

Редакционная

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запонец Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шенбо, канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Азербайджан)

Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

<http://oreluniver.ru>

E-mail: tlostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-67029
от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018

Содержание

Секция «Теоретическая и прикладная механика»

Сулимов В.Д., Шкапов П.М., Сулимов А.В. Геометрические структуры и вычислительная диагностика динамических систем с использованием гибридных алгоритмов	3
Аблаев А.Р. Режимные нагрузки и комплектация главных энергетических установок морских плавучих буровых комплексов для разведки месторождений нефти и газа	14
Морева И.Н., Хромов Е.В. Кривая предельной тяги. Тяга на швартовах и скорость хода в штормовых условиях	23
Георгиевская Е.В. Оценка долговечности гидротурбин с позиций механики разрушений	27
Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Определение кинематического и напряженного состояний трубной заготовки при радиальном выдавливании	33
Пахалюк В.И. Учет ежедневных режимов активности при моделировании износа в сферическом шарнире с полимерным компонентом тотального эндопротеза тазобедренного сустава	40
Неменко А.В., Никитин М.М. Предотвращение перегрева при обработке металлов резанием	52
Поляков А.М. Распознавание фазы двигательной активности инвалида при ходьбе на трансфеморальном протезе	58

Секция «Технологии и инструменты»

Бохонский А.И., Рыжков А.И. Оптимальное управление манипулятором с упругой рукой	73
Дологоян А.В., Сухов А.К. Приближенная модель первой фазы всплытия морских ныряющих буев	79
Муравьев А.А., Маркова Н.С., Таратанов А.С. Перспективные направления развития и применения аддитивных технологий в машиностроении	85
Федоровский К.Ю. Оптимальный размер канала судовых теплообменников лабиринтного типа	97
Харченко А.О., Братан С.М., Владецкий Е.А., Владецкий Д.О. Исследование процесса шлифования с учетом вибрационных воздействий на станок в условиях плавучей мастерской	102
Чемакина Т.Л. Система подогрева нефтепродуктов на наливных судах	113
Лавриненко В.Ю., Гаврилов Н.Ю. Экспериментальные исследования процесса протяжки полосы бабой ковочного молота с наполнителем	117
Головин В.И. Интеллектуальный поиск оптимальных технологических процессов в киберфизических системах	121

Машиностроительные технологии и оборудование

Помятихин И.И., Шаблинская Т.Н. Компьютерное моделирование предварительного формообразования впадины кругового зуба цилиндрического колеса	126
Воробьев В.И., Измеров О.В., Борзенков М.И., Злобин С.Н., Копылов С.О. Модернизация колесно-моторного блока электровоза ЭЭС6	131
Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Сажаяев А.А. Восстановление посадочных поверхностей шпинделя станка DMG MORI CTX 510 Ecoline полимерными нанокompозициями	140
Новиков А.Д., Фроленкова Л.Ю., Селемев К.Ф. Повышение износостойкости рабочих поверхностей инструмента при нанесении нанопокровов	147

Машиноведение и мехатроника

Корнеев А.Ю., Сытин А.В. Математическая модель расчета турбулентного течения смазочного материала в коническом лепестковом подшипнике	155
---	-----

Приборы, биотехнические системы и технологии

Марков О.И. Эффективность бокового отвода тепла в ступенчатом термоэлементе	165
Бурилич И.Н., Тютюнова Д.Н., Студеникина Л.И., Машков Е.Ю., Конорева Н.А. Один из вариантов оптимального распределения потребителей электрической энергии на основе заданных лимитов	171

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Гусеница Я.Н., Малахов А.В., Старовойтов Д.И. Исследование генетических алгоритмов для оценивания характеристик военно-технических систем при ограниченном количестве натурных экспериментов	178
Лисичкин В.Г. Моделирование процессов резонансного контроля во временной области анализа	189

Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.

Member of editorial board:

Bukhach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Zubchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kopylov Yu.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shenbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Azerbaijan)

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzov V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030 Orel, Moskovskaya ul., 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

http://oreluniver.ru

E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of
supervision in sphere of communication,
information technology and mass
communications. The certificate of registration
PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the
«Pressa Rossii» 29504

© Orel State University, 2018

Contents

Section «Theoretical and Applied Mechanics»

<i>Sulimov V.D., Shkapov P.M., Sulimov A.V.</i> Geometric structures and computational diagnostics of dynamical systems using hybrid algorithms.....	3
<i>Ablaev A.R.</i> Mode loads and complete setting of main energy installations of marine floating drilling complexes for exploration of oil and gas deposits.....	14
<i>Moreva I.N., Khromov E.V.</i> Curve of extreme draft. Draft on mooring and course speed in storm conditions.....	23
<i>Georgievskaia E.V.</i> Estimation of the hydraulic turbines durability from the fracture mechanics positions.....	27
<i>Vorontsov A.L., Reschikov E.O.</i> Kinematic and stress system determination of pipe workpiece during radial pressing.....	33
<i>Pakhaliuk V.I.</i> The considering of activity of daily living at simulation of wear in a spherical joint with polymeric component of a total hip replacement.....	40
<i>Nemenko A.V., Nikitin M.M.</i> Overheating prevention during machining of metals.....	52
<i>Poliakov A.M.</i> Recognition of motor activity phase at the walking of invalide on the transfemoral prosthesis.....	58

Section «Technologies and Tools»

<i>Bokhonsky A.I., Ryzhkov A.I.</i> Optimal control of manipulator with elastic hand.....	73
<i>Dologlonyan A.V., Sukhov A.K.</i> Research of geometrical and physical parameters influence of the drift boat on its speed.....	79
<i>Muravev A.A., Markova N.S., Tarapanov A.S.</i> Perspective directions of development and application of additive technologies in mechanical engineering.....	85
<i>Fedorovsky K.Yu.</i> Optimal size channel of ships heat exchangers of labyrinth type.....	97
<i>Kharchenko A.O., Bratan S.M., Vladetskaya E.A., Vladetsky D.O.</i> Investigation of the grinding process with the account vibration impacts on the machine in the conditions of a floating workshop.....	102
<i>Chemakina T.L.</i> Heated oil products for tank vessels.....	113
<i>Lavrinenko V.Yu., Gavrilov N. Yu.</i> Experimental research of bar drawing by hammer ram with fillets.....	117
<i>Golovin V.I.</i> Smart search for optimal technological process in cyber-physical systems.....	121

