выбросов углекислого газа становятся критически важными проблемами [1; 2; 3; 4; 5]. Попытки получить высокопроизводительные ЛВ материалы для целевых применений предпринимались преимущественно с помощью подходов к легированию. В традиционных схемах легирования небольшие количества вторичных элементов включаются в основной материал для улучшения свойств материалов, что успешно использовалось на протяжении столетий. Однако сравнительно недавно была представлена новая стратегия легирования, основанная на нескольких основных элементах, что открыло уникальный путь для разработки огромного количества современных материалов [6; 7].

Эти новые сплавы, называемые высокоэнтропийными сплавами (ВЭС), имеют высокую конфигурационную энтропию из-за состава с почти равным атомным соотношением из пяти или более основных элементов, что позволяет избежать образования интерметаллических (ИМ) соединений и приводит к стабилизации в простых фазах твёрдого раствора [8]. Фактически особый интерес к высокоэнтропийным сплавам обусловлен тем фактом, что они состоят из нескольких элементов переходных металлов (ПМ) и демонстрируют превосходные характеристики, такие как высокая стойкость к коррозии [9], износу [10] и окислению [11], вместе с отличными механическими свойствами при различных температурах [12; 13; 14]. Вдохновлённые этими достижениями, учёные предприняли большие усилия по расширению схемы высокоэнтропийного легирования для включения лёгких элементов, таких как Li, Mg и Al, что привело к получению лёгких высокоэнтропийных сплавов (ЛВЭС) [15].

Плотность ЛВЭС в первую очередь определяется количеством лёгких элементов, таких как Al, Li и Mg, что приводит к общей плотности в диапазоне от 2,67 до 6,09 г/см³ [16; 17; 18]. Однако, в отличие от обычных ВЭС, которые стабилизируются в однофазных твёрдых растворах, таких как объёмно-центрированная кубическая (ОЦК) или гранецентрированная кубическая (ГЦК) решётки, фазы ЛВЭС, о которых сообщалось до сих пор, продемонстрировали разнообразные структурные сложности, включая смешанные фазовые состояния и интерметаллиды, а также однофазные структуры. Например, сплавы ОЦК Al-Li-Mg-Sc-Ti были синтезированы путём механического легирования, которое трансформируется в структуру гексагональной плотно упакованной решётки (ГПУ) при спекании [16]. Сильное взаимодействие между металлами Al/Ti и 3D-технологий легко образует соединения ИМ [19], а микроструктуры ЛВЭС, содержащие Li и Mg, показали смесь различных соединений ИМ [17]. Такие многофазные структуры представляют собой серьёзную проблему для применения ЛВЭС, поскольку полученные сплавы, вероятно, будут демонстрировать высокий уровень хрупкости, который можно обойти путём создания однофазных ЛВЭС.

Таким образом, проведённые исследования других авторов подтверждают перспективность разработки сплавов на основе системы, включающей лёгкие металлы.

Цель работы – исследование структурообразования сплавов $Al_xTiCrNiVZr$, синтезированных СВС-металлургией.

В соответствии с этим в работе были поставлены следующие задачи:

1. исследование структурообразования высокоэнтропийных сплавов № 1-3;
2. определение микротвёрдости твёрдых растворов исследуемых сплавов.

Материалы и методы исследования. Исходными веществами служили NiO (99,5 мас. %, ТУ 6-09-3642-74, ос. ч. 10-2), TiO_2 (99,9 мас. %, ТУ 6-09-2166-77, ч.), Cr_2O_3 (99,9 мас. %, ГОСТ 2912-79, ч. д. а.), V_2O_5 (99 мас. %, ТУ 6-09-4093-75, ч. д. а.), ZrO_2 (99,9 мас. %, ТУ 6-09-4709-79, х. ч.) кальций фтористый CaF_2 (98,0 мас. %, ТУ 2621-007-69886968-2015 с изм. 1), $NaNO_3$ (ГОСТ 4168-79, х. ч.) и порошок алюминия ПА-4 (98,0 мас. %, ГОСТ 6058-73).

В табл. 1 представлены составы исходной шихты, использованные при синтезе, и содержание Al (ат. %) в продуктах реакции.

Таблица 1

Составы исходной шихты и содержание Al в продуктах реакции

№ шихты	Долевые части компонентов шихты	Содержание алюминия в сплаве, ат. %
1	$NiO:TiO_2:Cr_2O_3:V_2O_5:ZrO_2:Al = 5:5:6:5:3,5:10$	30
2	$NiO:TiO_2:Cr_2O_3:V_2O_5:ZrO_2:Al = 5:5:6:5:3,5:12$	40
3	$NiO:TiO_2:Cr_2O_3:V_2O_5:ZrO_2:Al = 5:5:6:5:3,5:14$	45

Синтез высокоэнтропийных сплавов проводили в жаропрочных керамических тиглях, футерованных огнеупорным материалом.

Методика подготовки шихты включает обработку в планетарной микромельнице PULVERISETTE 5 с последующей просушкой в вакуумном сушильном шкафу ШС-90/В при температуре 80 °С.

Исходные компоненты перемешивали в определённом стехиометрическом соотношении в течение 15 минут до однородного состава, засыпали полученную смесь в тигель. В качестве запала – инициатора горения – заранее прибавляли 200 мг магниевого порошка без дополнительных окислителей. При облучении наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) происходило искрение между электродами, погружёнными до дна тигля в термитные смеси, что приводило к инициации СВС-металлургии. С учётом потерь при истирании в мельнице масса каждого образца составляла $63 \pm 0,5$ г. После воспламенения шихты по всему объёму смеси распределяется фронт горения. Далее, за фронтом горения, формируется слой расплава продуктов горения, который состоит из двух фаз: металла и шлака (Al_2O_3). Под действием гравитации, из-за разницы в удельном весе и их взаимной нерастворимости, происходит фазоразделение. Вследствие теплообмена расплав остывает и в завершении процесса кристаллизуется.

В результате реакции образуется двухслойный продукт: компактный металлический слиток в нижнем слое и оксидный шлак – в верхнем, которые легко отделяются друг от друга.

Использовались следующие методы исследования:

- Анализ элементного состава полученных слитков проводили с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Спектроскан МАКС-GV.

- Микрорентгеноспектральный анализ по определению содержания элементов в различных структурных составляющих сплавов проводили с помощью аналитического исследовательского комплекса на базе FE-SEM Hitachi SU-70 (Япония) с энергодисперсионными (Thermo Scientific Ultra Dry) и волновыми (Thermo Scientific Magna Ray) приставками для микрорентгеноспектрального анализа.

- Испытание на микротвёрдость (HV) проводили на приборе Shimadzu HMV-G21DT.

Результаты и их обсуждение. Исследовали 3 состава синтезированных сплавов системы $Al_x-Ti-Cr-Ni-V-Zr$ ($x = 30...45$ ат. %). В табл. 2 приведён химический состав в атомарных долях литых сплавов.

Таблица 2

Химический состав в атомарных долях литых сплавов

№ серии	Синтезированный сплав	Среднее содержание элементов, мас. %					
		Al	Ti	V	Cr	Ni	Zr
1	с 30 ат. % Al	18,35	15,97	15,37	23,49	22,24	4,57
2	с 40 ат. % Al	25,52	15,21	13,19	21,27	18,47	6,34
3	с 45 ат. % Al	27,78	15,47	12,70	20,47	17,36	6,21

Содержание Al в сплавах колебалось от 30 до 45 ат. %, при этом соблюдалось эквиатомное соотношение остальных элементов.

На рис. 1 показаны микроструктура и точки анализа элементов по точкам сплава, синтезированного из шихты № 1. В табл. 3 представлено распределение элементов по структурным составляющим сплава.

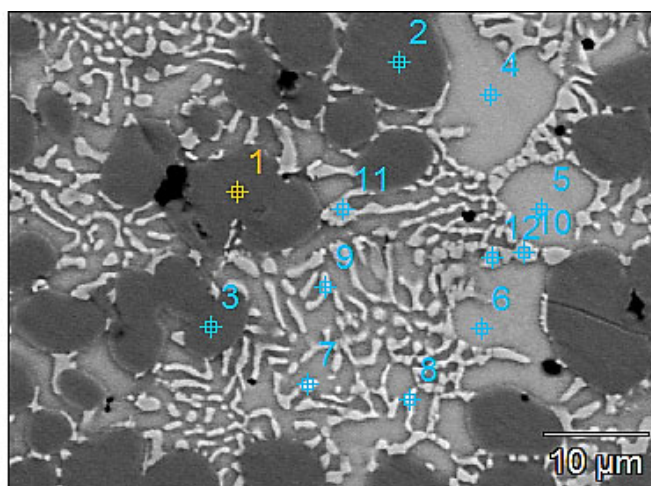


Рис. 1. Микроструктура, точки анализа элементов сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 30$ ат. %)

Таблица 3

Распределение элементов в структурных составляющих сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 30$ ат. %)

Структурные составляющие	Точки анализа	Содержание элементов, ат. %					
		Al	Ti	V	Cr	Ni	Zr
I	1...3	21,35	6,41	27,81	40,13	4,30	
II	4...6	35,95	23,69	4,93	9,16	20,98	5,30
III	7...12	39,22	14,12	3,04	5,16	37,00	1,46

Как видно, сплав состоит из трёх видов комплексно-легированных твёрдых растворов $Al_xTiCrNiVZr$ с различным содержанием никеля и других легирующих элементов.

На рис. 2 представлены микроструктура и точки анализа сплава $Al_xTiCrNiVZr$, синтезированного из шихты № 2. В табл. 4 представлено распределение элементов по структурным составляющим.

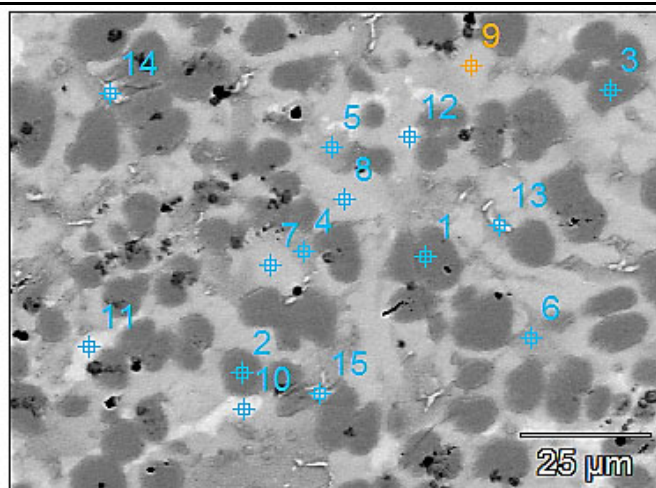


Рис. 2. Микроструктура, точки анализа элементов сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 40$ ат. %)

Таблица 4
 Распределение элементов в структурных составляющих сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 40$ ат. %)

Структурные составляющие	Точки анализа	Al	Ti	V	Cr	Ni	Zr
I	1...3	30,68	7,49	23,89	34,47	3,46	
II	4...12	46,79	17,82	4,00	7,68	18,33	5,39
III	12...15	46,00	9,39	4,06	7,49	32,06	1,00

Сплав также состоит из трёх твёрдых растворов, изменяется объёмная доля структурных составляющих.

На рис. 3 представлены микроструктура и точки анализа сплава $Al_xTiCrNiVZr$, синтезированного из шихты № 3. В табл. 5 представлено распределение элементов по структурным составляющим.

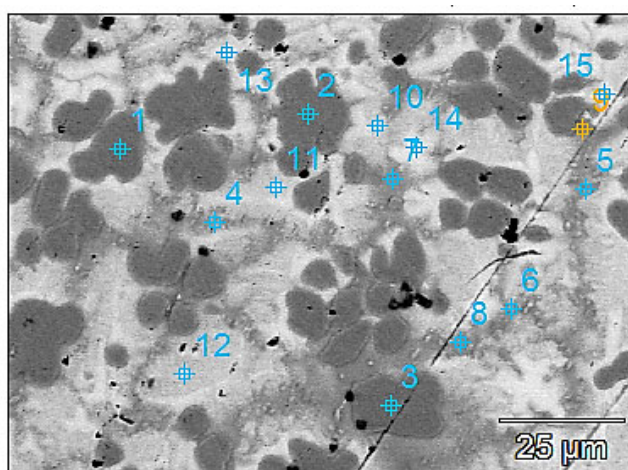


Рис. 3. Микроструктура, точки анализа элементов сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 45$ ат. %)

Как видно, с ростом содержания алюминия в сплаве происходит перераспределение элементов в структурных составляющих, при этом твёрдые растворы с повышенным содержанием никеля типа III распределяются в твёрдых растворах типа II в виде нановключений.

Таблица 5

Распределение элементов в структурных составляющих сплава $Al_xTiCrNiVZr$ ($x = 45$ ат. %)

Структурные составляющие	Точки анализа	Al	Ti	V	Cr	Ni	Zr
I	1...3	33,37	8,03	23,43	32,36	2,80	
II	7...15	48,35	16,27	4,94	9,18	17,26	4,01

Таким образом, в сплавах № 1-3 структура представлена твёрдым раствором ОЦК (I) светло-серого и тёмно-серого цветов.

На рис. 4 приведены значения твёрдости HRA (а) полученных сплавов № 1-3 системы $Al_xCoCrFeNi$ и микротвёрдость твёрдых растворов ОЦК (I) светло-серого и тёмно-серого цветов и ОЦК (II) (б).

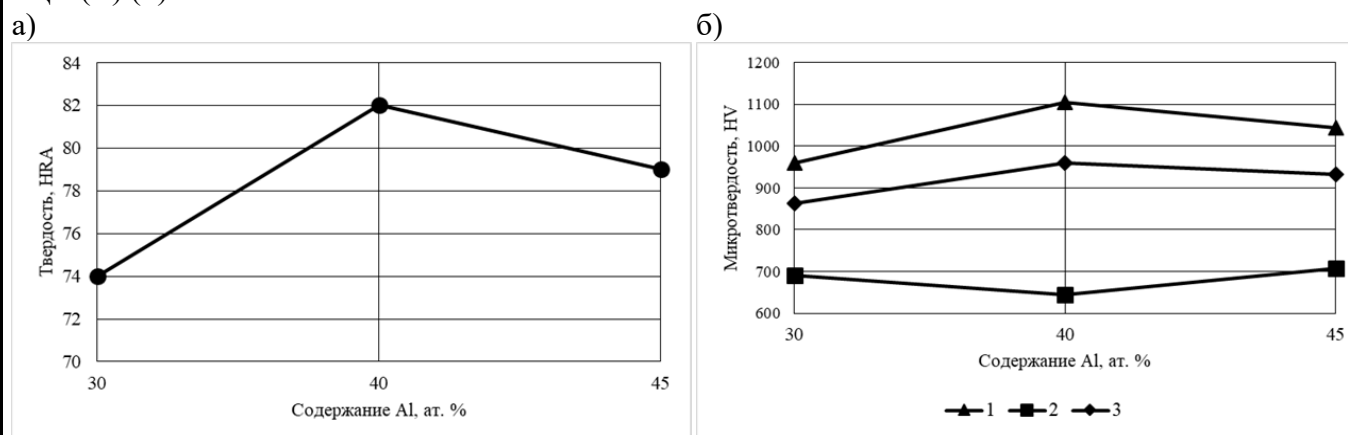


Рис. 4. Твёрдость сплавов (HRA) (а) и микротвёрдость твёрдых растворов ОЦК (I) (б) светло-серого и тёмно-серого цветов и ОЦК (II) сплавов № 1-3

Установлено, что с увеличением содержания алюминия микротвёрдость твёрдых растворов ОЦК (I) светло-серого цвета возрастает с 950 до 1100 HV при содержании 40 ат. % Al с последующей стабилизацией на уровне 1050 HV соответственно для сплава № 3. Экстремальный характер изменения твёрдости сплавов обусловлен формированием композитной структуры сплава. Повышение содержания алюминия способствует росту микротвёрдости металлической основы сплава № 1 → сплава № 3 → сплава № 2.

Выводы:

1. Определён характер распределения легирующих элементов в структурных составляющих, и проведена их идентификация методами микрорентгеноспектрального и рентгеноспектрального анализов сплавов системы $Al_xTiCrNiVZr$ – твёрдых растворов с разным стехиометрическим соотношением.

2. При постоянном содержании V (15,37 мас. %), Cr (22 мас. %), и Ti (15,5 мас. %) максимальная твёрдость (82 HRA) достигается у сплава № 2. Наибольшая микротвёрдость металлической основы составляет 1100 HV. Разница значений твёрдости сплавов обусловлена наличием высокой объёмной доли упрочняющих твёрдых растворов в структуре сплава.

ЛИТЕРАТУРА

- Kumar V. et al. Serrated yielding during nanoindentation of thermomechanically processed novel Mg–9Li–7Al–1Sn and Mg–9Li–5Al–3Sn–1Zn alloys // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Т. 46. – № 14. – P. 145304.
- Kumar V. et al. Microstructure evolution and texture development in thermomechanically processed Mg–Li–Al based alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Т. 547. – P. 38-50.

3. Devaraj A. et al. A low-cost hierarchical nanostructured beta-titanium alloy with high strength // Nature communications. – 2016. – Т. 7. – № 1. – P. 1-8.
4. Chen G. et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications // Nature Materials. – 2016. – Т. 15. – № 8. – P. 876-881.
5. Cheah L. W. Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US: дис. – Massachusetts Institute of Technology, 2010.
6. Cantor B. et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 375. – P. 213-218.
7. Yeh J. W. et al. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements // Materials chemistry and physics. – 2007. – Т. 103. – № 1. – P. 41-46.
8. Yeh J. W. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced engineering materials. – 2004. – Т. 6. – № 5. – P. 299-303.
9. Chen Y. Y. et al. Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys – a comparison with type-304 stainless steel // Corrosion science. – 2005. – Т. 47. – № 9. – P. 2257-2279.
10. Poletti M. G. et al. Development of a new high entropy alloy for wear resistance: FeCoCrNiW0.3 and FeCoCrNiW0.3+5 at.% of C // Materials & Design. – 2017. – Т. 115. – P. 247-254.
11. Nong Z. S., Lei Y. N., Zhu J. C. Wear and oxidation resistances of AlCrFeNiTi-based high entropy alloys // Intermetallics. – 2018. – Т. 101. – P. 144-151.
12. Gludovatz B. et al. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures // Nature communications. – 2016. – Т. 7. – № 1. – P. 10602.
13. Juan C. C. et al. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys // Intermetallics. – 2015. – Т. 62. – P. 76-83.
14. Senkov O. N. et al. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys // Intermetallics. – 2011. – Т. 19. – № 5. – P. 698-706.
15. Maulik O. et al. Structure and properties of lightweight high entropy alloys: a brief review // Materials Research Express. – 2018. – Т. 5. – № 5. – P. 052001.
16. Youssef K. M. et al. A novel low-density, high-hardness, high-entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures // Materials Research Letters. – 2015. – Т. 3. – № 2. – P. 95-99.
17. Yang X. et al. Phase stability of low-density, multiprincipal component alloys containing aluminum, magnesium, and lithium // Jom. – 2014. – Т. 66. – P. 2009-2020.
18. Maulik O. et al. Structural evolution of spark plasma sintered AlFeCuCrMgx (x = 0, 0.5, 1, 1.7) high entropy alloys // Intermetallics. – 2016. – Т. 77. – P. 46-56.
19. Feng R. et al. Phase stability and transformation in a light-weight high-entropy alloy // Acta Materialia. – 2018. – Т. 146. – P. 280-293.



Стробыкин Н. А., Бахматов П. В.
N. A. Strobykin, P. V. Bakhmatov

УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

CONDITIONS FOR CREATION OF DEFECT-FREE WELDED JOINTS OF THIN-WALLED TITANIUM AIRCRAFT STRUCTURES

Стробыкин Никита Алексеевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Nikita A. Strobykin – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлены основные проблемы решения вопроса порообразования в сварных соединениях тонкостенных титановых панелей, образуемых GTAW. Показаны способы решения проблемы порообразования, требующие концептуального пересмотра нормативно-технологической документации, регламентирующей разработку технологических процессов, в частности по вопросам операций подготовки кромок под сварку. Например, газолазерный раскрой в среде азота или аргона как операция непосредственной подготовки кромок исключает вероятность появления пористости в сварных швах. Такой эффект позволяет управлять режимами термического цикла сварки для решения следующей проблемы – коробления сварных конструкций, а следовательно, достижения их размерной точности. Установка УСП-5000, имеющаяся на вооружении авиационного завода, является роботизированным сварочным комплексом и при предложенной доработке способна осуществлять сварку в импульсном режиме как по энергетическим параметрам, так и по траектории движения горелки и сварочной проволоки, что позволит оптимизировать управление энергетическими параметрами сварки в любой точке формируемого шва.

Summary. The paper presents the main problems of solving the issue of pore formation in welded joints of thin-walled titanium panels formed by GTAW. The ways of solving the problem of pore formation that require a conceptual revision of the regulatory and technological documentation regulating the development of technological processes, in particular on the issues of edge preparation operations for welding, are shown. For example, gas-laser cutting in a nitrogen or argon medium, as an operation of direct edge preparation, eliminates the likelihood of porosity in welds. This effect allows controlling modes of the thermal welding cycle to solve the following problem – warping of welded structures, and consequently, to achieve their dimensional accuracy. The USP-5000 installation, which is in service with the aviation plant, is a robotic welding complex and, when modified, is capable of welding in pulse mode, both in terms of energy parameters and along the trajectory of the burner and welding wire, which will optimize the control of the energy parameters of welding at any point of the seam being formed.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварные соединения, пористость, размерная точность, коробление, роботизированная установка, импульсный режим.

Key words: titanium alloys, welded joints, porosity, dimensional accuracy, warping, robotic installation, pulse mode.

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (НИР № ВН001/2023 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах»).

УДК 621.791

Введение. Титановые сплавы благодаря своим основным свойствам (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, удовлетворительная свариваемость, жаропрочность и др.) нашли применение во всех областях народного хозяйства: медицине, пищевой и лёгкой промышленности, авиационной и ракетной технике и т. д. [1–5]. Титановые сплавы позволяют использовать технологию сварки плавлением тонколистовых заготовок со сложной пространственной формой для хвостовой части фюзеляжа (боковых панелей, балок крепления, окантовок, лючков и др.), несущей части топливного бака (панель центроплана), воздухозаборника (защитное устройство) и др. [6–7].

В практике серийного производства титановых панелей каждый сварной шов подвергается исправлению дефектов в виде пор, что подтверждает несовершенство подхода к решению вопроса порообразования и нормативной документации. С проблемой механизма порообразования в неразъёмных соединениях из титановых сплавов, выполненных сваркой плавлением, сталкиваются авторы многих исследований [8–12]. Выделим гипотезу Г. Д. Никифорова, В. В. Редчица, В. А. Фролова [13–15], согласно которой в расплаве химически активных тугоплавких металлов гидрогрупп титана и ванадия отсутствуют газовые флуктуации критического размера, что снижает вероятность возникновения пузырьков, выделяющихся из раствора водорода в объёме ванны, т. е. необходимы готовые зародыши газовой фазы. Такими зародышами являются заваренные дефекты торцов кромок перед сварочной ванной, попадающие в расплавленную ванну и формирующие поры в металле шва. При этом исследования влияния качества поверхности стыкуемых кромок заготовок из титановых сплавов при различных видах их обработки для образования неразъёмных соединений ограничивались традиционными методами измерения шероховатости без оценки изменения приповерхностного слоя, образования в нём микродефектов. Известные в настоящее время методы снижения пористости [16–18] не гарантируют исключения пор, а методы увеличения времени существования расплавленной ванны при полном исключении пористости не гарантируют требуемых механических свойств и, кроме того, не позволяют управлять режимами термического цикла сварки (ТЦС), обеспечивающими требуемые условия фазовых превращений, позволяющими улучшить структуру и свойства титановых панелей [19–20], что обуславливает коробление деталей после сварки, образование холодных трещин. Коробление тонкостенных конструкций после сварки не позволяет достичь их размерной точности, требует дополнительных операций по исправлению геометрии деталей (термофиксация, отжиг в вакууме).

В этих условиях повышение эффективности сварки тонкостенных титановых конструкций путём исключения пористости в металле шва с обеспечением размерной точности и равнопрочности конструкции является актуальной научной и важнейшей задачей в авиастроении.

Методология экспериментального исследования. GTAW сварка стыковых и тавровых соединений титановых тонкостенных ребристых панелей из сплава BT20 проводилась на стапеле УСПО-2.6, снабжённом автоматом АДСВ-6 со сварочной головкой АСГВ-4 с применением сварочной проволоки BT1-00св диаметром 1,6 мм. В качестве источника тока использовался выпрямитель ВСВУ-400.

Рентгенографический контроль полученных неразъёмных соединений проводился рентгеновским аппаратом РАП 150/300 по ГОСТ ISO 17636-1-2017.

Количество капиллярно-конденсированной влаги на торцевой поверхности свариваемых кромок определялось по содержанию водорода спектральным анализом на спектрографе ИСП-51 низковольтным импульсным разрядом с последующей регистрацией интенсивности спектральной линии водорода фотоэлектрическим способом, а градуировочный график строился методом «трёх эталонов» по ОСТ 1 90034-81. В отличие от стандартной методики определения содержания водорода на торцевых поверхностях соединяемых кромок после различных операций раскрытия, подготовки кромок под сварку образцы не подвергались дополнительной зачистке исследуемой поверхности.



Шероховатость поверхности определялась профилометром TR-200. При проведении микроструктурного анализа применялись оптический микроскоп Nikon MA200 и растровый электронный микроскоп Hitachi SEM S-3400N. Химический анализ титановых сплавов проводился на оптико-эмиссионном спектроанализаторе Q4 TASMAN 170 Bruker, анализ газов (кислорода, азота) – с помощью анализатора ONH 2000 ELTRA по стандартным методикам.

Испытания сварных образцов на статическое растяжение выполняли на универсальной машине INSTRON 3382 на образцах типа XIII по ГОСТ 6996-66. Для испытаний на ударный изгиб применялся маятниковый копер JB-W300 и образцы типа VIII и X.

Исследования влияния технологических факторов формирования поверхности раздела образцов из сплава BT20 на усталостную прочность проводили на установке, разработанной в Комсомольском-на-Амуре государственном университете. Основным критерием усталостных свойств образцов является полное разрушение образца. В ходе эксперимента было подсчитано количество циклов N до полного разрушения. Образцы для испытаний представляют собой пластины толщиной 2 мм и длиной рабочей части 70 мм. В наиболее широкой части ширина образцов равна 8 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Несовершенство подхода к проблеме порообразования в сварных соединениях титановых конструкций отражается в отраслевой нормативной документации (ПИ 1.4.1898-2003), не исключающей образование дефектов. Согласно нормативной технологической документации, существует 4 причины порообразования:

1. загрязнение поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки (но основной металл и проволока перед сваркой обезжириваются и обезвоживаются спиртом);
2. чистота обработки свариваемых кромок ниже требуемой (но параметр шероховатости нормируется и контролируется);
3. содержание водорода в основном и присадочном материале превышает норму (но эта проблема уже давно решена на металлургическом производстве полуфабрикатов);
4. неправильный режим или несоблюдение техники сварки.

Поэтому решение проблемы порообразования требует новой концепции и доработки нормативной документации.

Статистический анализ механических свойств сварных титановых тонкостенных конструкций, выявленных в производственных условиях КнААЗ, показал, что прочность соединений снижена и составляет 8...12 % от прочности основного металла. Анализ выявляемых дефектов при рентгенографии было подвергнуто $n = 589$ сварных швов, из которых дефектных $n_d = 137$, что составляет 23,3 % от общего количества дефектов (см. рис. 1). Из внутренних дефектов наибольшее количество составляют цепочки пор – 59 (43 % от общего количества дефектов); одиночная пора – 15 (11 % от общего количества дефектов); скопление пор – 16 (12 % от общего количества дефектов); трещины – 19 (14 % от общего количества дефектов); галтель (дефект, характерный только для тавровых соединений стингера) – 28 (20 % от общего количества дефектов) (см. рис. 2). Диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Трещины, как правило, располагаются в концах сварных швов. Если в конструкции одно место дефектное, то необходима доработка детали. Нередко дефектные места подвергаются неоднократному исправлению.

Как показывает анализ существующих технологических процессов, порообразование в неразъёмных соединениях связано с неэффективностью оценки качества поверхности кромок заготовок и присадочной проволоки по стандартным параметрам шероховатости (R_a , R_z), которые не в полной мере характеризуют качество сформированной поверхности раздела, т. к. не учитывают глубину разрыхлённого слоя с образованием в нём макро-, микро- и субмикротрещин и глубину растравливания, особенно по границам зёрен [21; 22].

Важнейшую роль зарождения пузырьков при порообразовании в процессе сварки играет влага, находящаяся в объёме дефектов торцевой поверхности, а её количество возможно определить по содержанию водорода спектральным анализом [23], который может стать основой метода контроля качества подготовки поверхности под сварку и даст возможность определить вид адсорбированной влаги (поверхностно- или капиллярно-конденсированная влага (ККВ)) [24]. Оцени-

вать порообразование в металле шва титановых сплавов предлагается параметром «насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки капиллярно-конденсированной влагой» по условной величине N отношения содержания водорода в поверхностном слое после обезжиривания и обезвоживания $H_{2\text{пов}}$ к содержанию водорода в основном металле, соответствующему требованиям стандарта на данный вид полуфабриката: $H_{2\text{м}}/N = H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}}$, а уровень дефектности – по формуле $q_{\text{деф}} = (L_{\text{деф}}/L_{\text{общ}}) \times 100\%$, где $L_{\text{деф}}$ – сумма диаметров пор на длине металла шва 100 мм; $L_{\text{общ}}$ – длина металла шва 100 мм.

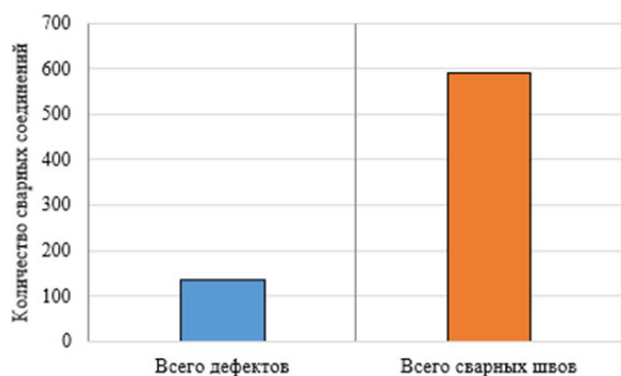


Рис. 1. Соотношение дефектных мест от общего количества сварных соединений

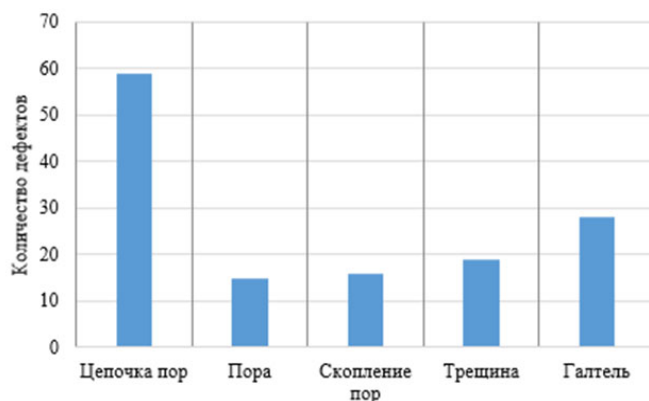


Рис. 2. Количество дефектов в сварных соединениях

Существующие виды разделительных операций (более 40) авторами распределены по механизму образования поверхности на три вида: разрушение (все виды механической обработки); травление (избирательное, диффузионное растравливание); плавление.

Разрушение сопровождается нарушением целостности волокон металла, разрыхлением поверхностного слоя, созданием хаотичной, неоднородной микрогеометрии без изменения химического состава и газонасыщения. Максимум глубины дефектного слоя обнаруживается при раскрое на гильотинных ножницах, минимум – при пластической деформации. Максимальный уровень дефектности металла шва (см. рис. 3) вызывают процессы опескоструивания, резки на гильотинных ножницах и зачистки металлической щёткой. Порообразование в металле шва после подготовки поверхности заготовок полированием или пластическим деформированием отсутствует.

Травление. Избирательность процессов травления и испарения является особенностью формирования рельефа поверхности заготовок химической, электрохимической, электроэрозионной обработкой (см. рис. 3). Химический состав (см. табл. 1 и рис. 3) поверхности образцов после травления мало изменяется, но при этом наблюдается максимальное газонасыщение (H_2), шероховатость в пределах $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм для проволоки, глубина рисок $h = 0,07$ мм. Параметр шероховатости при максимальной производительности ЭЭР: $Ra \approx 2,5$ мкм (в воде), $Ra \approx 1,25$ мкм (в масле); минимальная величина дефектного слоя: $3 \dots 10$ мкм (в воде), $1 \dots 2$ мкм (в масле). При этом наблюдается максимум насыщенности поверхности ККВ (см. табл. 1).

Плавление. Формирование поверхности свариваемых кромок газокислородной резкой вызывает максимальную глубину изменённого поверхностного слоя ($3 \dots 5$ мм, особенно на выходе факела) не только по шероховатости, но и по химическому составу и структуре. Минимальные изменения наблюдаются при газолазерном раскрое (ГЛР) заготовок в среде азота и аргона (допустимые требованиями технических условий) и гидроабразивной резке (не допустимые требованиям технических условий по содержанию кислорода и азота в поверхностном слое). Минимум уровня дефектности наблюдается в металле шва после гидроабразивной резки (см. рис. 3). Повышенный уровень дефектности у сварных соединений после плазменной резки заготовок – из-за насыщенности поверхности ККВ.