Machine-building technologies and equipment

<i>Pomyatikhin N.I., Shablinskaya T.N.</i> Computer simulation of preliminary form formation of cylindrical wheel circuit depth.....	126
<i>Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Borzenkov M.I., Zlobin S.N., Kopylov S.O.</i> Modernization of wheel-motor block electrophoses 2ES6.....	131
<i>Kononenko A.S., Kildeev T.A., Sazhaev A.A.</i> Restoring the seating surfaces of the DMG MORI CTX 510 Ecoline spindle with polymeric nanocompositions.....	140
<i>Novikov A.D., Frolenkova L.Yu., Selemenev K.F.</i> Increase of wear-resistance of the working surfaces of the tool at application of nano-coatings.....	147

Machine Science and Mechatronics

<i>Korneyev A.Yu., Sytin A.V.</i> The mathematical model of lubricant turbulence flow in the conical foil bearing.....	155
--	-----

Devices, biotechnical systems and technologies

<i>Markov O.I.</i> Modelling of lateral heat removal in the step thermoelement.....	165
<i>Burilich I.N., Tyutyunov D.N., Studenikina L.I., Mashkov E.Yu., Konoreva N.A.</i> One of the options for the optimal distribution of electricity consumers based on specified limits.....	171

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

<i>Gusenitsa Ya.N., Malakhov A.V., Starovoytov D.I.</i> Research of genetic algorithms for estimation of characteristics of military and technical systems at limited number of natural experiments.....	178
<i>Lisichkin V.G.</i> Research of the resonant control in time area of the analysis.....	189

СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА»

УДК 519.6

В.Д. СУЛИМОВ, П.М. ШКАПОВ, А.В. СУЛИМОВ

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ДИАГНОСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ**

Аннотация. Рассматриваются задачи диагностирования устойчивости динамических систем в рамках теории Косамби–Картана–Черна. Эволюцию системы во времени описывают в геометрических терминах, интерпретируя ее как геодезическую в финслеровом пространстве. Определяются основные геометрические инварианты исследуемой системы. Собственные значения второго инварианта дают оценку устойчивости системы по Якоби. Формулируется задача вычислительной диагностики системы по заданным собственным значениям тензора кривизны отклонения. Скалярные критериальные функции предполагаются непрерывными, липшицевыми, многоэкстремальными, не обязательно всюду дифференцируемыми. При поиске глобальных решений используются новые гибридные алгоритмы, объединяющие стохастический кратный алгоритм столкновения частиц с учетом квазиотражений (сканирование пространства переменных) и детерминированные методы локального поиска. В первом алгоритме локальный поиск реализуется методом Хука–Дживса. Во втором алгоритме при локальном поиске вводятся двухпараметрические сглаживающие аппроксимации критериальной функции. Приводится численный пример восстановления параметров и вычислительной диагностики системы Лоренца.

Ключевые слова: динамическая система, устойчивость по Якоби, геометрический инвариант, критериальная функция, глобальная оптимизация, гибридный алгоритм, система Лоренца

Введение.

В практических исследованиях устойчивости динамических систем широко применяют метод Ляпунова [1]. Альтернативным является подход с использованием теории Косамби–Картана–Черна (теории ККЧ) [2]. При оценке устойчивости по Якоби реализована идея существования взаимно–однозначного соответствия между динамической системой второго порядка и уравнениями геодезических в ассоциированном финслеровом пространстве [3]. В рамках подхода вводится геометрическое описание динамической системы, что позволяет определить пять геометрических инвариантов системы. Вторым инвариант (называемый тензором кривизны отклонения) определяет устойчивость по Якоби исследуемой системы. Устойчивость (глобальная и локальная) непрерывно эволюционирующих динамических систем в аспекте геометрического описания систем рассматривалась в работе [4]. Подробный анализ динамической системы Лоренца в рамках теории ККЧ представлен в работе [5]. Предварительно уравнения динамической системы приводятся к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Далее определяются геометрические инварианты, связанные с этой системой. Получены в явном виде компоненты тензора кривизны отклонения и собственные значения тензора. Исследована устойчивость по Якоби точек равновесия системы Лоренца и сформулированы условия устойчивости указанных точек. Примеры актуальных приложений теории ККЧ представлены в работах [6–10].

Рассматривается задача вычислительной диагностики для динамических систем, описываемых в терминах геометрических структур. Косвенная диагностическая информация представлена собственными значениями тензора кривизны отклонения исследуемой системы, которые могут быть получены при обработке экспериментальных данных. Критерий рассогласования соответствующей обратной задачи на собственные значения формулируется по результатам сравнения двух собственных спектров: соответствующего текущим параметрам системы и полученного при обработке результатов измерений. Решение определяется с использованием оптимизационного подхода. При постановке обратных задач вычислительной диагностики необходимо учитывать ряд важных

особенностей, таких как корректность постановки задачи, неполнота косвенной информации, наличие в спектрах кратных собственных значений, зашумленность измеряемых данных и др. [11, 12]. Как следствие, скалярные критериальные функции обратных задач являются в общем случае непрерывными, многоэкстремальными и не всюду дифференцируемыми. Ввиду естественной ограниченности энергии изменений в системе отношения приращений критериальных функций к приращениям аргументов не превышают некоторого порогового значения, описываемого с помощью константы Липшица. Практические вычисления значений критериальных функций в точках допустимой области могут потребовать значительные вычислительные ресурсы. Этим обусловлена актуальность разработки эффективных алгоритмов решения обратных задач вычислительной диагностики с использованием методов глобальной оптимизации.

Во втором разделе представлены математические модели динамических систем, описываемых в терминах теории ККЧ. Для системы Лоренца приведены результаты аналитического определения собственных значений тензора кривизны отклонения, полученные в работе [5]. В третьем разделе формулируется обратная задача вычислительной диагностики: требуется определить параметры динамической системы по ограниченному спектру собственных значений тензора кривизны отклонения. Предполагается, что косвенная диагностическая информация в общем случае может быть неполной, спектры тензоров содержат кратные собственные значения, шумы отсутствуют. Четвертый раздел содержит краткое описание новых гибридных алгоритмов глобальной оптимизации, интегрирующих стохастический алгоритм сканирования пространства переменных и процедуры локального поиска. В пятом разделе приведены результаты численного решения модельной задачи вычислительной диагностики системы Лоренца с использованием гибридных алгоритмов оптимизации.

Математические модели.

Предполагается, что переменные динамической системы x^i , $i = 1, 2, \dots, n$, определены на действительном, гладком n -мерном многообразии M ; касательное расслоение многообразия M обозначается как TM . Если M представляется как $\mathbb{R}^n$, $M = \mathbb{R}^n$, тогда, соответственно, $TM = T\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^n$ [4]. Рассматривается подмножество Ω евклидова $(2n+1)$ -мерного пространства $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^1$. На подмножестве Ω вводится $(2n+1)$ -мерная система координат (x^i, y^i, t) , $i = 1, 2, \dots, n$, где $(y^i) = (y^1, y^2, \dots, y^n)$, t – время; при этом

$$y^i = \left(\frac{dx^1}{dt}, \frac{dx^2}{dt}, \dots, \frac{dx^n}{dt} \right).$$

При описании геометрических структур, ассоциированных с динамической системой, на базовом многообразии M вводят нелинейную связность N с коэффициентами N_j^i , а также связность типа Бервальда [2,3]

$$G_{jl}^i = \frac{\partial N_j^i}{\partial y^l}.$$

Во многих случаях уравнения движения динамической системы могут быть получены с использованием функции Лагранжа $L : TM \rightarrow \mathbb{R}$ и уравнений Эйлера–Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial y^i} - \frac{\partial L}{\partial x^i} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где (применительно к механическим системам) F_i , $i = 1, 2, \dots, n$, представляют внешние силы.

Если лагранжиан L – регулярный, то уравнения Эйлера–Лагранжа (1) эквивалентны следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка [4]

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} + 2G^i(x^i, y^i, t) = 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\};$$

здесь каждая функция $G^i(x^i, y^i, t)$ имеет класс гладкости C^∞ в окрестности некоторых начальных условий (x_0, y_0, t_0) на Ω (при этом функции $G^i(x^i, y^i, t)$ определены в локальной системе координат на TM).

Далее рассматривается применение теории ККЧ к системе дифференциальных уравнений, связанных с механикой жидкости. Исследуется система Лоренца, описываемая системой трех нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений [13]

$$\frac{1}{\sigma} \frac{dX}{dt} = -X + Y, \quad (2)$$

$$\frac{dY}{dt} = -XZ + \rho X - Y, \quad (3)$$

$$\frac{dZ}{dt} = XY - \beta Z, \quad (4)$$

где σ, ρ, β – некоторые свободные параметры.

Представленные выше обыкновенные дифференциальные уравнения (2)–(4) аппроксимируют систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих конвекцию (с конечной амплитудой) в слое жидкости, подогреваемой снизу. Решение может быть получено, если неизвестные функции в уравнениях в частных производных разложены в ряды Фурье, и все результирующие коэффициенты Фурье, за исключением трех, заданы равными нулю. Параметры σ, ρ и β интерпретируются с физической точки зрения как число Прандтля, нормализованное (надлежащим образом) число Рэлея и число длины волны соответственно. Существенно, что система уравнений Лоренца является детерминированной, однако ее решение демонстрирует хаотическое поведение при $\rho > \sigma(\sigma + \beta + 3)/(\sigma - \beta - 1)$ и $\sigma > \beta + 1$ [13].

Согласно (2),

$$Y = X + \frac{1}{\sigma} \frac{dX}{dt}. \quad (5)$$

После подстановки (5) в (3) получается

$$\dot{X} + (1 + \sigma)\dot{X} + \sigma XZ + \sigma(1 - \rho)X = 0. \quad (6)$$

Дифференцирование уравнения (4) по времени дает

$$\dot{Z} = \dot{X}Y + X\dot{Y} - \beta\dot{Z} = \dot{X}\left(X + \frac{1}{\sigma}\dot{X}\right) + X\left(\dot{X} + \frac{1}{\sigma}\dot{X}\right) - \beta\left[\dot{X}\left(X + \frac{1}{\sigma}\dot{X}\right) - \beta Z\right]. \quad (7)$$

После ввода обозначений

$$X = X^1, \quad \dot{X} = Y^1, \quad Z = X^2, \quad \dot{Z} = Y^2, \quad Y = X^3,$$

система Лоренца может быть представлена в эквивалентной форме как система дифференциальных уравнений второго порядка

$$\frac{d^2 X^1}{dt^2} + (1 + \sigma)Y^1 + \sigma X^1 X^2 + \sigma(1 - \rho)X^1 = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d^2 X^2}{dt^2} + \left(\frac{1 + \sigma}{\sigma} + \frac{\beta}{\sigma} - 2\right)X^1 Y^1 - \frac{1}{\sigma}(Y^1)^2 + (1 - \rho + \beta)(X^1)^2 + (X^1)^2 X^2 - \beta^2 X^2 = 0. \quad (9)$$

Итак, система Лоренца представлена двумя дифференциальными уравнениями в виде

$$\frac{d^2 X^i}{dt^2} + 2G^i(X^i, Y^i) = 0, \quad i = 1, 2.$$

Из (8) и (9) непосредственно следует

$$G^1(X^1, X^2, Y^1) = \frac{1}{2}[(1 + \sigma)Y^1 + \sigma X^1 X^2 + \sigma(1 - \rho)X^1],$$

$$G^2(X^1, X^2, Y^1) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1 + \sigma}{\sigma} + \frac{\beta}{\sigma} - 2\right)X^1 Y^1 - \frac{1}{\sigma}(Y^1)^2 + (1 - \rho + \beta)(X^1)^2 + (X^1)^2 X^2 - \beta^2 X^2\right].$$