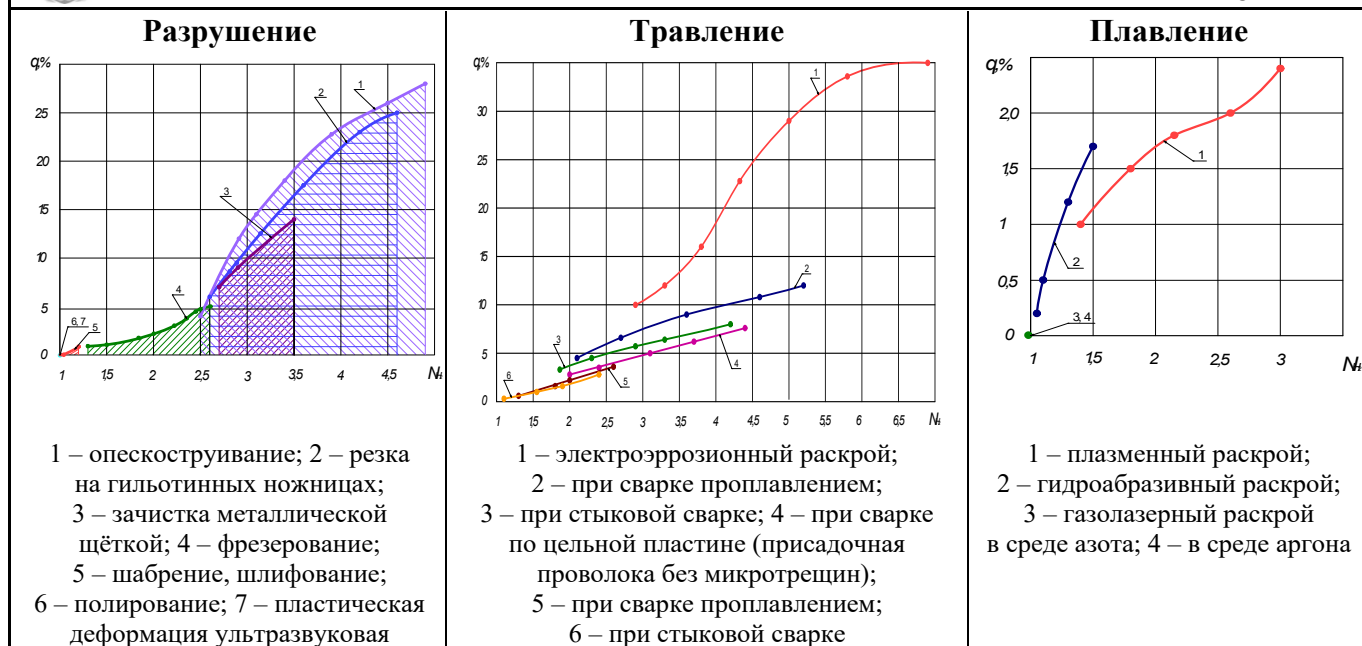


Рис. 3. Изменение уровня дефектности металла шва сплава ВТ20 в зависимости от величины насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности свариваемых заготовок и присадочной проволоки

Таблица 1

Насыщенность поверхности загрязнениями, шероховатость и глубина разрыхлённого слоя поверхности образцов после различных видов обработки ($H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}} = N$)

Группы видов обработки	Вид обработки	Глубина разрыхлённого слоя $H_{\text{м}}$, мкм	Шероховатость R_a , мкм	Глубина дефектного слоя h , мм	$H_{2\text{пов}}/H_{2\text{м}}$	
					*	**
Разрушение	1. Полирование	0,15	0,1	0,01	2,2	1,0
	2. Чистовое шлифование	1,0	0,8	0,03	2,3	1,03
	3. Шабрение	3,0	1,25	0,3	3,0	1,2
	4. Чистовое фрезерование	6,0	3,2	0,5	4,6	1,8
	5. Грубое фрезерование	8,0	6,3	0,8	5,7	2,6
	6. Рубка на ножницах гильотинного типа	15	320 (Rz)	1...3	7,1	3,2
	7. Ультразвуковая пластическая деформация	0	<0,05	0	1,9	1,0
Травление	8. Травление	0,03	0,4	0	6,1	1,5
	9. Электроэрозионная обработка	0,025	0,1	0,01...0,06	8,0	5,4
Плавление	10. Электронно-лучевое оплавление	0	1,25	0	1,7	1,0
	11. Газолазерная резка в азоте	0	3,2	0,5	1,5	1,0
	12. Газолазерная резка в аргоне	0	2,5	0,3	1,9	1,0
	13. Гидроабразивная резка	0	3,8	0,1	3,3	1,7
	14. Плазменная резка в азоте	0	6,3	0,5	6,5	3,0
	15. Газопламенная резка	0	>320 (Rz)	3-5	11,8	5,1

Максимальной активационной способностью к ККВ обладает поверхность образцов, обработанная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах (см. табл. 1, п. 6); травлением – электроэрозионной обработкой (см. табл. 1, п. 9); плавлением – газопламенной резкой (см. табл. 1, п. 15).

Исследованиями установлено, что уровень дефектности металла шва определяется не величиной шероховатости, а насыщенностью поверхности свариваемых заготовок ККВ. Из данных табл. 1 и рис. 3 следует, что параметр шероховатости не может характеризовать уровень дефектности металла шва при сварке титановых сплавов. Например, при равной шероховатости получаемой поверхности $Ra = 0,1$ мкм после полирования и электроэрозионной обработки заготовок насыщенность загрязнениями составляет соответственно $N = 1$ и $N = 2,8 \dots 6,9$, а уровень дефектности и $q_n = 0$ и $q_n = 10 \dots 40$ %. Фрезерование и ГЛР в азоте заготовок обеспечивают $Ra = 3,2$ мкм при этом $N = 1,2 \dots 2,6$ и $N = 1$, а уровень дефектности в первом случае составляет $q_\phi = 0,9 \dots 5$ %, во втором случае – $q_{г\text{лр}} = 0$ %.

Достижение нулевого уровня дефектности по порообразованию делает возможным обеспечение идентичности механических свойств сварных соединений титановых конструкций основному металлу управлением ТЦС.

Снижение прочности пропорционально увеличению суммарной площади пор. Малоцикловая усталость сварных образцов в значительной степени зависит не только от величины суммарной площади пор в металле шва, но и от их расположения (см. табл. 2). Самыми опасными оказались поры, располагающиеся близко к поверхности. Усталостная прочность таких образцов уменьшилась на 44 % по сравнению с бездефектными образцами. Среднее значение прочности сварных соединений хоть и допустимо для сварных конструкций, но более чем на 18 % ниже прочности основного металла. Основной причиной такого снижения являются условия проведения термического цикла сварки, а именно недостаточная скорость охлаждения в интервале температур фазового превращения.

Таблица 2

Изменение механических свойств сварных образцов из имитатора ребристой панели
в зависимости от наличия пор в металле шва

Состояние материала	Номер образца	Наличие пор в сечении образца			Механические свойства			
		Количество, шт.	Суммарная площадь, мм ²	Место расположения	σ_b , МПа	δ , %	Угол загиба, град.	Число циклов до разрушения N_u при $\sigma_\alpha^{\text{cp}} = \frac{600-200}{2}$, МПа
Основной металл	1	-	-	-	1140	10	37	115 000
	2	-	-	-	1140	10	40	121 000
	3	-	-	-	1150	10	35	148 000
	4	-	-	-	1150	11	35	136 000
	Среднее арифметическое				1145	10,3	36	130 000
Сварные образцы	1	-	-	Без дефектов	975	-	45	118 000
	2	-	-		945	-	45	144 300
	3	-	-		950	-	32	119 000
	4	8	1,63	Ближе к поверхности	925	-	30	65 700
	5	9	1,43		910	-	37	48 100
	6	10	1,24		935	-	33	52 400
	7	7	1,16	Ближе к центру	928	-	31	70 000
	8	9	0,70		950	-	40	94 000
	9	6	0,85		940	-	33	81 000
	10	5	0,37		945	-	35	94 000
	Общее среднее арифметическое				940	-	36	88 620
	Среднеарифметическое для дефектных образцов				933		34	72 172

ГЛР в азоте с раскроем на гильотинных ножницах полностью исключает образование пор в сварном шве титановых сплавов, при этом свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Величина погонной энергии, вводимой в сварочную ванну электрической дугой, и время существования сварочной ванны (скорость сварки) во многом определяют скорость охлаждения расплавленного металла, его структуру и свойства. Чем больше значение погонной энергии и меньше – времени импульса, тем выше скорость охлаждения в интервале фазовых превращений, а соответственно, выше значение временного сопротивления разрыву и угла загиба, меньше величина изменения содержания легирующих элементов. Такой термический цикл характерен для импульсной сварки или сварки пульсирующей дугой.

Мягкий режим термического цикла сварки приводит к формированию микроструктуры металла более грубой игольчатой структуры α -фазы и наиболее широких образований α' -пластин внутри зерна по сравнению с формированием микроструктуры по жёсткому режиму термического цикла сварки (см. рис. 4).

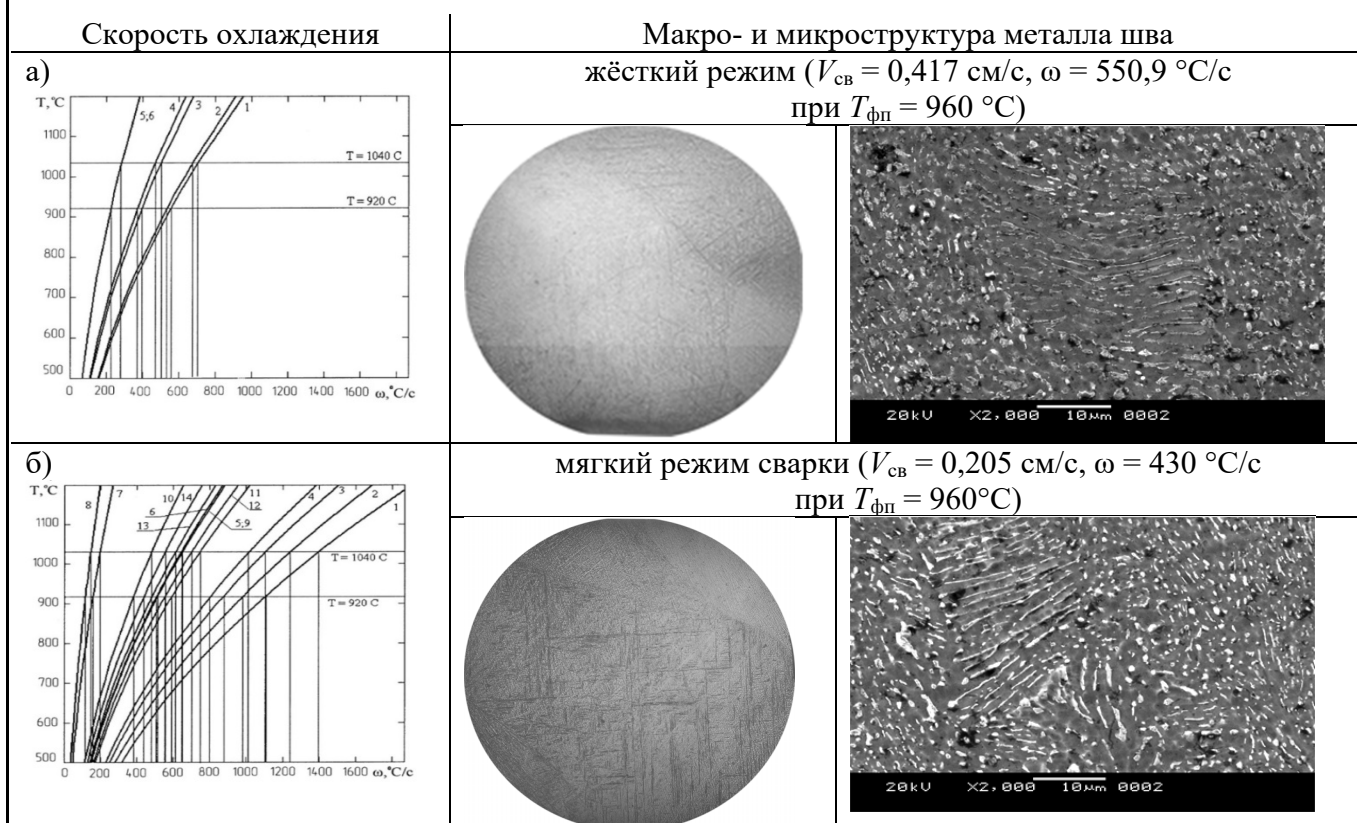


Рис. 4. Изменение скорости охлаждения в зависимости от режимов сварки при температуре полиморфного превращения ($\alpha \rightarrow \beta$) в околошовной зоне сплава ВТ20 (расчётные данные): а – сварка пульсирующей дугой; б – сварка непрерывной дугой; 1, 2, 11, 12 – 1,2 мм; 3, 4, 13, 14 – 1,5 мм; 5, 6 – 2,0 мм; 7, 8 – 2,5 мм; 9, 10 – 3,0 мм; 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – сварка на жёстких режимах; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14 – сварка на мягких режимах

Аналитической оценкой свойств неразъёмных соединений (НС), полученных сваркой по традиционным режимам по сравнению с основным металлом, установлено, что различие в свойствах существенно связано с режимами сварки и практически не зависит от химического состава исходного металла. Для сварных соединений из листов толщиной 1,2 и 2,0 мм наблюдается сходимость свойств с основным металлом, а для образцов из листов толщиной 2,5 мм предел прочности снижается по сравнению с основным металлом, причём со значениями, близкими к нижней границе допуска (см. рис. 5).

Исходя из условия, что при сварке плавлением псевдо- α -титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения происходит непрерывное увеличе-

ние прочности, построены зависимости изменения угла загиба и временного сопротивления разрыву от мгновенной скорости охлаждения, позволяющие оценить закономерности между скоростью охлаждения и механическими свойствами традиционных режимов термического цикла сварки и оптимизировать режимы ТЦС, получать сварные конструкции из титановых сплавов с механическими свойствами, не отличающимися от свойств основного металла (см. рис. 5).

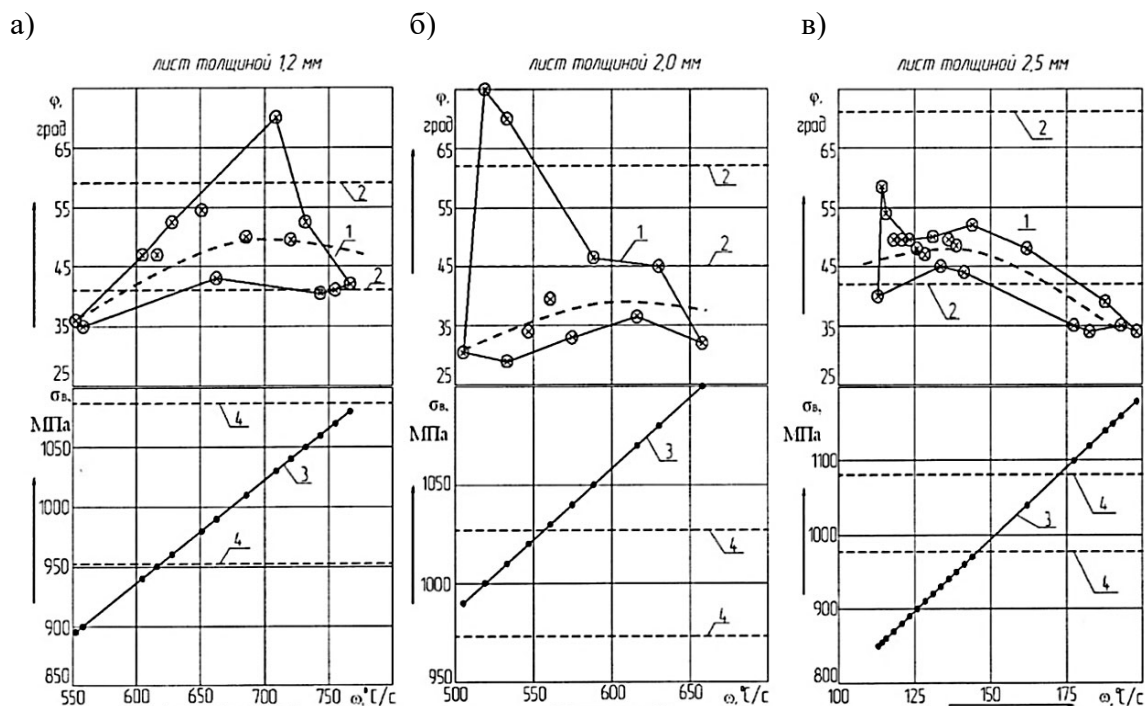


Рис. 5. Изменение угла загиба и предела прочности сварного шва (данные технологического контроля за трёхлетний период) сплава ВТ20 в зависимости от скорости охлаждения:

1 и 3 – для металла шва; 2 и 4 – для основного металла; а – для листов толщиной 1,2 мм;

б – для листов толщиной 2,0 мм; в – для листов толщиной 2,5 мм

Определены конкретные условия термического цикла сварки для получения удовлетворительных свойств сварных соединений из сплава ВТ20, идентичных свойствам основного металла. Для заготовок толщиной 1,2, 2,0, 2,5 мм скорости охлаждения в области превращения соответственно должны лежать в пределах 650...750, 550...600, 150...175 °C/с.

На КнААЗ для выполнения GTAW сварки имеется установка УСП-5000. Программное обеспечение установки приближено к стапелю УСП-2.6, который требует в процессе сварки участия сварщика для постоянного визуального контроля за размерами сварочной ванны и ручной корректировки как параметров режима сварки, так и положения горелки относительно вертикальной оси шва, что делает термический цикл сварки нестабильным.

В свою очередь управление установкой УСП-5000 выполняется по программируемой траектории относительно координат X , Y , Z с погрешностью $\pm 0,005$ мм. Для регулировки постоянного расстояния между электродом и свариваемыми деталями предусмотрен автоматический регулятор напряжения дуги (АРНД). Диапазон скорости сварки варьируется от 10 до 60 м/ч с точностью отработки $\pm 5\%$. Скорость подачи присадочной проволоки от 5 до 30 мм/с. Пределы регулировки силы сварочного тока от 20 до 800 А. Все параметры вносятся в систему оператором исключительно перед сваркой. Установка оснащена двумя источниками питания TETRIX 400 Synergic, способными выполнять TIG сварку на переменном и постоянном токе, а также режимом импульсной сварки.

Управление установкой осуществляется при помощи пульта управления, оснащённого бортовым компьютером, функциональными клавишами, тумблерами, кнопкой аварийного выключения, переключателями и светодиодными индикаторами.



Для того чтобы установка соответствовала роботизированному комплексу с обеспечением импульсного режима сварки, она должна быть перенастроена и доработана:

- системой задания режимов импульсного перемещения сварочной горелки, импульсной подачи присадочной проволоки, параметров пульсирующей дуги с взаимной синхронизацией осцилляций;

- системой разбивки траектории перемещения горелки на участки с заданием разных параметров сварки для каждого участка.

Выводы:

1. Решение проблемы порообразования в сварных соединениях титановых тонкостенных конструкций требует концептуального пересмотра нормативно-технологической документации, регламентирующей разработку технологических процессов, в частности по вопросам операций подготовки кромок под сварку.

2. Анализом насыщенности поверхности кромок, подготовленных под сварку, капиллярно-конденсированными загрязнениями и уровня дефектности металла шва определены разделительно-подготовительные технологические операции: пластическая деформация обкаткой фрезерованной поверхности, газолазерный раскрой в среде азота и аргона, комбинации газолазерного раскрова с любым видом раскрова, обеспечивающие $q_{\text{деф}} = 0$ при $N \approx 1$.

3. Показано, что при сварке плавлением псевдо- α -титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения, характерного для импульсного режима сварки, происходит увеличение прочности сварных соединений.

4. Исключение порообразования в металле шва в процессе сварки плавлением титановых конструкций открывает возможность программируемого управления параметрами термического цикла сварки для обеспечения размерной точности и прогнозирования свойств сварных конструкций и реализуется на УСП-5000 путём модернизации установки для работы в импульсном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Froes F. H. Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications. – ASM International, 2015. – 416 p.
2. Welding and Joining of Aerospace Materials Edited by M. C. Chaturvedi Woodhead Publishing, 80 High Street, Sawston, Cambridge, CB22 3HJ, UK. 2012. 430 p.
3. Leyens C., Peters M. (Eds.) Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2003. – 513 p.
4. C. Leyens and M. Peters, Eds.: Titanium and Titanium Alloys-Fundamentals and Application, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2003.
5. Vagi J. J., Monroe R. E., Evans R. M., Martin D. C. Welding Procedures for Titanium and Titanium Alloys // Huntsville: George C. Marshall Space Flight Center, 1965. – 217 p.
6. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Б. Н. Марьин и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
7. Сварка в самолётостроении / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 2008. – 581 с.
8. Silvinskii, V. A., et al., «Role of hydrides in pore formation in welding titanium». Paton Welding Journal, Vol. 6 (1994), p. 265-269.
9. Okamoto, H., «H-Ti (Hydrogen-Titanium)». Journal of Phase Equilibria, Vol. 13 (1992), p. 443.
10. Wang, W. E., «Thermodynamic evaluation of the titanium-hydrogen system». Journal of Alloy and Compounds, vol. 238, (1996), p. 6-12.
11. Huang, J., et al., «Hydrogen Transport and Rationalisation of Porosity Formation during Welding of Titanium Alloys». Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 42, No. 2, (2012) p. 582-591.
12. Huang, J., et al., «On The Mechanism of Porosity Formation During Welding of Titanium Alloys». Acta Materialia, Vol. 60, (2012), p. 3215-3225.
13. Пористость при сварке цветных металлов / В. В. Редчиц, В. А. Фролов, В. А. Казаков, В. И. Лукин. – М.: Издательский центр «Технология машиностроения». 2002. – 448 с.
14. Nikiforov, G. D. and Redchits V. V., «The Mechanism of Pore Formation When Thick Titanium Alloys are Fusion Welded». Avt. Svarka, Vol. 10 (1984). P. 42-45.
15. Redchits, V. V., «Scientific fundamentals and measures used to prevent the formation of pores in fusion welded titanium and its alloys». Welding International, Vol. 11, No. 9 (1997), p. 722-728.

16. Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20 / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. В. Кныш и др. // Автоматическая сварка. – 2014. – № 9. – С. 7-18.
17. Братухин, А. Г. Технология производства титановых самолётных конструкций / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков. – М.: Машиностроение, 1995. – 443 с.
18. Lukoyanov, A. V. (2014) Formation of pores in the weld metal in automatic argon shielded arc welding of titanium alloys, *Welding international*, 28(4), p. 301-303.
19. Banerjee S., Mukhopadhyay P. Phase transformations: examples from titanium and zirconium alloys / S. Banerjee a. P. Mukhopadhyay. – Oxford; Amsterdam: Elsevier, 2007. – XXII, 813 p.
20. Joshi V. A. Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features // CRC Press, 2006. – 248 p.
21. Муравьев, В. И. Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъёмных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 6. – С. 67-79.
22. Муравьев, В. И. Обеспечение качества неразъёмных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 296 с.
23. О возможности уменьшения глубины поверхностного слоя исследуемого материала при определении водорода в титановых сплавах эмиссионным спектральным методом / Т. В. Барашева, Д. М. Давыдов, А. Ф. Летов, И. Г. Тишин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 2. – С. 18-21.
24. Патент № 2491159 С2 Российская Федерация, МПК В23К 31/12, В23К 103/14. Способ оценки перед сваркой качества сварочной проволоки и заготовок сварной конструкции из титановых сплавов: № 2011149420/02: заявлено 05.12.2011: опубликовано 27.08.2013 / Муравьев В. И., Бахматов П. В., Лончаков С. З. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «КНАГТУ»). – Бюл. 24.

Лихтин В. В.
V. V. Likhtin

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР
ОТ СООТНОШЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ КОМПОНЕНТ**

**MODELING OF DEPENDENCE OF HETEROGENEOUS STRUCTURES PROPERTIES
ON THE RATIO OF THEIR COMPONENTS**

Лихтин Владимир Валентинович – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: lihtinvv@mail.ru.

Vladimir V. Likhtin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: lihtinvv@mail.ru.

Аннотация. Исследования гетероструктур показывают, что свойства таких структур зависят от соотношения компонент, их составляющих. Чтобы установить характер этой зависимости, необходимо найти зависимость числа механических контактов различных компонент гетероструктуры от соотношения числа их составляющих. В статье рассмотрен частный случай поставленной задачи. Получена аналитическая зависимость означенных величин в рамках предлагаемой математической модели.

Summary. Studies of heterostructures show that the properties of such structures depend on the ratio of their components. To establish the nature of this dependence, it is necessary to find the dependence of the number of mechanical contacts of different components of the heterostructure on the ratio of the number of their components. The article considers a special case of the problem posed. The analytical dependence of these quantities within the framework of the proposed mathematical model is obtained.

Ключевые слова: гетероструктура, математическая модель, тетраэдр, кластер, компонента, шар.

Key words: heterostructure, mathematical model, tetrahedron, cluster, component, ball.

УДК 539.2:54

Проблема очистки вод от органических загрязнителей с каждым годом становится всё актуальней [1; 2]. Одним из перспективных способов является фотокаталитическое разложение органических загрязнителей под действием солнечного света. Известно, что одним из эффективных фотокатализаторов является TiO_2 [3]. Но этот фотокатализатор хорошо работает в УФ-области спектра. А УФ-излучение составляет всего 5 % от спектра Солнца, т. е. необходимо искать пути решения использования видимого диапазона Солнца. И этому вопросу сейчас уделяется огромное внимание со стороны учёных различных областей знаний: материаловедов, химиков, физиков, инженеров и многих других [4; 5]. Использование солнечного света в будущем приведёт к улучшению экологии в целом и будет являться основой для получения неиссякаемой энергии для человечества. Многие исследователи пошли простым прямым путём и стали модифицировать TiO_2 с помощью добавления различных материалов для того, чтобы перевести область поглощения в видимый диапазон света [6; 7]. Но данные исследования пока не принесли ожидаемого результата. В работах [8; 9] авторы использовали гетероструктуры карбоната и висмутата стронция для фотокаталитического очищения воды от органического загрязнителя на примере метиленового синего.

С одной стороны, малое количество сообщений о висмутатах бария и магния может быть связано со сложностью их синтеза, а с другой – с их относительно низкой фотокаталитической активностью. Анализ сообщений приводит к выводу, что за существенную фотокаталитическую активность висмутатов ответственны катионы Bi^{5+} . Например, среди висмутатов стронция наиболее фотокаталитически активное соединение $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$ – единственное, содержащее катионы Bi^{5+} [10]. Высокая фотокаталитическая активность перовскитов MBiO_3 ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Ba}$) также связана с катио-

нами Bi^{5+} [11; 12]. Кроме того, есть работа, посвящённая исключительно фотокатализаторам на основе висмутатов кальция и свинца, содержащим катион Bi^{5+} [13]. В другой работе показано, что фотокаталитическая активность $\text{Mg}_x\text{Bi}_{(26-x)}\text{O}_{40}$ связана с наличием Bi^{5+} в его кристаллической решётке [14].

Однако синтез висмутатов щёлочноземельных металлов, содержащих катион Bi^{5+} , является сложной процедурой. Кроме того, количество возможных фаз, характеризующихся этим специфическим состоянием окисления висмута, ограничено. В качестве альтернативы фотокаталитическую активность висмутатов с катионом Bi^{3+} можно усилить либо путём создания гетероструктур с сокатализаторами [15–17], либо путём легирования [18].

Недавно было показано, что добавление фотокаталитически неактивных добавок, таких как карбонаты щёлочноземельных металлов, к привычному фотокатализатору TiO_2 может значительно увеличить его фотокаталитическую активность [19]. Этот эффект также наблюдается при добавлении SrCO_3 к известному фотокатализатору $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$ [20]. В статье [9] авторы расширяют наши знания о влиянии карбонатов щёлочноземельных металлов на фотокатализаторы на основе висмутата. В частности, объясняется, как SrCO_3 усиливает фотокаталитическую активность $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ и $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6$ в гетероструктурах $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5/\text{SrCO}_3$ и $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6/\text{SrCO}_3$. Сообщается о структуре и свойствах новых гетероструктур $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5/\text{SrCO}_3$ и $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6/\text{SrCO}_3$ с содержанием SrCO_3 от 10 до 90 весовых процентов. Формирование гетероструктур происходило методом спекания, и, по данным XRD, SEM и EDX исследований, были получены высококристаллические материалы с хорошо выраженными карбонат-висмутатными границами раздела. В реакции фотодegradации фенола в водном растворе гетероструктуры продемонстрировали фотокаталитическую активность, превышающую таковую у TiO_2 . Показано, что их фотокаталитическое действие обусловлено наличием полупроводниковых гетеропереходов II типа.

Некоторые исследования показывают, что свойства гетероструктур зависят от соотношения компонент, их составляющих. Например, в гетероструктурах, состоящих из висмутата стронция и карбоната стронция, наблюдается увеличение фотокаталитической активности при определённом соотношении их компонент (см. рис. 1).

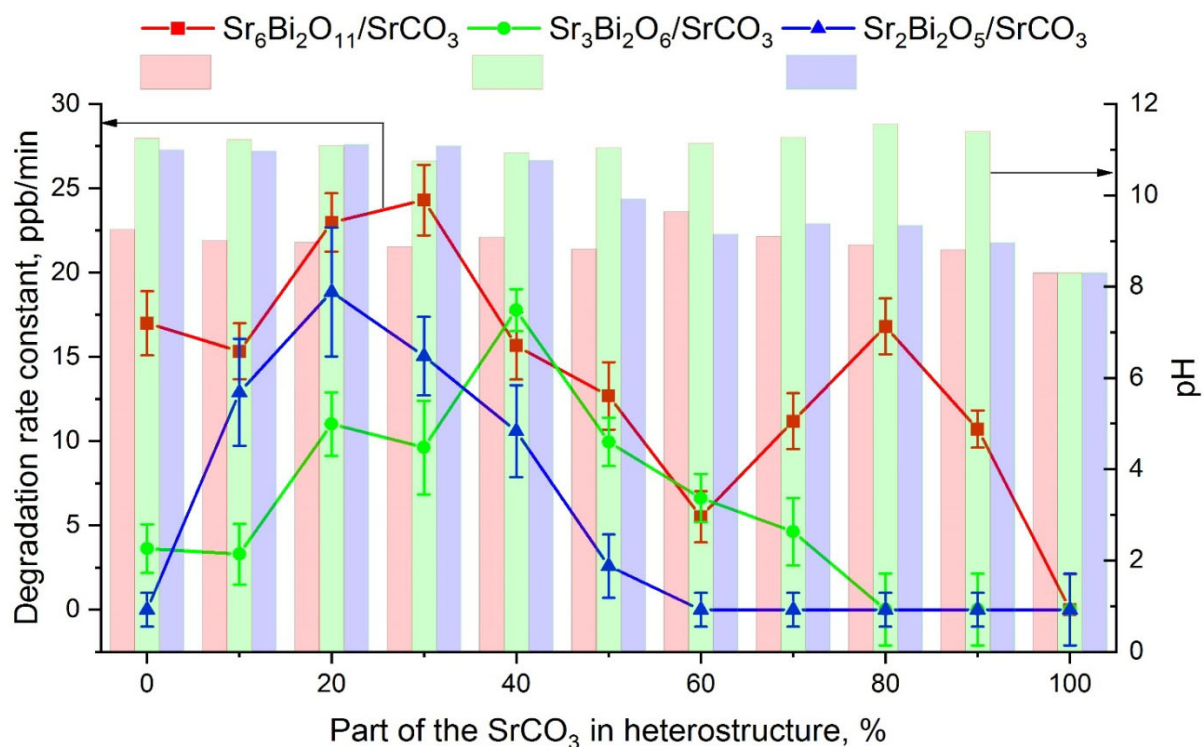


Рис. 1. Зависимость фотокаталитической активности от соотношения между висмутатом стронция и карбонатом стронция в гетероструктуре [9]

Сами гетероструктуры получаются спеканием висмутата стронция и карбоната стронция. Перед спеканием порошки тщательно перетираются.

Для того чтобы определить зависимость активности гетероструктур от концентрации их составляющих, очевидно, нужно знать зависимость числа различных контактов, составляющих эти структуры, от их количества.

Будем считать, что компоненты имеют сферическую форму и гетероструктура состоит из двух компонент типа 1 и 2. В такой структуре возможны контакты между их составляющими типа 1-1, 1-2, 2-2 (см. рис. 2). Важно, что количество компонент в гетероструктуре велико, а размеры составляющих порядка нанометров.

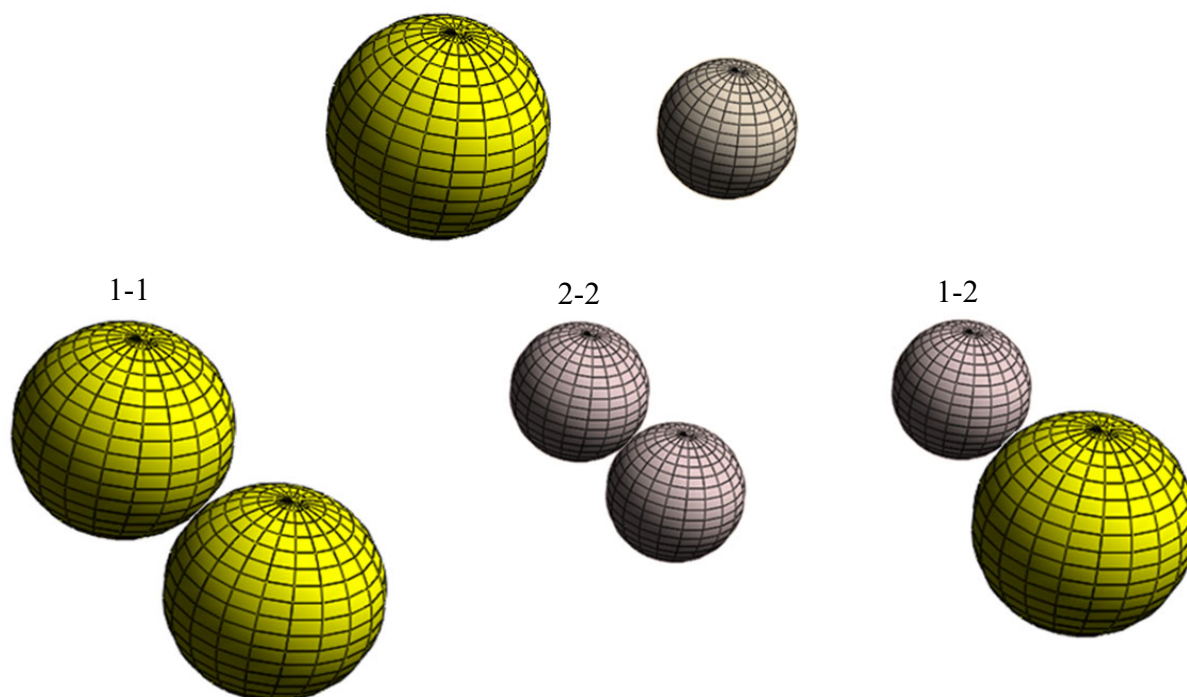


Рис. 2. Типы контактов компонент гетероструктуры

В этой статье рассматривается частный случай. Это необходимо для перехода к решению поставленной задачи.