Теперь могут быть найдены компоненты нелинейной связности и связности Бервальда, после чего компоненты тензора кривизны отклонения системы Лоренца определяются в виде [5]

$$\begin{aligned}P_1^1 &= -\sigma X^2 - \sigma(1-\rho) + \frac{1}{4}(1+\sigma)^2, \\P_2^1 &= -\sigma X^1, \\P_1^2 &= \left(1 - \frac{\beta}{2\sigma}\right)Y^1 + \left[\frac{1-\sigma^2-7\beta\sigma+\beta+4(\rho-1)\sigma}{4\sigma}\right]X^1 - X^1X^2, \\P_2^2 &= -(X^1)^2 + \beta^2.\end{aligned}$$

В контексте анализа устойчивости по Якоби в работе [5] указаны следующие точки равновесия системы Лоренца: $S_0(0, 0, 0)$, если $\rho \leq 1$, а также $S_+[\sqrt{\beta(\rho-1)}, \sqrt{\beta(\rho-1)}, \rho-1]$ и $S_-[-\sqrt{\beta(\rho-1)}, -\sqrt{\beta(\rho-1)}, \rho-1]$, если $\rho > 1$. Далее рассматривается точка равновесия S_+ , $\rho > 1$. Соответственно компоненты тензора кривизны отклонения определяются в виде:

$$\begin{aligned}P_1^1(S_+) &= \frac{1}{4}(1+\sigma)^2, \\P_2^1(S_+) &= -\sigma\sqrt{\beta(\rho-1)}, \\P_1^2(S_+) &= \frac{\sqrt{\beta(\rho-1)}[(-7\sigma+1)\beta-\sigma^2+1]}{4\sigma}, \\P_2^2(S_+) &= \beta^2 - \beta(\rho-1).\end{aligned}$$

Аналитические выражения для собственных значений тензора кривизны отклонения в рассматриваемой точке равновесия имеют вид

$$\begin{aligned}\lambda_+(S_+) &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{(\beta(\rho-1)+\frac{1}{4}(\sigma+1)^2 + \beta(\rho-1)[\beta(7\sigma-1)+\sigma^2-1]) + \right. \\&\quad \left. + \beta(\beta-\rho+1+\frac{1}{4}(\sigma+1)^2) \right\}, \\ \lambda_-(S_+) &= \frac{1}{2} \left\{ -\sqrt{(\beta(\rho-1)+\frac{1}{4}(\sigma+1)^2 + \beta(\rho-1)[\beta(7\sigma-1)+\sigma^2-1]) + \right. \\&\quad \left. + \beta(\beta-\rho+1+\frac{1}{4}(\sigma+1)^2) \right\}.\end{aligned}$$

Дальнейшие исследования опираются на утверждение, характеризующее свойства точек равновесия рассматриваемой системы в смысле Якоби.

Теорема [5]. Если свободные параметры β , $\rho > 1$ и σ системы Лоренца удовлетворяют одновременно условиям

$$\beta(\beta-\rho+1) + \frac{1}{4}(\sigma+1)^2 < 0$$

и

$$\frac{1}{4}\beta\{\beta[-7\rho\sigma+\rho+\sigma(\sigma+9)]-2\sigma(\rho-1)(\sigma+1)\} > 0,$$

то точки равновесия $S_+[\sqrt{\beta(\rho-1)}, \rho-1]$ и $S_-[-\sqrt{\beta(\rho-1)}, \rho-1]$ системы Лоренца устойчивы по Якоби; в противном случае эти точки равновесия неустойчивы по Якоби.

Постановка обратной задачи. Рассматривается обратная задача вычислительной диагностики динамических систем, которая в рамках выбранной математической модели описывается операторным уравнением

$$Ax = y, \quad x \in X, \quad y \in Y,$$

где X, Y – гильбертовы пространства;

A – компактный линейный оператор, действующий из X в Y .

Правая часть возмущенного операторного уравнения представляет приближенные входные данные y^δ , определенные из эксперимента. Предполагается, что погрешность задания входной информации δ известна и имеет место $\|y^\delta - y\| \leq \delta$. Требуется определить устойчивые приближенные решения по заданной приближенной информации y^δ . Существенно, что во многих приложениях обратные задачи являются некорректно поставленными. Далее реализуется подход, основанный на методе регуляризации [11].

Приближенное решение рассматриваемой обратной задачи вычислительной диагностики связано с поиском минимума функционала Тихонова:

$$x_\alpha^\delta = \arg \min_{x \in X} J_\alpha(x), \quad \alpha > 0;$$

здесь x_α^δ – регуляризованное решение уравнения $Ax = y^\delta$ с параметром регуляризации α ; при этом минимизируемый функционал определен в виде

$$J_\alpha(x) = \|Ax - y^\delta\|_Y^2 + \alpha \|x\|_X^2,$$

где $\|Ax - y^\delta\|_Y^2$ – функционал невязки (квадрат нормы в пространстве Y);

$\alpha \|x\|_X^2$ – стабилизирующий функционал.

Реализуемый метод трактуют как сходящийся метод регуляризации, если выполнено условие

$$\sup_{\|y^\delta - y\| \leq \delta} \|R_\alpha y^\delta - x\| \rightarrow 0 \quad \text{при } \delta \rightarrow 0;$$

здесь введено семейство линейных ограниченных операторов $R_\alpha: Y \rightarrow X$, с параметром регуляризации $\alpha > 0$, таких, что

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} R_\alpha Ax = x \quad \forall x \in X.$$

При использовании заданной *a priori* информации $x \in X_1 \subset X$, погрешность решения в наихудшем случае составляет [11]

$$\Delta(\delta, X_1, R_\alpha) = \sup \{ \|R_\alpha y^\delta - x\| : x \in X_1, y \in Y, \|y^\delta - y\| \leq \delta \}.$$

Кроме того, для любого $R_\alpha(0) = 0$ имеет место

$$\Delta(\delta, X_1, R_\alpha) \geq \Delta_0(\delta, X_1),$$

где

$$\Delta_0(\delta, X_1) = \sup \{ \|x\| : x \in X_1, \|Ax\| \leq \delta \}.$$

Задача вычислительной диагностики системы, как обратная задача на собственные значения тензора кривизны отклонения, связана с поиском вектора переменных управления, при котором первые N собственных значений тензора совпадают с составляющими некоторого заданного ограниченного спектра или достаточно близки к ним. Для оценки уровня рассогласования сравниваемых спектров используется векторный способ описания. Возможные подходы основаны на минимизации квадратичной функции рассогласования или минимизации максимальной из функций рассогласования спектральных составляющих. Так, для попарно сравниваемых спектральных составляющих может быть построено следующее конечное множество критериев рассогласования

$$f_i(x) = |\lambda_i(x) - \lambda_i^*(x)|, \quad x \in X \subset \mathbb{R}^n, i \in J,$$

где $\lambda_i(x), \lambda_i^*(x)$ – собственные значения, относящиеся к исходному (текущему) и заданному спектрам;

x – вектор переменных управления;

X – допустимая область;

n – размерность задачи;

$J = \{1, \dots, n\}$; через R^n обозначено n –мерное вещественное линейное пространство.

Необходимо найти такой вектор переменных управления, который приводит к наименьшим отличиям между сравниваемыми спектрами, т.е. следует произвести настройку модели объекта на заданный спектр. Задача диагностирования формулируется в следующем виде: определить вектор переменных управления $x \in X$, который минимизирует максимальное значение критерия рассогласования, т.е. требуется найти

$$\min_{x \in X \subset R^n} \max_{i \in I} \{f_i(x)\}. \quad (P)$$

Решением сформулированной дискретной минимаксной задачи (P) является такой вектор $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)^T$, принадлежащий множеству допустимых значений, при котором скалярная критериальная функция $f(x) = \max \{f_1(x), \dots, f_N(x)\}$ принимает минимальное значение. Если имеет место $f(x^*) = 0$, то спектр собственных значений тензора полностью совпадает с заданным спектром по N низшим составляющим. Последнее условие вследствие неполноты экспериментальных данных и погрешностей, полученных при измерениях, не выполняется. Ниже рассматривается регуляризованная задача $(P)_\alpha$ с многоэкстремальной не всюду дифференцируемой критериальной функцией $f(x)$ и параметром регуляризации $\alpha > 0$.

В обобщение постановок экстремальных задач вычислительной диагностики, далее формулируется следующая задача глобальной оптимизации: требуется найти

$$f(x^*) = \min_{x \in X \subset R^n} f(x), \quad (10)$$

где

$$X = \{x \in D : g_i(x) \leq 0, i \in I\}, \quad (11)$$

$$D = \{x \in R^n : a_j \leq x_j \leq b_j, j \in J\}, \quad (12)$$

и использованы обозначения: $f(x)$ – целевая функция; $g_i(x)$ – функции ограничений задачи, $i \in I$; $I = \{1, \dots, m\}$ – конечное множество индексов; D – область поиска; x^* – глобальное решение. Скалярные функции $f(x)$, $g_i(x)$, $i \in I$, задачи (10)–(12) предполагаются непрерывными липшицевыми. Предполагается также, что действительная функция $f : R^n \rightarrow R$ является многоэкстремальной, не всюду дифференцируемой и для нее задана вычислительная процедура, позволяющая определять значения функции в точках допустимой области. Необходимо также учесть возможную высокую трудоемкость вычисления критериальных функций, что может потребовать значительных вычислительных ресурсов.

Гибридные алгоритмы. Обзор современных методов глобальной оптимизации дан в работе [14]. Следует отметить, что эффективность детерминированных методов глобальной оптимизации существенно ограничена размерностью экстремальной задачи. Структуры алгоритмов глобальной минимизации, представленных ниже, построены на основе стохастического кратного алгоритма столкновения частиц М–РСА [15], объединенного с процедурами поиска локальных минимумов не всюду дифференцируемых функций. Работа современного алгоритма глобальной оптимизации М–РСА основана на использовании аналогии с физическими процессами абсорбции и рассеяния частиц при ядерных реакциях. В простейшей версии алгоритма для исследования области поиска используется одна частица. На начальном шаге выбирается пробное решение (Old_Config), которое затем модифицируется посредством стохастического возмущения (Perturbation()), что позволяет найти новое решение (New_Config). С помощью функции Fitness() дается сравнительная оценка нового и предыдущего решений, на основании которой новое решение может быть принято или отвергнуто. Если новое решение отвергнуто, то происходит переход к функции Scattering(), реализующей схему Метрополиса. Для сканирования области, перспективной на

минимум, применяются функции `Perturbation()` и `Small_Perturbation()`. Новое решение принимается, если оно лучше предыдущего (абсорбция); если найденное решение хуже предыдущего, то происходит переход в отдаленную область пространства поиска (рассеяние), что позволяет преодолевать локальные минимумы. Эффективность описанного поиска глобального решения алгоритмом значительно повышается за счет одновременного использования большого числа частиц. Такой подход реализует алгоритм М-РСА, который непосредственно ориентирован на применение в среде параллельных вычислений. Наилучшее решение определяется с учетом данных о всех частицах, участвующих в процессе. Единственным задаваемым параметром для алгоритма М-РСА является число итераций. Более мощный кратный алгоритм столкновения частиц с квазиотражениями QRM-РСА представлен в [16].