Положим, что структура состоит из компонент (шаров) одного диаметра, при этом в совокупности компоненты образуют тетраэдр, где каждая компонента (кроме граничных) касается двенадцати других (см. рис. 3, *а*). Тетраэдр составлен из l уровней, каждый из которых является правильным треугольником, начиная от верхней вершины. Уровни состоят из рядов, параллельных основанию соответствующего правильного треугольника (рис. 3, *б*). Количество уровней тетраэдра совпадает, очевидно, с количеством рядов в последнем уровне, т. е. в основании тетраэдра (см. рис. 3, *б*).

В качестве формы модели структуры можно взять и другую (куб, сфера и т. д.). Но это не принципиально. Предлагаемая математическая модель наиболее рациональна.

Для решения поставленной задачи найдём зависимость количества шаров n в тетраэдре от числа уровней l . Очевидно, количество шаров каждого уровня – сумма членов арифметической прогрессии с первым членом и разностью единица. То есть количество шаров в уровне m будет равно

$$\sum_{i=1}^m i = \frac{1+m}{2} m.$$

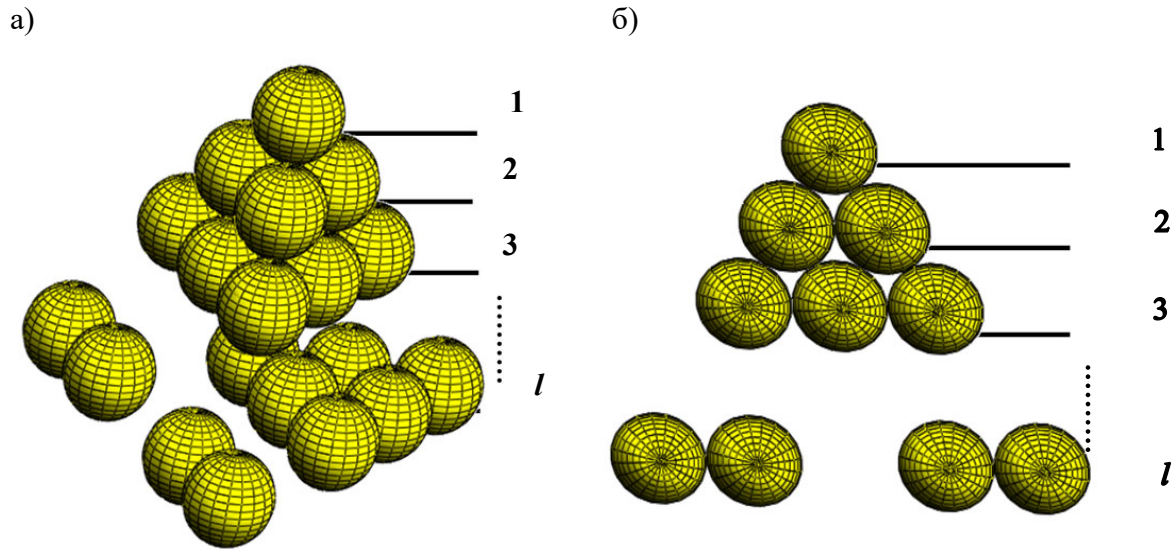


Рис. 3. Модель гетероструктуры в форме тетраэдра

Тогда количество шаров, составляющих тетраэдр, определяется как сумма шаров всех уровней, т. е.

$$n = \sum_{i=1}^l \frac{1+i}{2} i.$$

Преобразуем последнюю формулу, используя формулы суммы членов арифметической прогрессии и суммы квадратов целых чисел:

$$n = \sum_{i=1}^l \frac{1+i}{2} i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l i^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1+l}{2} l + \frac{1}{2} \cdot \frac{l(l+1)(2l+1)}{6}.$$

После элементарных преобразований получим

$$n = \frac{1}{6} l(1+l)(2+l).$$

Из последнего равенства, используя формулы Кардана для решения кубического уравнения, можно найти зависимость $l(n)$. Но проще поступить иначе. Очевидно, что сумма объёмов шаров в тетраэдре $V_{\text{ш}}$ приближённо равна объёму тетраэдра $V_{\text{т}}$, если за единицу длины взять диаметр шара. Воспользовавшись формулами объёма шара и тетраэдра, получим

$$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{1}{2}\right)^3 n = \frac{\pi}{6} n, \quad V_{\text{т}} = \frac{1}{6\sqrt{2}} l^3.$$

Приравнявая $V_{\text{ш}}$ и $V_{\text{т}}$, получим зависимость $l(n)$:

$$l \approx \left[\sqrt[3]{\pi n \sqrt{2}} \right].$$

Перейдём к определению числа касаний между шарами в тетраэдре.

Примем следующие обозначения:

1. k – суммарное количество касаний;
2. k' – суммарное количество касаний между шарами в уровнях тетраэдра;
3. k'' – суммарное количество касаний шаров между уровнями тетраэдра.

Не трудно видеть, что число касаний шаров в уровне m будет равно сумме касаний в рядах до ряда m плюс утроенное число шаров предыдущего ряда $(m - 1)$. Тогда количество касаний шаров с m рядами

$$3 \sum_{i=1}^m (i - 1) = \frac{3}{2} m(m - 1).$$

Из чего следует, что

$$k' = \frac{3}{2} \sum_{i=1}^l i(i - 1) = \frac{1}{2} (l - 1)l(l + 1).$$

Число касаний шаров между соседними уровнями m и $m + 1$ будет равно утроенному количеству шаров уровня m . Тогда

$$k'' = \frac{3}{2} \sum_{i=1}^l (i - 1)i = \frac{1}{2} (l - 1)l(l + 1).$$

Таким образом, получаем $k' = k''$, следовательно,

$$k = (l - 1)l(l + 1).$$

Рассмотрим случай, когда гетероструктура содержит компоненты двух типов одинакового диаметра. Обозначим:

1. n_i – количество компонент (шаров) i -го типа ($i = 1, 2$);
2. k_{ij} – количество касаний компонент типа i и j ($i, j = 1, 2$).

Разобьём гетероструктуру (тетраэдр) на части, которые будем называть кластерами.

Кластер состоит из четырёх шаров одного типа, касающихся друг друга (см. рис. 4).

Количество кластеров всей структуры, очевидно, будет $n/4$.

Заменим в кластерах один шар первого типа на шар второго типа того же размера так, чтобы структура содержала только касания шаров типа 1-1 и 1-2 (см. рис. 5, а).

Тогда при условии $0 < n_2 < n/4$ получим

$$k_{11} = k - 12 \cdot n_2, \quad k_{12} = 12 \cdot n_2, \quad k_{22} = 0.$$

Пусть теперь структура состоит из кластеров, каждый из которых содержит один шар второго типа и не содержит контактов типа 2-2. Заменим в кластерах ещё один шар первого типа на шар второго типа (см. рис. 5, б) так, чтобы структура содержала касания шаров типа 1-1, 1-2, 2-2, причём шары второго типа разных кластеров контактов не имеют. Тогда при условии $n/4 < n_2 < n/2$ получим

$$k_{22} = n_2 - n/4, \quad k_{12} = 12n_2 + 10k_{22} = 22 \cdot n_2 - 5n/2, \quad k_{11} = k - 12n_2 - 11k_{22} = k - 23 \cdot n_2 + 11n/4.$$

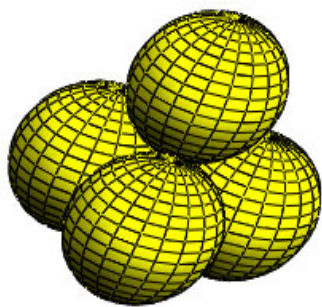
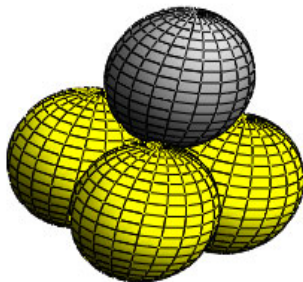


Рис. 4. Кластер

а)



б)

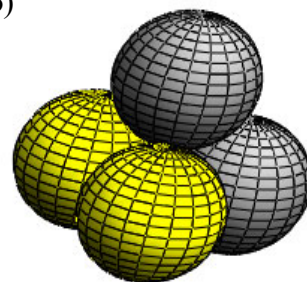


Рис. 5. Кластеры с двумя типами шаров

Поясним полученный результат.

На рис. 6, а изображён кластер (тёмно-серый шар второго типа, светло-серые шары первого типа). Остальные 9 бесцветных шаров первого типа касаются темно-серого. Шар второго типа, очевидно, имеет 12 контактов типа 1-2.

Заменим в кластере ещё один шар первого типа (светло-серый) на шар второго типа (тёмно-серый) (рис. 6, б). Очевидно, при этом один контакт типа 1-2 заменится контактом типа 2-2, а одиннадцать контактов типа 1-1 заменятся на столько же контактов типа 1-2.

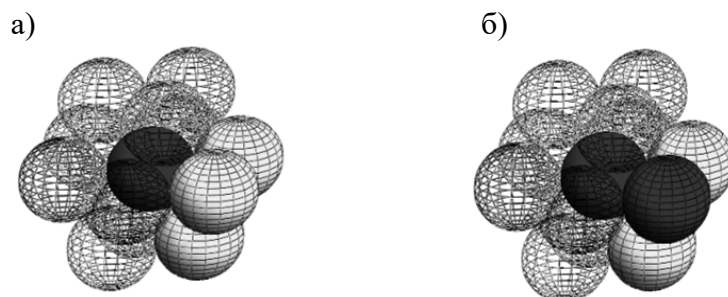


Рис. 6. Структура, содержащая кластеры с одним шаром второго типа (а) и двумя шарами второго типа (б)

Таким образом, в рамках предложенной математической модели получен следующий результат:

$$k = k_{11} = (l - 1)l(l + 1), \quad \text{где } l \approx \left\lceil \sqrt[3]{\pi n \sqrt{2}} \right\rceil, \quad k_{12} = 0, \quad k_{22} = 0;$$

$$0 < n_2 < \frac{n}{4} \rightarrow k_{11} = k - 12n_2, \quad k_{12} = 12n_2, \quad k_{22} = 0;$$

$$\frac{n}{4} < n_2 < \frac{n}{2} \rightarrow k_{11} = k - 23n_2 + \frac{11n}{4}, \quad k_{12} = 22n_2 - \frac{5n}{2}, \quad k_{22} = n_2 - \frac{n}{4}.$$

Выводы:

1. Полученные формулы могут быть использованы для установления зависимости различных свойств гетероструктур от соотношения компонент, их составляющих, в рассмотренном частном случае.
2. Предлагаемая математическая модель может быть использована для решения общей задачи (компоненты разного размера).
3. Возможно использование предложенной модели для рассмотрения аналогичной задачи с большим, чем 2, числом компонент, составляющих гетероструктуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов, В. В. Экология города / В. В. Денисов. – М.: MapT, 2008. – 832 с.
2. Миркин, Б. М. Экология России / Б. М. Миркин. – М.: Устойчивый мир, 2000. – 271 с.
3. Гидротермальный синтез эффективных фотокатализаторов на основе TiO_2 / В. К. Иванов, В. Д. Максимов, А. С. Шапорев [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2012. – Т. 55. – № 2. – С. 184-189.
4. Xu Y-J. Promises and Challenges in Photocatalysis. Front. Catal. (2021) 1:708319. doi: 10.3389/fcrls.2021.708319.
5. Alireza Barzagan. Photocatalytic Water and Wastewater Treatment. IWA Publishing Unit 104–105, Export Building 1 Clove Crescent London E14 2BA, UK. 2022, 209 p.
6. Zheng, F.; Martins, P. M.; Queirós, J. M.; Tavares, C. J.; Vilas-Vilela, J. L.; Lanceros-Méndez, S.; Reguera, J. Size Effect in Hybrid $\text{TiO}_2\text{:Au}$ Nanostars for Photocatalytic Water Remediation Applications. Int. J. Mol. Sci. 2022, 23, 13741. <https://doi.org/10.3390/ijms232213741>.



7. Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N. et al. Recent progress on Ag/TiO₂ photocatalysts: photocatalytic and bactericidal behaviors. *Environ Sci Pollut Res* 28, 44638–44666 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14996-y>.
8. A. V. Shtareva, D. S. Shtarev, M. I. Balanov, V. O. Krutikova, I. A. Astapov. Bismuthyl Carbonate Heterostructures Are a Way to Enhance the Photocatalytic Activity of Alkaline-Earth Bismuthates. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 67, 1375–1385 (2022). DOI: 10.1134/S0036023622090157.
9. D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, R. Kevorkyants, A. V. Syuy. Synthesis, characterization, optoelectronic and photocatalytic properties of Sr₂Bi₂O₅/SrCO₃ and Sr₃Bi₂O₆/SrCO₃ heterostructures with varying SrCO₃ content. *Chemosphere*. Volume 267, March 2021, 129229 DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.129229.
10. D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, V. K. Ryabchuk, A. V. Rudakova, P. D. Murzin, M. S. Molokeev, A. V. Koroleva, A. I. Blokh, Nick Serpone, Solid-state synthesis, characterization, UV-induced coloration and photocatalytic activity – The Sr₆Bi₂O₁₁, Sr₃Bi₂O₆ and Sr₂Bi₂O₅ bismuthates, *Catalysis Today*, Volume 340, 2020, Pages 70–85, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.09.035>.
11. Karuppannan Rokesh, Mohan Sakar, Trong-On Do. Calcium Bismuthate (CaBiO₃): A Potential Sunlight-Driven Perovskite Photocatalyst for the Degradation of Emerging Pharmaceutical Contaminants, *ChemPhotoChem*, Volume4, Issue5, May 2020, Pages 373–380.
12. Jie Ge, Wan-Jian Yin, and Yanfa Yan. Solution-Processed Nb-Substituted BaBiO₃ Double Perovskite Thin Films for Photoelectrochemical Water Reduction. *Chem. Mater.* 2018, 30, 3, 1017–1031. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04880>.
13. Nobuhiro KUMADA, Nan XU, Akira MIURA, Takahiro TAKEI. Preparation and photocatalytic properties of new calcium and lead bismuthates, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2014 Volume 122 Issue 1426 Pages 509–512. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.122.509>.
14. Dmitry S. Shtarev, Ruslan Kevorkyants, Maxim S. Molokeev, and Anna V. Shtareva, Effect of Composition on the Optical and Photocatalytic Properties of Visible Light Responsive Materials Bi_{26-x}Mg_xO₄₀, *Inorganic Chemistry* 2020 59 (12), 8173–8183. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.0c00486.
15. Xuexiang Hu, Chun Hu, Jiahui Qu, Photocatalytic decomposition of acetaldehyde and Escherichia coli using NiO/SrBi₂O₄ under visible light irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 69, Issues 1–2, 2006, Pages 17–23, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.008>.
16. Chun Hu, Xuexiang Hu, Jian Guo, and Jiahui Qu, Efficient Destruction of Pathogenic Bacteria with NiO/SrBi₂O₄ under Visible Light Irradiation, *Environmental Science & Technology* 2006 40 (17), 5508–5513, DOI: 10.1021/es052405v.
17. Yongjiao Wang, Yiming He, Tingting Li, Jun Cai, Mengfei Luo, Leihong Zhao, Photocatalytic degradation of methylene blue on CaBi₆O₁₀/Bi₂O₃ composites under visible light, *Chemical Engineering Journal*, Volumes 189–190, 2012, Pages 473–481, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.079>.
18. Yuki Obukuro, Shigenori Matsushima, Kenji Obata, Takuya Suzuki, Masao Arai, Eiji Asato, Yuji Okuyama, Naoki Matsunaga, Go Sakai, Effects of La doping on structural, optical, electronic properties of Sr₂Bi₂O₅ photocatalyst, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 658, 2016, Pages 139–146, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.199>.
19. Fabian Sieland, Ngoc Anh-Thu Duong, Jenny Schneider, Detlef W. Bahnemann, Influence of inorganic additives on the photocatalytic removal of nitric oxide and on the charge carrier dynamics of TiO₂ powders, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Volume 366, 2018, Pages 142–151, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.01.036>.
20. D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, V. Ju. Mikhailovski, E. O. Nashchochin, On the influence of strontium carbonate on improving the photo-catalytic activity of strontium bismuthate Sr₆Bi₂O₁₁, *Catalysis Today*, Volume 335, 2019, Pages 492–501, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.016>.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ
В ДИАПАЗОНЕ ЧИСЕЛ $100 < Re < 3 \cdot 10^6$**

**INVESTIGATION OF FLUID DYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF A FLAT PLATE
IN THE NUMBER RANGE $100 < Re < 3 \cdot 10^6$**

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.
Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. Исследована возможность использования модели пограничного слоя Л. Прандтля для получения приближённых аналитических решений для ряда задач гидродинамики и теплообмена в диапазоне чисел $100 < Re < Re_{кр}$ в предположении, что критическое число $Re_{кр} = 3 \cdot 10^6$ для плоской пластины. Модель предусматривает сохранение всех членов в уравнениях Навье – Стокса, записанных в форме вихревой напряжённости и теплообмена, и их линеаризацию в конвективной части. Дано решение двух задач обтекания плоской пластины в режимах гидродинамического и теплового взаимодействия потока с обтекаемым телом. Получены приближённые аналитические решения для вихревой напряжённости и теплообмена в диапазоне чисел $100 < Re < Re_{кр}$. Математически показано возникновение резких скачков вихревой напряжённости (касательных напряжений) и температуры в точке перехода ламинарного течения в турбулентное. Решения проведены в предположении, что течение стационарное, а плотность, вязкость, температуропроводность среды не зависят от температуры.