Реализованы новые гибридные алгоритмы, интегрирующие алгоритм QRM-РСА и детерминированные алгоритмы локальной минимизации. Решение подзадачи локального поиска для не всюду дифференцируемой критериальной функции можно получить с помощью методов, не использующих производные. В работе [17] представлен гибридный алгоритм HJPCA, объединяющий раннюю версию алгоритма столкновения частиц и локальный поиск методом Хука-Дживса. Первый предложенный здесь гибридный алгоритм QRM-PCAHJ объединяет стохастический алгоритм QRM-РСА (сканирование пространства переменных) и метод Хука-Дживса (локальный поиск). Следует отметить, что благодаря более эффективному сканированию пространства переменных предложенный гибридный алгоритм является более мощным по сравнению с алгоритмом HJPCA. Ниже приведен фрагмент псевдокода нового гибридного алгоритма QRM-PCAHJ.

```

for  $j \leftarrow 1, n_{particles}$  do
    Generate an initial solution  $OldConfig_j$ 
    Determinate quasi-reflective solution  $QOldConfig_j$ 
    if  $Fitness(QOldConfig_j) < Fitness(OldConfig_j)$  then
         $OldConfig_j \leftarrow QOldConfig_j$ 
    end if
end for
UpdateBlackboard()
while Stopping criteria not yet met do
    for  $j \leftarrow 1, n_{particles}$  do
        Perturbation()
        if  $Fitness(NewConfig_j) < Fitness(OldConfig_j)$  then
            if  $Fitness(NewConfig_j) < BestFitness$  then
                 $BestFitness = Fitness(NewConfig_j)$ 
                 $BestConfig \leftarrow NewConfig_j$ 
            end if
        end if
         $OldConfig_j \leftarrow NewConfig_j$ 
        Exploration()
        else
            Scattering()
        end if
    end for
    if It is time to get the reflected population (each  $n_{reflection}$  iterations) then
        Determine reflective solution  $QOldConfig_j$ 
        if  $Fitness(QOldConfig_j) < Fitness(OldConfig_j)$  then
             $OldConfig_j \leftarrow QOldConfig_j$ 
        end if
    end if
end while

```

end for

if It is time to update the blackboard (each $n_{blackboard}$ iterations) then

UpdateBlackboard()

end if

end while

BestConfig ← UpdateBlackboard()

return BestConfig

В состав алгоритма QRM-PCAYJ входят также стандартные процедуры Perturbation() и Small_Perturbation() [15]. Второй гибридный алгоритм QRM-PCALMSI, объединяющий стохастический алгоритм QRM-PCA и детерминированный метод линеаризации для сглаживающих аппроксимаций критериальных функций LMSI [18].

Численный пример. Предполагается, что по результатам анализа экспериментальных данных для системы Лоренца установлены следующие приближенные собственные значения тензора кривизны отклонения: $\lambda_+^* \approx 67,5$; $\lambda_-^* \approx -105,0$. Приведенная косвенная информация, полученная моделированием системы Лоренца при стандартных значениях ее параметров, представляет входные данные для решения обратной задачи [19]. Относительная погрешность входных данных не превышает 1,9%. Требуется восстановить значения параметров системы по известным λ_+^* и λ_-^* . Переменными управления являются относительные (определяемые в %) величины x_1, x_2, x_3 , соответствующие искомым параметрам σ, ρ, β . Критериальная функция рассматриваемой обратной задачи определена в виде

$$F(x) = \sum_{i=1}^2 \gamma_i f_i^2(x) + \alpha \|x\|_2^2,$$

где $\gamma_i, f_i(x)$ – весовой коэффициент и частный критерий, соответствующие i -му собственному значению λ_i : $\lambda_1(x) = \lambda_+(x)$, $\lambda_2(x) = \lambda_-(x)$;

$$f_i(x) = (\lambda_i^* - \lambda_i(x)), \quad i = 1, 2;$$

α – параметр регуляризации; $x \in \mathbb{R}^3$.

При решении используется гибридный алгоритм QRM-PCALMSI. Изменение переменных управления x_i , $i = 1, 3$, при возрастании числа итераций в заключительной фазе локального поиска показано на рисунке 1; соответствующее изменение значений критериальной функции представлено на рисунке 2.

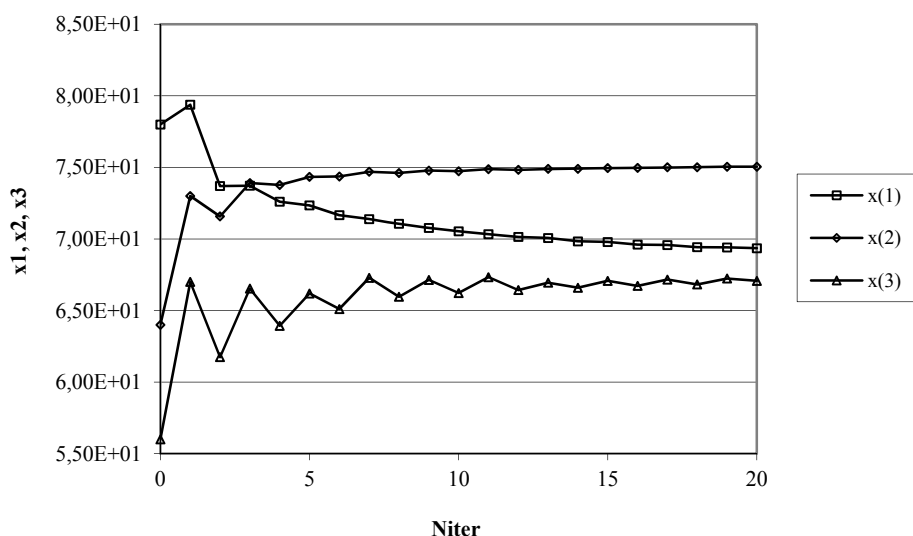


Рисунок 1 – Изменение значений переменных управления x_i , $i = 1, 3$, с ростом числа итераций N_{iter}

По завершении двадцати итераций получено: $F(x^{20}) \approx 0,081$; $x_1^{20} \approx 69,35\%$, $x_2^{20} \approx 75,04\%$, $x_3^{20} \approx 67,07\%$. Восстановленные приближенные значения параметров системы соответственно равны: $\sigma \approx 9,876$; $\rho \approx 28,508$; $\beta \approx 2,679$. Наибольшая относительная погрешность решения (определяется восстановленным значением параметра ρ системы Лоренца) здесь не превышает 2,0%. Можно также отметить достаточную согласованность точности полученного приближенного решения обратной задачи (обусловленную в том числе выбором значений параметра регуляризации α) и заданной входной информации.

Итак, получено решение задачи вычислительной диагностики и восстановлены приближенные значения параметров системы Лоренца, близкие к стандартным: $\sigma^* = 10$, $\rho^* = 28$, $\beta^* = 2,6$. Следует отметить, что при указанных значениях параметров все точки равновесия исследуемой системы неустойчивы по Якоби [5].

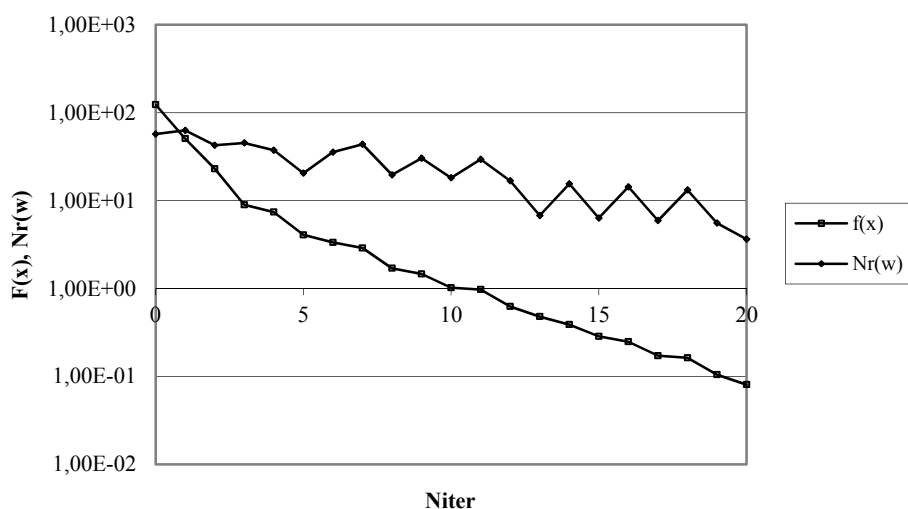


Рисунок 2 – Изменение значений критериальной функции $F(x)$ и нормы $Nr(w)$ вектора поиска с ростом числа итераций N_{iter}

Выводы. Рассмотрены вопросы устойчивости по Якоби динамических систем, связанные в рамках теории Косамби–Картана–Черна с определением геометрических инвариантов. Предложена методика восстановления характеристик системы по косвенной информации, представленной собственными значениями тензора кривизны отклонения. При решении обратной задачи вычислительной диагностики используется оптимизационный подход. Представлены новые гибридные алгоритмы глобальной оптимизации, реализованные в виде программного обеспечения. Проведено модельное восстановление характеристик системы Лоренца. Точность полученного приближенного решения согласована с точностью задания входной информации, определенной по результатам анализа экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giesl, P. Review on computational methods for Lyapunov functions / P. Giesl, S. Hafstein // Discrete & Continuous Dynamical Systems. – B, – 2015. – Vol. 20, № 8. – P. 2291–2331.
2. Udriște, C. Jacobi stability and geometric dynamics / C. Udriște, I.R. Nicola // Journal of Dynamic Systems and Geometrical Theories. – 2007. – Vol. 5, № 1. – P. 85–95.
3. Harko, T. Kosambi–Cartan–Chern (KCC) theory for higher order dynamical systems / T. Harko, P. Pantaragphong, S.V. Sabau // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2016. – V. 13, № 2. – 1656014 (24 pages).
4. Punzi, R. Geometry and stability of dynamical systems / R. Punzi, M.N.R. Wohlfarth // Physical Review E. – 2009. – V. 79, № 4. – 046606 (22 pages).

5. Harko, T. Jacobi stability analysis of the Lorenz system / T. Harko, C.Y. Ho, C.S. Leung, S. Yip // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2015. – V. 12, № 7. – 1550081 (23 pages).
6. Bloch, A.M. Neighboring external optimal control for mechanical systems on Riemannian manifolds / A.M. Bloch, F. Gupta, I.V. Kolmanovsky // Journal of Geometric Mechanics. – 2016. – V. 8, № 3. – P. 257–272.
7. Yajima, T. Jacobi stability for dynamical systems of two-dimensional second-order differential equations and application to overhead crane system / T. Yajima, K. Yamasaki // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2016. – V. 13, № 4. – P. 1650045 (16 pages).
8. Gupta, T. Jacobi stability analysis of Rikitake system / T. Gupta // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2016. – V. 13, № 7. – P. 1650098 (20 pages).
9. Böhmer, C.G. Jacobi stability analysis of dynamical systems – applications in gravitation and cosmology / C.G. Böhmer, T. Harko, S.V. Sabau // Advances in Theoretical and Mathematical Physics. – 2012. – V. 16, № 4. – P. 1145–1196.
10. Lake, M.J. Dynamical behavior and Jacobi stability analysis of wound strings / M.J. Lake, T. Harko // European Physical Journal C. – 2016. – V. 76, № 6. – 331 (26 pages).
11. Kirsch, A. An introduction to the mathematical theory of inverse problems. 2nd edition / A. Kirsch. – New York et al.: Springer, 2011. – XIV+308 p.
12. Goncharsky, A.V. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography / A.V. Goncharsky, S.Y. Romanov // Inverse Problems. – 2013. – V. 29, № 7. – P. 1–22.
13. Lorenz, E.N. Deterministic nonperiodic flow / E.N. Lorenz // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1963. – V. 20, № 1. – P. 130–141.
14. Floudas, C.A. A review of recent advances in global optimization / C.A. Floudas, C.E. Gounaris // Journal of Global Optimization. – 2009. – V. 45, № 1. – P. 3–38.
15. Luz, E.F.P. A new multi-particle collision algorithm for optimization in a high performance environment / E.F.P. Luz, J.C. Becceneri, H.F. de Campos Velho // Journal of Computational Interdisciplinary Sciences, 2008. – V. 1. – P. 3–10.
16. Torres, R.H. Multi-particle / V.D. Sulimov, P.M. Shkapov // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2012. – V. 2, № 12. – P. 734–741.
17. Rios-Coelho, A.C. A Metropolis algorithm combined with Hooke-Jeeves local search method applied to global optimization / A.C. Rios-Coelho, W.F. Sacco, N.A. Henderson // Applied Mathematics and Computation. – 2010. – V. 217, № 2. – P. 843–8.
18. Сулимов, В.Д. Оптимизация сингулярных чисел матриц, зависящих от параметров, с использованием гибридных алгоритмов / В.Д. Сулимов, П.М. Шкапов, А.В. Сулимов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2016, № 5 (68). – С. 46–66. doi: 10.18698/1812–3368–2016–5–46–66.
19. Сулимов, В.Д. Устойчивость по Якоби и вычислительная диагностика динамических систем с использованием гибридных алгоритмов / В.Д. Сулимов, П.М. Шкапов, А.В. Сулимов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017, № 4–2 (324). – С. 61–71.