Summary. The possibility of using L. Prandtl's boundary layer model to obtain approximate analytical solutions for a number of problems of hydrodynamics and heat transfer in the range of numbers $100 < Re < Re_{кр}$ under the assumption that the critical number $Re_{кр} = 3 \cdot 10^6$ for a plane plate is investigated. The model assumes the conservation of all terms in the Navier-Stokes equations, written in the form of vortex tension and heat transfer, and their linearization in the convective part. A solution of 2 problems of flow around a plane plate in the modes of hydrodynamic and thermal interaction of the flow with the streamlined body is given. Approximate analytical solutions for vortex tension and heat transfer in the range of numbers $100 < Re < Re_{кр}$. The occurrence of sharp jumps in vortex tension (shear stresses) and temperature at the point of transition of laminar flow into turbulent flow is mathematically shown. The solutions are based on the assumption that the flow is steady, and the density, viscosity, and thermal transmittance of the medium do not depend on the temperature.

Ключевые слова: модель, пограничный слой, пластина, гидродинамика, теплообмен, вихревая напряжённость, скачок, трение, энергия, диссипация, турбулиизация, критерии Re , Pr .

Key words: model, boundary layer, plate, fluid dynamics, heat transfer, vortex tension, jump, friction, energy, dissipation, turbulence, criterias Re , Pr .

УДК 532.526.2:536.24

Серьёзные успехи в развитии научных исследований в сфере механики жидкости и газа, в первую очередь в историческом плане, оказались возможными с появлением модели пограничного слоя [1], созданной Л. Прандтлем.

Физическая интерпретация модели позволяет поле течения разделить на внешнее, невозмущённое течение без трения, т. е. свободное от вращения частиц, и пограничный слой (внутреннее, возмущённое течение), в котором проявляется интенсивное вращение частиц, т. е. возникают силы трения.

Математическая интерпретация модели определяет, что граничные условия назначаются не на бесконечности, а на внешней границе конечного по своей величине пограничного слоя и, соответственно, на поверхности обтекаемого тела.

С математической стороны модель описывается упрощёнными уравнениями Навье – Стокса, полученными в соответствии с представлениями теории подобия и моделирования [2]. Упрощение основано на том, что в уравнениях Навье – Стокса отбрасываются члены, на порядок и более меньшие оставленных. Критерием оценки порядка величин является отношение толщины пограничного слоя δ к характерному размеру тела l :

$$\frac{\delta}{l} < 0,1.$$

Под характерным размером l в зависимости от поставленной задачи будет пониматься или конечная длина пластины, или, в случае бесконечной пластины, расстояние от передней кромки пластины до точки, где ламинарное течение переходит в турбулентное. Для других тел характерным размером может быть, например, диаметр (для сферы и цилиндра), продольная длина или размах крыла (для летательного аппарата) и т. д.

Упрощение уравнений обусловлено тем, что использование полных, нелинейных уравнений Навье – Стокса и теплообмена [1] для получения аналитических решений не представляется возможным ввиду их чрезвычайной сложности, и до настоящего времени не найдены методы их интегрирования в общем виде. Это обстоятельство вынуждало исследователей искать решение проблемы на путях изучения предельных случаев, где оказалось возможным для определённых классов задач существенно упростить уравнения Навье – Стокса и теплообмена и, соответственно, привести их к виду, удобному для интегрирования [3–5].

Недостаток рассматриваемой модели пограничного слоя заключается в том, что она позволяет решать задачи в пределах изменения числа Рейнольдса $2500 < Re < Re_{кр}$ для плоской пластины, здесь $Re_{кр}$ – критическое число Рейнольдса, определяющее переход ламинарного режима течения в турбулентное. При этом принимается, что критическое число Рейнольдса для пластины равно $Re_{кр} = 3 \cdot 10^6$.

Так как толщина пограничного слоя δ имеет конечную величину, то в пределах ламинарного течения её можно определить зависимостью [1]

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{Re_x^{0,5}}, \quad (1)$$

где x – продольная координата, $Re_x = \frac{u \cdot x}{\nu}$; здесь u – скорость набегающего потока, в общем случае является функцией координат x и y ; ν – коэффициент кинематической вязкости среды.

Представим зависимость (1) в форме, включающей характерный размер длины пластины l :

$$\frac{\delta}{x} \cdot \frac{l}{l} = \frac{5}{\left(\frac{u \cdot x}{\nu} \cdot \frac{l}{l}\right)^{0,5}}.$$

Отсюда, обозначив $\bar{\delta} = \frac{\delta}{l}$, $\bar{x} = \frac{x}{l}$, получаем

$$\bar{\delta} = \frac{5}{Re_l^{0,5}} \cdot \bar{x}^{0,5}, \quad (2)$$

где $Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu}$.

Формула (2) предполагает, что расстояние δ от поверхности пластины $y = 0$ до границы «пограничного слоя» $y = \delta$ – это расстояние, на внешней границе которого продольная скорость течения потока u отличается от скорости невозмущённого потока не более чем на 1 % [1].

Из формулы (2) видно, что максимальная величина $\bar{\delta}$ получается для каждого значения критерия Re_l при координате $\bar{x} = 1$.

Действительно, при $\bar{x} = 1$ минимальному значению критерия $Re = 2500$ соответствует $\frac{\delta}{l} = 0,1$, максимальному $Re_{кр} = 3 \cdot 10^6$ соответствует $\frac{\delta}{l} \approx 0,003$, т. е. $0,003 < \bar{\delta} < 0,1$.

Кроме того, формула (2) показывает, что толщина пограничного слоя зависит от критерия Re и падает с ростом последнего.

Таким образом, в силу математических упрощений модель не позволяет охватить диапазон чисел $100 < Re < 3 \cdot 10^6$.

Однако если в уравнениях Навье – Стокса, записанных в форме уравнения вихревой напряжённости, сохранить все члены и провести линеаризацию его конвективной части, то модель пограничного слоя приобретает дополнительное свойство, позволяющее расширить его возможности и на область чисел $100 < Re < 2500$, а теоретически и до числа $Re = 25$. В этом случае модель пограничного слоя будет работоспособной во всей области чисел $100 < Re < 3 \cdot 10^6$.

Такое представление уравнения Навье – Стокса предполагает, что $\bar{\delta}$ в области чисел $100 < Re < 2500$ лежит в диапазоне $0,1 < \bar{\delta} \leq 1$.

Это также определяет тот факт, что значения продольных и поперечных возмущений в диапазоне чисел $100 < Re < 2500$ внутри пограничного слоя являются величинами приблизительно одного порядка, хотя и те, и другие по абсолютным значениям малы. Поэтому не учитывать одни, по отношению к другим с физической точки зрения в этой области чисел Re неверно.

Линеаризация, снижая точность результатов решения, позволяет получать хотя и приближённые, но аналитические решения для определённого круга задач гидродинамики.

Все вышеприведённые соображения по гидродинамической модели пограничного слоя относятся и к представлениям тепловой модели пограничного слоя [3]. В последующем будем их характеризовать как гидродинамический пограничный слой, тепловой пограничный слой.

Следует отметить, что для решения задач гидродинамики с учётом теплообмена для области чисел $1 < Re \leq 100$ Л. И. Кудряшёвым и А. А. Гусаковым была предложена модель «области гидродинамического влияния» [6]. Она нашла отражение также в работах [7; 8]. В работе [9] автором для решения тех же задач и в том же диапазоне чисел Re предложена модель «области влияния».

Предпосылки, на основе которых определялись «область гидродинамического влияния» и «область влияния», не всегда оказывались удовлетворительными. Задачи решались численными методами.

Общим недостатком рассмотренных моделей «областей влияния» стал достаточно узкий диапазон чисел Re .

Вполне понятно, что современные вычислительные методы позволяют решать в рамках уравнений Навье – Стокса и теплообмена задачи любой сложности. Необходимость применения приближённых математических моделей заключается в том, что они позволяют в аналитической форме выявить те или иные закономерности и сопоставить их результаты с результатами точных решений конкретных задач. В работе Гебхарта [10] подчёркивается, что в тех случаях, когда допущения в рамках той, или иной математической модели становятся неприменимы к использованию в заданном диапазоне чисел Re , прямое привлечение численных методов может привести к ошибочным результатам.

Рассмотрим приближённое решение задач обтекания плоской пластины в рамках модели пограничного слоя. Будем рассматривать стационарные течения и полагать, что плотность, вязкость и температуропроводность среды не зависят от температуры.

Модель пограничного слоя для различных чисел Re_l иллюстрируется на рис. 1.

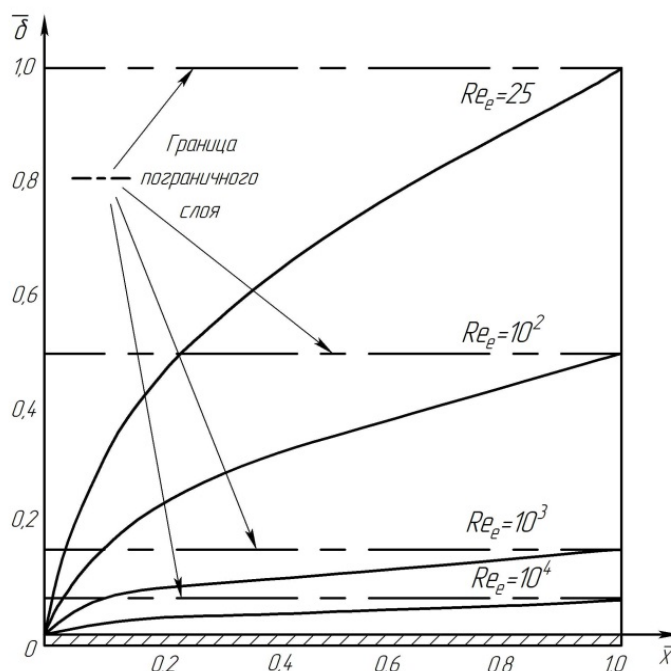


Рис. 1. Модель пограничного слоя при обтекании плоской пластины конечной длины для различных чисел Re_l

Принимается, что отношение $\frac{\delta}{l}$ справедливо в пределах $0,003 < \frac{\delta}{l} \leq 1$, где числам $100 < Re_l < 2500$ соответствует порядок $\frac{\delta}{l} \leq 1$, а числам $2500 < Re_l < 3 \cdot 10^6$ соответствует порядок $\frac{\delta}{l} \ll 1$.

Из рис. 1 также видно, что с уменьшением критерия Re_l толщина гидродинамического пограничного слоя непрерывно увеличивается по координате y .

В рамках модели пограничного слоя на первом этапе рассматривается первая задача об обтекании плоской пластины бесконечной длины в установившемся ламинарном режиме с точки зрения гидродинамического пограничного слоя, на следующем этапе вторая задача о теплообмене при обтекании плоской пластины бесконечной длины с точки зрения теплового пограничного слоя. Так как рассматривается обтекание плоской пластины бесконечной длины, то при решении этих задач принимаем в качестве характерного размера l расстояние от передней кромки пластины до точки, где ламинарный режим течения переходит в турбулентный.

Для решения задач используется уравнение Навье – Стокса, записанное в форме уравнения переноса вихрей и уравнение переноса теплоты с учётом диссипации энергии [1].

Уравнение переноса вихрей:

$$\left(u \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y}\right) = \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right), \quad (3)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right), \quad (4)$$

где ω – вихревая напряжённость; ν – поперечная потоку скорость вдоль оси y .

К уравнению (1) присоединяется уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Уравнение переноса теплоты с учётом диссипации энергии [1]:

$$\left(u \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right) = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2}\right) + \frac{v}{C_p} \cdot \Phi. \quad (6)$$

где a – коэффициент температуропроводности среды; C_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; Φ – диссипативная функция; ϑ – разность между температурой T в каждой точке температурного поля вокруг тела, в нашем случае около пластины, и постоянной температурой T_∞ на очень большом расстоянии от тела, для нашей задачи на внешней границе пограничного слоя T_δ (°C), следовательно,

$$\vartheta = (T - T_\infty) = (T - T_\delta). \quad (7)$$

Функция Φ с учётом уравнения неразрывности (5) имеет вид

$$\Phi = 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right] + \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right]^2. \quad (8)$$

Анализ соотношения (8) с оценкой значимости членов, входящих в функцию Φ в рамках теории подобия, позволяет в последней скобке отбросить первый член по сравнению со вторым как малозначимый. Их отношение даёт величину $\frac{\delta^4}{l^4}$.

Если принять $\frac{\delta}{l} = 0,5$, то это соответствует значению $Re_l \sim 100$, исходя из формулы (1).

Таким образом, отбрасывание члена $\frac{\partial v}{\partial x}$ позволяет считать модель теплового пограничного слоя справедливой в диапазоне $100 < Re_l < Re_{кр}$.

Рассмотрим решение первой задачи, для чего используем уравнения (3), (4), (5).

Приведём уравнение (3) к безразмерному виду и одновременно осуществим его линеаризацию. Для этого примем

$$u = u_\delta,$$

где u_δ – продольная скорость на внешней границе гидродинамического пограничного слоя.

$$\bar{y} = \frac{y}{\delta}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0},$$

где $\bar{\omega}$ – относительное значение вихревой напряжённости; ω_0 – вихревая напряжённость в точке $\bar{x} = 1$ при $\bar{y} = 0$.

Зависимость для поперечной скорости возьмём из работы [11] и представим в форме

$$v = - \frac{0,865}{Re_x^{0,5}} \cdot u_\delta.$$

Преобразуем её к виду

$$v = - \frac{0,865}{Re_l^{0,5}} \cdot \frac{u_\delta}{\bar{x}^{0,5}}. \quad (9)$$

Знак минус перед формулой (9) взят из условия неразрывности (5).

С учётом принятых обозначений соотношение (3) примет вид

$$\left(\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{x}} - \frac{0,865}{Re_l^{0,5}} \cdot \frac{1}{\bar{x}^{0,5}} \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{y}}\right) = \frac{1}{Re_l} \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{l^2}{\delta^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{y}^2}\right). \quad (10)$$

Подставим формулу (2) в зависимость (10), получим

$$\left(\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{x}} - \frac{0,173}{\bar{x}} \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{y}}\right) = \frac{1}{Re_l} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{25 \cdot \bar{x}} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{y}^2}. \quad (11)$$

Вид полученного соотношения (11) даёт основание воспользоваться при интегрировании принципом независимости изменения $\bar{\omega}$ по \bar{x} и \bar{y} . В этом случае последнюю формулу можно представить в виде двух соотношений:

$$\begin{aligned}\bar{x} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{x}^2} - \bar{x} \cdot \text{Re}_l \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{x}} &= \text{Re}_l \cdot C, \\ \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{y}^2} + 4,325 \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{y}} &= -25 \cdot C,\end{aligned}$$

где C – постоянное число, подлежащее определению.

Так как $\text{Re}_l \neq 0$ в диапазоне изменения $0 \leq \bar{x} \leq 1$, то первое соотношение при $\bar{x} = 0$ будет некорректно при любом значении C , кроме $C = 0$. Примем $C = 0$.

Тогда два последних уравнения переписутся:

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{x}^2} - \text{Re}_l \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \bar{y}^2} + 4,3 \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим каждое из соотношений (12) и (13) по отдельности.

Уравнение (12) имеет решение [12]:

$$\bar{\omega} = c_1 \cdot e^{\text{Re}_l \bar{x}} + c_2, \quad (14)$$

где c_1 и c_2 – постоянные интегрирования, требующие определения.

Граничные условия:

- при $\bar{x} = 0$ и $\bar{y} = 0$ $\bar{\omega} = 0$;
- при $\bar{x} = 1$ и $\bar{y} = 0$ $\bar{\omega} = 1$ и $\text{Re}_l = \text{Re}_{\text{кр}}$.

С учётом принятых граничных условий коэффициенты c_1 и c_2 определяются в виде

$$c_1 = \frac{1}{(e^{\text{Re}_{\text{кр}}} - 1)}, \quad c_2 = -\frac{1}{(e^{\text{Re}_{\text{кр}}} - 1)}.$$

Подставим полученные значения коэффициентов c_1 и c_2 в формулу (14) получим

$$\bar{\omega} = \frac{(e^{\text{Re}_l \bar{x}} - 1)}{(e^{\text{Re}_{\text{кр}}} - 1)} = \bar{\omega}_*. \quad (15)$$

Зависимость (15) определяет вихревую напряжённость вдоль оси \bar{x} от передней кромки пластины до точки, где ламинарный режим течения переходит в турбулентный и одновременно является граничным условием для $\bar{\omega} = \bar{\omega}_*$ во всём диапазоне изменения $0 \leq \bar{x} \leq 1$ при $\bar{y} = 0$.

Уравнение (13) имеет решение [12]:

$$\bar{\omega} = c_1 \cdot e^{-4,3 \bar{y}} + c_2. \quad (16)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из граничных условий:

- при $\bar{y} = 0$ $\bar{\omega} = \bar{\omega}_*$;
- при $\bar{y} = 1$ $\bar{\omega} = 0$.

Получаем

$$c_1 = -\frac{\bar{\omega}_*}{e^{-4,3} - 1}, \quad c_2 = \frac{e^{-4,3} \cdot \bar{\omega}_*}{e^{-4,3} - 1}.$$

Подставим полученные значения коэффициентов c_1 и c_2 в формулу (16), получим

$$\bar{\omega} = \frac{[e^{4,3 \cdot (1-\bar{y})} - 1]}{(e^{4,3} - 1)} \cdot \bar{\omega}_*. \quad (17)$$

Обозначим:

$$f(\bar{x}) = \frac{(e^{Re_l \cdot \bar{x}} - 1)}{(e^{Re_{кр}} - 1)}, \quad (18)$$

$$f(\bar{y}) = \frac{[e^{4,3 \cdot (1-\bar{y})} - 1]}{(e^{4,3} - 1)}. \quad (19)$$

С учётом принятых обозначений (18) и (19) формулы (15) и (17) будут иметь вид

$$\bar{\omega}_* = f(\bar{x}), \quad (20)$$

$$\bar{\omega} = f(\bar{x}) \cdot f(\bar{y}),$$

или

$$\bar{\omega} = \frac{(e^{Re_l \cdot \bar{x}} - 1)}{(e^{Re_{кр}} - 1)} \cdot \frac{[e^{4,3 \cdot (1-\bar{y})} - 1]}{(e^{4,3} - 1)}. \quad (21)$$

Полученные зависимости (20) и (21) справедливы в диапазоне чисел $100 < Re_l \leq Re_{кр}$. Вид зависимости (21) для случая $\bar{y} = 0$ представлен на рис. 2, а для $\bar{x} = 1$ – на рис. 3.

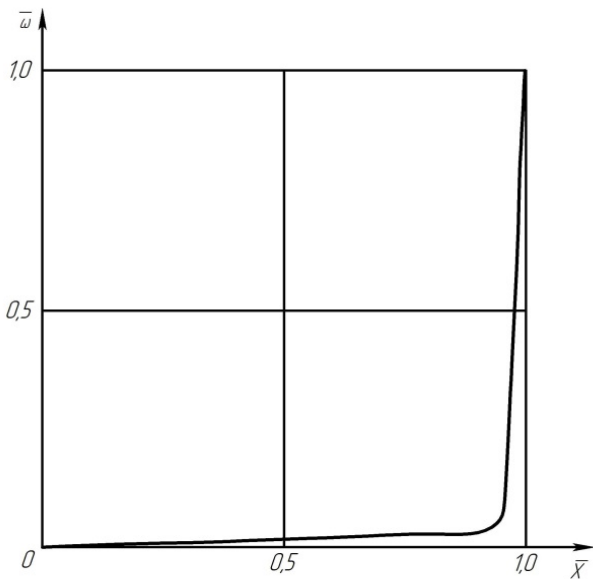


Рис. 2. Зависимость вихревой напряжённости $\bar{\omega}$ от координаты \bar{x} при $\bar{y} = 0$

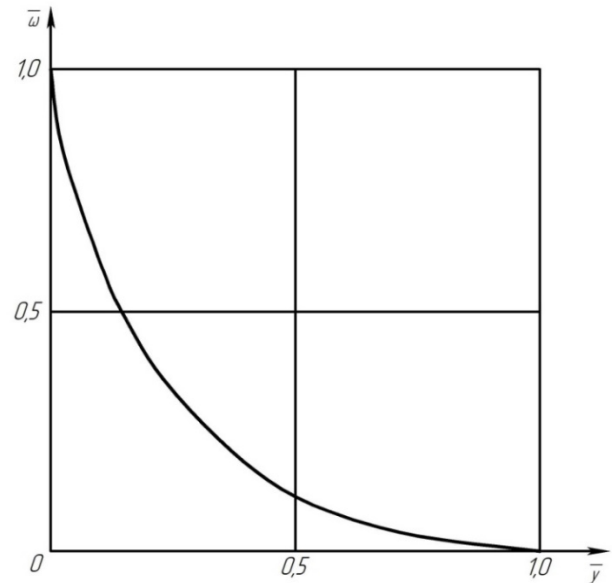


Рис. 3. Зависимость вихревой напряжённости $\bar{\omega}$ от координаты \bar{y} при $\bar{x} = 1$

Определим максимальное вихревое напряжение $\omega_0 = \omega_{кр}$ в точке $\bar{x} = 1$ при $\bar{y} = 0$. Воспользуемся формулой (5):

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Примем порядок величин $\frac{\partial U_\delta}{\partial y} \sim \frac{U_\delta}{\delta}$ и $v = -\frac{U_\delta \cdot \delta}{l}$, тогда

$$|\omega| = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{U_\delta \cdot \delta}{l^2} + \frac{U_\delta}{\delta} \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_\delta}{l} \cdot \left(\frac{\delta}{l} + \frac{l}{\delta} \right) \cdot \frac{l \cdot v}{l \cdot v}.$$

Учитывая зависимость (2), получим

$$|\omega| = \frac{Re_l^{1,5}}{10} \cdot \left(1 + \frac{25}{Re_l}\right) \cdot \frac{\nu}{l^2}. \quad (22)$$

При $\omega_0 = \omega_{кр}$, что соответствует условию $\bar{x} = 1$, $Re_l = Re_{кр}$, тогда

$$|\omega_{кр}| = \frac{Re_{кр}^{1,5}}{10} \cdot \left(1 + \frac{25}{Re_{кр}}\right) \cdot \frac{\nu}{l^2}.$$

Если учесть, что $\tau = 2 \cdot \omega \cdot \mu$, то, используя зависимость (22), получим

$$\tau = 2 \cdot \frac{Re_l^{1,5}}{10} \cdot \left(1 + \frac{25}{Re_l}\right) \cdot \frac{\nu}{l^2} \cdot \rho \cdot \nu. \quad (23)$$

Поделив левую и правую части последнего соотношения на $\rho \cdot u_\delta^2$, проведя простейшие преобразования, будем иметь

$$\frac{\tau}{\rho \cdot u_\delta^2} = \frac{0,2}{Re_l^{0,5}} \cdot \left(1 + \frac{25}{Re_l}\right). \quad (24)$$

Зависимость (24) справедлива в диапазоне чисел $100 < Re_l \leq Re_{кр}$.

Если принять толщину гидродинамического пограничного слоя как приведённую толщину, в которой происходит полное изменение скорости течения от $u = 0$ при $y = 0$ до $u = u_\delta$ на внешней границе гидродинамического пограничного слоя по линейному закону, то по [11]

$$\frac{\delta}{l} = \frac{3}{Re_l^{0,5}}.$$

С учётом этой зависимости получим

$$\frac{\tau}{\rho \cdot U_\delta^2} = \frac{0,333}{Re_l^{0,5}} \cdot \left(1 + \frac{9}{Re_l}\right). \quad (25)$$

При больших числах Re_l формула (25) практически совпадает с зависимостью, представленной в работе [11]:

$$\frac{\tau}{\rho \cdot U_\delta^2} = \frac{0,332}{Re_l^{0,5}}.$$

Зависимость (21) можно существенно упростить, если приближённо принять

$$f(\bar{x}) = \frac{(e^{Re_l \cdot \bar{x}} - 1)}{(e^{Re_{кр}} - 1)} \approx e^{(Re_l \cdot \bar{x} - Re_{кр})}, \quad f(\bar{y}) = \frac{(e^{4,3 \cdot (1 - \bar{y})} - 1)}{(e^{4,3} - 1)} \approx e^{-4,3 \cdot \bar{y}}. \quad (26)$$

Подставим $f(\bar{x})$ и $f(\bar{y})$ из формул (26) в (21), получим

$$\bar{\omega} \approx e^{(Re_l \cdot \bar{x} - Re_{кр}) - 4,3 \cdot \bar{y}},$$

или

$$\bar{\omega} \approx \exp[(Re_l \cdot \bar{x} - Re_{кр}) - 4,3 \cdot \bar{y}]. \quad (27)$$

Если принять, что продольная скорость обтекания плоской пластины u_δ по всей длине внешней границы гидродинамического пограничного слоя постоянна и равна скорости невозмущенного потока u_∞ , т. е. $u_\delta = u_\infty$, то критерий $Re_l = \frac{u_\delta \cdot l}{\nu} = \frac{u_\infty \cdot l}{\nu} = Re_{кр}$. Тогда последняя зависимость (27) примет вид

$$\bar{\omega} \approx \exp[Re_{кр} \cdot (\bar{x} - 1) - 4,3 \cdot \bar{y}].$$

Формула (21) и зависимость (23) показывают, что вихревая напряжённость ω и, соответственно, касательное напряжение τ с ростом координаты \bar{x} растут и при $\bar{x} = 1$ достигают максимума.

Возьмём производную от формулы (15) по \bar{x} при $\bar{y} = 0$, получим

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{x}} = Re_l \cdot \frac{e^{Re_l \bar{x}}}{(e^{Re_{кр}} - 1)} \approx Re_l \cdot e^{(Re_l \bar{x} - Re_{кр})}. \quad (28)$$

Из зависимости (28) видно, что градиент $\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x}$ вблизи точки $\bar{x} = 0$ очень мал ($\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} \approx 0$) и только вблизи точки $\bar{x} = 1$ резко возрастает.

Из формулы (21) и из рис. 2 видно, что вихревая напряжённость $\bar{\omega}$ практически не меняется по длине пластины вплоть до точки $\bar{x} = 1$, где ламинарный пограничный слой (ЛПС) внезапно переходит в турбулентный пограничный слой (ТПС). Соответствующим образом ведёт себя и касательное напряжение $\tau = 2 \cdot \omega \cdot \mu$. Оно также резко возрастает в точке $\bar{x} = 1$, что приводит к резкому торможению потока и, соответственно, резкому возрастанию толщины ЛПС.

Так, даже когда $\bar{x} = 0,999$, т. е. $Re_l \cdot \bar{x} = 0,999 \cdot Re_{кр}$, а $Re_{кр} = 3 \cdot 10^5$, вихревая напряжённость $\bar{\omega}$ имеет практически нулевое значение. Таким образом, действительно, только в точке перехода ЛПС в ТПС при $\bar{x} = 1$ мгновенно возникает вихревой скачок и, соответственно, скачок касательного напряжения τ .

Этот факт экспериментально впервые был выявлен в исследованиях по переходу ЛПС в ТПС И. М. Бюргерсом, Б. Г. ван дер Хегге Цейненом, а также М. Ганzenом в 1924-1928 годах [1]. Их исследования показали, что наиболее характерным признаком при переходе ЛПС в ТПС являются внезапное резкое увеличение толщины пограничного слоя и касательного напряжения на стенке.

Таким образом, зависимость (21) хорошо отражает опытные факты внезапного резкого возрастания касательного напряжения и, соответственно, толщины ЛПС, полученные в экспериментах вышеназванных исследователей [1].

Рассмотрим решение второй задачи о теплообмене при обтекании плоской пластины ламинарным потоком с учётом диссипации энергии за счёт трения.

Воспользуемся соотношением (6) и запишем его с учётом формулы (7) и с одновременной линеаризацией в форме

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} - \frac{0,173}{\bar{x}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right) = \left(\frac{1}{Pr \cdot Re_l} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{25 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \bar{x}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} \right) + \Phi \cdot \frac{l^2}{Re_l \cdot C_p \cdot (T_0 - T_\delta)}, \quad (29)$$

где $\theta = \frac{\vartheta}{T_0 - T_\delta} = \frac{T - T_\delta}{T_0 - T_\delta}$ – безразмерная температура; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля; T_0 – температура на поверхности пластины при $x = 1$.

Как показано в работе [11], приближённо можно принять, что

$$\frac{\delta_t}{\delta} = \frac{1}{Pr^{1/3}},$$

где δ_t – толщина теплового пограничного слоя.

Учтём также зависимость (2), которую представим в виде

$$\frac{\delta}{l} = \frac{5 \cdot \bar{x}^{0,5}}{Re_l^{0,5}}.$$

Рассмотрим диссипативную функцию Φ , представленную формулой (8). Для её линеаризации примем

$$\frac{\partial U_\delta}{\partial x} \approx \frac{U_\delta}{l}, \quad \frac{\partial U_\delta}{\partial y} \approx \frac{U_\delta}{\delta_t}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x}.$$

Тогда формула (8) преобразуется к виду

$$\Phi = \frac{u_{\delta}^2}{l^2} \cdot \left[4 + \frac{0,04}{\bar{x}} \cdot \text{Pr}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{Re}_l \right]. \quad (30)$$

Соответственно, формулу (29) с учётом зависимости (30) можно представить в виде

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} - \frac{0173}{\bar{x}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right) = \left(\frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_l} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{25 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \bar{x}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} \right) + \left(k_1 + \frac{k_2}{\bar{x}} \right), \quad (31)$$

где

$$k_1 = \frac{4 \cdot u_{\delta}^2}{\text{Re}_l \cdot C_p \cdot (T_0 - T_{\delta})}, \quad (32)$$

$$k_2 = \frac{u_{\delta}^2}{\text{Re}_l \cdot C_p \cdot (T_0 - T_{\delta})} \cdot \left(0,04 \cdot \text{Pr}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{Re}_l \right). \quad (33)$$

Использование метода разделения переменных позволяет соотношение (31) представить в виде двух зависимостей:

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} - \text{PrRe}_l \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = (C - k_1) \cdot \text{PrRe}_l; \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} + 4,3 \cdot \text{Pr}^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} = -(C \cdot \bar{x} + k_2) \cdot 25 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}. \quad (35)$$

В последнем соотношении (35) координата \bar{x} является свободным параметром, примем его равным $\bar{x} = 1$.

Рассмотрим соотношение (34). Решение проводится аналогично решению для $\bar{\omega}$, получаем для граничных условий при $\bar{x} = 0, \theta = 0$. При $\bar{x} = 1, \theta = 1$ зависимость

$$\theta = -(C - k_1) \cdot \bar{x} + (1 + C - k_1) \cdot \frac{(e^{\text{PrRe}_l \cdot \bar{x}} - 1)}{(e^{\text{PrRe}_{\text{кр}}} - 1)} = \theta_*. \quad (36)$$

Обозначим величину $\frac{(e^{\text{PrRe}_l \cdot \bar{x}} - 1)}{(e^{\text{PrRe}_{\text{кр}}} - 1)}$ через $f(\bar{x})$, тогда соотношение (36) примет вид

$$\theta = -(C - k_1) \cdot \bar{x} + (1 + C - k_1) \cdot f(\bar{x}) = \theta_*. \quad (37)$$

Рассмотрим зависимость (35), её решение, с учётом граничных условий: при $\bar{y} = 0, \theta = \theta_*$; при $\bar{y} = 1, \theta = 0$, представляется в виде

$$\theta = [\theta_* - \frac{b}{a} \cdot (C + k_2)] \cdot f(\bar{y}) + \frac{b}{a} \cdot (C + k_2) \cdot (1 - \bar{y}), \quad (38)$$

где

$$f(\bar{y}) = \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)}; \quad a = 4,3 \cdot \text{Pr}^{\frac{2}{3}}; \quad b = 25 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}; \quad \frac{b}{a} = \frac{5,78}{\text{Pr}^{\frac{1}{3}}}. \quad (39)$$

Подставим в формулу (38) зависимость (37), будем иметь

$$\theta = (1 + C - k_1) \cdot f(\bar{x}) \cdot f(\bar{y}) - [(C - k_1) \cdot \bar{x} + \frac{b}{a} \cdot (C + k_2)] \cdot f(\bar{y}) + \frac{b}{a} \cdot (C + k_2) \cdot (1 - \bar{y}). \quad (40)$$

Положим $C = k_1$, тогда соотношение (40) можно записать в виде

$$\theta = f(\bar{x}) \cdot f(\bar{y}) + \frac{b}{a} \cdot (k_1 + k_2) \cdot [(1 - \bar{y}) - f(\bar{y})]. \quad (41)$$

Эта формула справедлива в диапазоне чисел $100 < Re_l < Re_{кр}$.

Рассмотрим в правой части соотношения (41) величину перед квадратной скобкой, обозначим её

$$f_1 = \frac{b}{a} \cdot (k_1 + k_2). \quad (42)$$

С учётом зависимостей (32), (33) и (39) формула (42) может быть преобразована к виду

$$f_1 = \frac{5,78}{Pr^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{u_\delta^2}{Re_l \cdot C_p \cdot (T_0 - T_\delta)} \cdot [4 + ,004 \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \cdot Re_l],$$

или

$$f_1 = 0,23 \cdot \frac{u_\delta^2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{C_p \cdot (T_0 - T_\delta)} \cdot \left[1 + \frac{100}{Pr^{\frac{2}{3}} \cdot Re_l}\right]. \quad (43)$$

Если в уравнении (43) пренебречь в квадратной скобке последним членом, то получим соотношение, справедливое в диапазоне чисел $1000 < Re_l < Re_{кр}$. Запишем это соотношение в форме

$$f_1 = 0,23 \cdot \frac{u_\delta^2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{C_p \cdot (T_0 - T_\delta)}.$$

В этом случае зависимость (41) будет иметь вид

$$\theta = f(\bar{x}) \cdot f(\bar{y}) + 0,23 \cdot \frac{u_\delta^2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{C_p \cdot (T_0 - T_\delta)} \cdot [(1 - \bar{y}) - f(\bar{y})]. \quad (44)$$

Если учесть, что по формулам (36) и (39)

$$f(\bar{x}) = \frac{(e^{Pr Re_l \bar{x}} - 1)}{(e^{Pr Re_{кр}} - 1)} \quad \text{и} \quad f(\bar{y}) = \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)},$$

то соотношение (44) примет вид

$$\theta = \frac{(e^{Pr Re_l \bar{x}} - 1)}{(e^{Pr Re_{кр}} - 1)} \cdot \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)} + 0,23 \cdot \frac{u_\delta^2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{C_p \cdot (T_0 - T_\delta)} \cdot \left[(1 - \bar{y}) - \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)}\right]. \quad (45)$$

В случае если не учитывается диссипация тепловой энергии, то формула (45) упрощается и принимает вид

$$\theta = \frac{(e^{Pr Re_l \bar{x}} - 1)}{(e^{Pr Re_{кр}} - 1)} \cdot \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)}. \quad (46)$$

Сопоставление формул (21) и (46) указывает на полную аналогию процессов теплообмена и гидродинамики при $Pr = 1$.

Рассмотрим содержание квадратной скобки полученного выражения (45), обозначим её через $f_2 = [(1 - \bar{y}) - f(\bar{y})]$. Определим те значения $\bar{y} = \bar{y}_*$, при которых функция f_2 для различных чисел Pr принимает максимальные значения. Возьмём производную от функции f_2 по \bar{y} и приравняем её к нулю.

Для этого запишем функцию f_2 с учётом зависимостей (39) в форме

$$f_2 = [(1 - \bar{y}) - \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)}].$$

Обозначим $z = a \cdot (1 - \bar{y})$, тогда $f_2 = \left[\frac{z}{a} - \frac{e^z - 1}{(e^a - 1)}\right]$, а её производная равна

$$\frac{df_2}{dz} = \frac{1}{a} - \frac{e^z}{(e^a - 1)} = 0.$$

Отсюда

$$e^z = \frac{(e^a - 1)}{a}, \quad z = \ln \frac{(e^a - 1)}{a}, \quad a \cdot (1 - \bar{y}_*) = \ln \frac{(e^a - 1)}{a}.$$

Если учесть, что $e^a \gg 1$, тогда $\bar{y}_* = 1 - \frac{1}{a} \cdot \ln \frac{(e^a - 1)}{a} = 1 - \frac{1}{a} \cdot \ln \frac{e^a}{a}$ и окончательно

$$\bar{y}_* \cong \frac{\ln a}{a}. \quad (47)$$

Расчёты, проведённые по формуле (47) при различных значениях Pr дали следующие результаты: при $Pr = 1$, $\bar{y}_* = 0,34$; $Pr = 5$, $\bar{y}_* = 0,2$; $Pr = 8$, $\bar{y}_* = 0,165$; $Pr = 27$, $\bar{y}_* = 0,126$; $Pr = 10^3$, $\bar{y}_* = 0,0141$.

Из самой формулы (47) видно, что при $Pr \rightarrow \infty$, $\bar{y}_* \rightarrow 0$.

Зависимость максимальных значений функции $f_3 = Pr^{1/3} \cdot f_2$ от критерия Pr при $\bar{y} = \bar{y}_*$ даёт следующие величины: при $Pr = 1$, $f_3 = 0,425$; при $Pr = 5$, $f_3 = 1,24$; при $Pr = 8$, $f_3 = 1,554$; при $Pr = 27$, $f_3 = 2,6$; при $Pr = 10^3$, $f_3 = 9,84$.

Полученное уравнение (45) можно рассматривать как сложное распределение температур при обтекании плоской пластины ламинарным потоком среды (жидкости, газа и др.). Представим его в виде $\theta = \theta_1 + \theta_2$, где

$$\theta_1 = \frac{(e^{Pr Re_L \bar{x}} - 1)}{(e^{Pr Re_{кр}} - 1)} \cdot \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)}, \quad (48)$$

$$\theta_2 = 0,23 \cdot \frac{u_\delta^2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{C_p \cdot (T_0 - T_\delta)} \cdot \left[(1 - \bar{y}) - \frac{e^{a \cdot (1 - \bar{y})} - 1}{(e^a - 1)} \right]. \quad (49)$$

На рис. 4 представлено распределение температуры θ в области теплового пограничного слоя с учётом диссипации энергии, определённое по формуле (45).

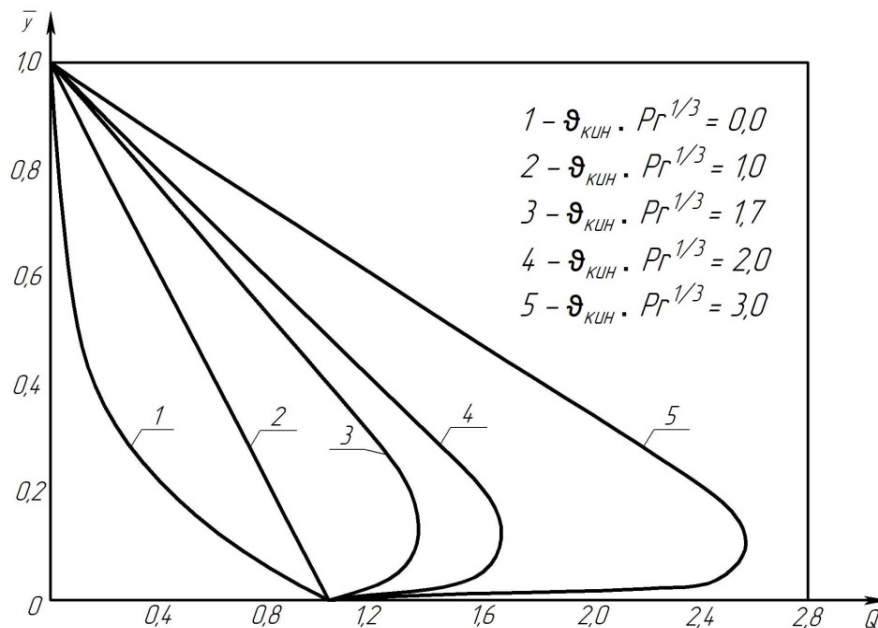


Рис. 4. Распределение температуры θ для заданных чисел Pr в диапазоне $0 \leq \bar{y} \leq 1$ и $\bar{x} = 1$

При этом условно принято, что величина перед квадратной скобкой зависимости (49) равна

$$0,23 \cdot \frac{u_{\delta}^2}{C_p \cdot (T_0 - T_{\delta})} = \vartheta_{\text{кин}} = 1.$$

Это распределение температур складывается из следующих составляющих:

1. распределения температуры θ_1 по координате \bar{y} , при $\bar{x} = 1$, определяемого зависимостью (48) и обусловленного теплопроводностью среды при переносе тепла от поверхности пластины $\bar{y} = 0$ до границы теплового пограничного слоя $\bar{y} = 1$ и от передней кромки пластины $\bar{x} = 0$ до точки перехода ламинарного потока в турбулентный $\bar{x} = 1$;

2. распределения температуры θ_2 по координате \bar{y} , при $\bar{x} = 1$, определяемого зависимостью (49) и обусловленного выделением и переносом тепла текущей среды в тех же границах теплового пограничного слоя.

В рамках модели теплового пограничного слоя показано, что модель учитывает не только наличие дополнительного переноса тепла и, соответственно, роста θ , но также и изменение координат максимальных значений $y = \bar{y}_*$ в зависимости от значения критерия Pr. При $Pr = 1$, $\bar{y}_* = 0,34$ и далее, по мере роста критерия Pr значение координаты \bar{y}_* уменьшается, как это было показано выше.

Формула (21) показывает, что мы имеем так называемый скачок вихревой напряжённости $\bar{\omega}$ в точке $\bar{x} = 1$ при $\bar{y} = 0$. Можно предположить, что вблизи этой точки поток резко тормозится и вихри по нормали к поверхности выбрасываются в основной невозмущённый (идеальный) поток.

В этой же точке, согласно соотношениям (45) и (46), наблюдается и температурный скачок.

Здесь мы видим определённую аналогию с обтеканием тела потоком газа при больших скоростях в случае, когда число $M = \frac{v}{a}$ приближается к единице $M \leq 1$, т. е. когда скорость звука a равна скорости набегающего потока v .

При $M = 1$ возникает «скачок уплотнения», перпендикулярный основному потоку, который формирует так называемое «волновое сопротивление», оно намного больше сопротивления трения и перепада давления.

Для жидкости в качестве аналогии можно противопоставить поведение потока при внезапном поперечном частичном перекрытии потока заслонкой.

Во всех рассматриваемых случаях потоки жидкости и газа внезапно приобретают поперечное основному потоку движение среды в направлении координаты y , что и формирует дополнительное сопротивление. Во всех приведённых случаях наблюдается резкое поперечное перемещение частиц жидкости и газа из пограничного слоя в основной невозмущённый (идеальный) поток.

Если исследуется обтекание плоской пластины конечной длины $x = L$, то тогда $\bar{x} = \frac{x}{L}$ и решения будут аналогичны тем, что проведены в рамках первой и второй задач, только максимальное значение критерия $Re_L = \frac{U_{\delta} \cdot L}{\nu} = \frac{u_{\infty} \cdot L}{\nu} < Re_{кр}$. Соответственно, производится только замена критерия $Re_{кр}$ на критерий Re_L , а текущее значение $Re_x = Re_{кр} \cdot \bar{x}$ на $Re_x = Re_L \cdot \bar{x}$ и при $\bar{x} = 1$ $Re_x = Re_L$.

В работе представлена модель пограничного слоя, позволяющая решать ряд задач гидродинамики и теплообмена в диапазоне чисел $100 < Re_l < Re_{кр}$.

Дано решение двух задач обтекания плоской пластины бесконечной длины, в которых математически определено, что в точке перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный возникает резкий скачок касательного напряжения и температуры.

Решение задачи о теплообмене выявило особенность, связанную с тем, что с ростом критерия Pr максимальный перепад температуры за счёт диссипационной части теплового потока смещается в сторону поверхности обтекаемой пластины.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 528 с.
2. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
3. Кружилин, Г. Н. Исследование теплового пограничного слоя / Г. Н. Кружилин // ЖТФ. – 1936. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 562-570.
4. Себиси, Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы / Т. Себиси, П. Брэдшоу; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
5. Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер; пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
6. Кудряшёв, Л. И. О влиянии конвективного теплообмена на теплоотдачу нагретых частиц весьма малого размера / Л. И. Кудряшёв, А. А. Гусаков // Вопросы механики жидкостей и газов. Труды КуАИ: доклады научно-технической конференции. – 1967. – Вып. 24. – С. 29-38.
7. Кудряшёв, Л. И. Теплообмен сферических частиц в области малых чисел Рейнольдса с учётом тепловой нестационарности / Л. И. Кудряшёв, А. А. Гусакова, А. А. Гусаков // Аэромеханика и системы управления. Труды КуАИ. – 1971. – Вып. 35. – С. 42-47.
8. Кудряшёв, Л. И. Приближённое решение задач о теплообмене и сопротивлении при обтекании сферы при числах $1 < Re < 100$ / Л. И. Кудряшёв, А. А. Смирнов, Н. Л. Меньших // Аэромеханика и системы управления. Труды КуАИ. – 1971. – Вып. 35. – С. 28-41.
9. Гусаков, А. А. Аналитическое исследование движения, сопротивления и теплообмена жидкой сферической частицы в вязкой сплошной среде при малых числах Рейнольдса: дис. ... канд. техн. наук: / Гусаков А. А. – М., 1966. – 152 л.
10. Гебхарт, Б. Свободно-конвективные течения в технике. Фримановская лекция / Б. Гебхарт // Труды американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1979. – № 1. – С. 109-142.
11. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.
12. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
13. Колыхалов, Г. А. Влияние тёмной материи на траектории движения космических тел с позиции модели сплошной среды / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 4-11.

Content

ENERGETICS

N. I. Starinsky, A. V. Gulyaev, D. S. Fokin

DEVELOPMENT OF A REGULATOR TO FIND THE OPTIMAL
FREQUENCY FOR THE ASYNCHRONOUS MOTOR –
AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER SYSTEM4

CONTROL

M. I. Grachev

AUTOMATION OF THE ORGANIZATION
AND ITS TECHNICAL EQUIPMENT13

M. A. Gorkavyy, M. A. Melnichenko, V. A. Solovyev, A. I. Gorkavyy

ALGORITHM FOR SEARCHING OPTIMAL MOTION
PARAMETERS DURING RECTILINEAR TECHNOLOGICAL
TRANSITIONS OF A COLLABORATIVE ROBOT22

A. V. Kupova, A. V. Kupov, V. A. Solovyov

PROGRAM IMPLEMENTATION OF FUZZY COMPENSATING
DEVICE REGULATOR IN THE LANGUAGE OF FUNCTIONAL BLOCKS36

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

G. V. Grenkin, V. V. Karpov

COMPLEX METHOD OF SIMPLIFIED INDOOR NAVIGATION45

I. M. Krasnov, A. L. Grigorieva

ON THE PROBLEM OF DETERMINING THE STATIONARY CHARACTERISTICS
OF A PARTIALLY POROUS CONICAL GAS-STATIC BEARING50

V. S. Scthetinin, A. A. Kosmynin, S. B. Maryin

METHODOLOGY FOR CALCULATION OF OUTPUT
CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNIT ON CONTACTLESS
SUPPORTS WITH EXTERNAL GAS SUPERCHARGING55

S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, K. K. Kim, Kh. Kh. Azimov, I. K. Andrianov

DETERMINATION OF OUTPUT PARAMETERS
OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE SEALED VALVE
OF THE MAIN PIPELINE61

S. I. Noskov, I. V. Ovsyannikov

ESTIMATION OF PARAMETERS OF A PIECEWISE LINEAR
RISK FUNCTION WITH NONLINEAR TRANSFORMATIONS
OF INDEPENDENT VARIABLES71

A. N. Petrova, D. O. Frolov

OPTIMIZING SEARCH IN SCIENTIFIC PUBLICATIONS
USING DEEP LEARNING77

MACHINERY

V. A. Stelmakov, S. K. Fedorchenko

STUDY OF ABRASIVE GRINDING WHEEL GRIT ABRASION
PROCESS DURING CENTERLESS GRINDING84

E. D. Kim, G. S. Dzyuba, A. V. Shchekin, S. V. Dorofeev, A. R. Voynov

THE INFLUENCE OF ALUMINUM ON THE STRUCTURE FORMATION,
LIQUATION PROCESSES AND PROPERTIES
OF A HIGH-ENTROPY ALLOY OF THE Al_x -Ti-Cr-Ni-V-Zr
SYSTEM OBTAINED BY SHS METALLURGY91

N. A. Strobykin, P. V. Bakhmatov

CONDITIONS FOR CREATION OF DEFECT-FREE WELDED JOINTS
OF THIN-WALLED TITANIUM AIRCRAFT STRUCTURES98

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

V. V. Likhtin

MODELING OF DEPENDENCE OF HETEROGENEOUS STRUCTURES
PROPERTIES ON THE RATIO OF THEIR COMPONENTS108

MATHEMATICS AND MECHANICS

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

INVESTIGATION OF FLUID DYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF A FLAT PLATE
IN THE NUMBER RANGE $100 < Re < 3 \cdot 10^6$ 115

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ
2024 № V (77)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 27.09.2024
Дата выхода в свет 30.09.2024

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 31180

Отпечатано в типографии
КнАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