Сулимов Валерий Дмитриевич
Московский государственный
технический университет им. Н.Э.
Баумана, г. Москва
Старший преподаватель кафедры
«Теоретическая механика» им.
проф. Н.Е. Жуковского
105005, г. Москва, ул. 2-я
Бауманская, 5
Тел. 8-499-263-64-96
E-mail: spm@bmstu.ru

Шкапов Павел Михайлович
Московский государственный
технический университет им.
Н.Э. Баумана, г. Москва
Доктор технических наук, зав.
кафедрой «Теоретическая
механика» им. проф. Н.Е.
Жуковского
105005, г. Москва, ул. 2-я
Бауманская, 5
Тел. 8-499-263-69-69
E-mail: spm2@bk.ru

Сулимов Андрей Валерьевич
Филиал Московского
государственного университета им.
М.В. Ломоносова, г. Севастополь
Старший специалист по учебно-
методической работе практикума по
физике
299001, г. Севастополь, ул. Героев
Севастополя, 7
Тел. +7-(8692)-40-18-27
E-mail: avs7@yandex.ru

V.D. SULIMOV, P.M. SHKAPOV, A.V. SULIMOV

GEOMETRIC STRUCTURES AND COMPUTATIONAL DIAGNOSTICS OF DYNAMICAL SYSTEMS USING HYBRID ALGORITHMS

Abstract. Consideration is being given to problems of diagnosing stability of dynamical systems in the framework of the Kosambi–Cartan–Chern theory. The time evolution of a system one describes in geometric terms, by interpreting it as a geodesic in the Finsler space. Main geometrical invariants of the system under investigation are obtained. Eigenvalues of the second invariant determine the Jacobi stability of the system. The problem of computational diagnostics of the system based on given eigenvalues of the deviation curvature tensor is stated. Scalar criterion functions are supposed being continuous, Lipschitzian, multiextremal, not necessary everywhere differentiable. Global solutions are searched for by use of new hybrid algorithms that combine a stochastic Quasi Reflective Multi-Particle Collision Algorithm (for scanning a search space) and deterministic methods for local searching. The local search is realized by use of the Hooke–Jeeves method in the first algorithm. Two-parametric

smoothing approximations of the criterion function are introduced for local searching in the second algorithm. A numerical example on restoring parameters and computational diagnostics of the Lorenz system is presented.

Keywords: dynamical system, Jacobi stability, geometrical invariant, criterion function, global optimization, hybrid algorithm, Lorenz system.

BIBLIOGRAPHY

1. Giesl, P. Review on computational methods for Lyapunov functions / P. Giesl, S. Hafstein // *Discrete & Continuous Dynamical Systems*. – B, – 2015. – Vol. 20, № 8. – P. 2291–2331.
2. Udriște, C. Jacobi stability and geometric dynamics / C. Udriște, I.R. Nicola // *Journal of Dynamic Systems and Geometrical Theories*. – 2007. – Vol. 5, № 1. – P. 85–95.
3. Harko, T. Kosambi–Cartan–Chern (KCC) theory for higher order dynamical systems / T. Harko, P. Pantaragphong, S.V. Sabau // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*. – 2016. – V. 13, № 2. – 1656014 (24 pages).
4. Punzi, R. Geometry and stability of dynamical systems / R. Punzi, M.N.R. Wohlfarth // *Physical Review E*. – 2009. – V. 79, № 4. – 046606 (22 pages).
5. Harko, T. Jacobi stability analysis of the Lorenz system / T. Harko, C.Y. Ho, C.S. Leung, S. Yip // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*. – 2015. – V. 12, № 7. – 1550081 (23 pages).
6. Bloch, A.M. Neighboring external optimal control for mechanical systems on Riemannian manifolds / A.M. Bloch, F. Gupta, I.V. Kolmanovsky // *Journal of Geometric Mechanics*. – 2016. – V. 8, № 3. – P. 257–272.
7. Yajima, T. Jacobi stability for dynamical systems of two-dimensional second-order differential equations and application to overhead crane system / T. Yajima, K. Yamasaki // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*. – 2016. – V. 13, № 4. – P. 1650045 (16 pages).
8. Gupta, T. Jacobi stability analysis of Rikitake system / T. Gupta // *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*. – 2016. – V. 13, № 7. – P. 1650098 (20 pages).
9. Böhmer, C.G. Jacobi stability analysis of dynamical systems – applications in gravitation and cosmology / C.G. Böhmer, T. Harko, S.V. Sabau // *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*. – 2012. – V. 16, № 4. – P. 1145–1196.
10. Lake, M.J. Dynamical behavior and Jacobi stability analysis of wound strings / M.J. Lake, T. Harko // *European Physical Journal C*. – 2016. – V. 76, № 6. – 331 (26 pages).
11. Kirsch, A. An introduction to the mathematical theory of inverse problems. 2nd edition / A. Kirsch. – New York et al.: Springer, 2011. – XIV+308 p.
12. Goncharsky, A.V. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography / A.V. Goncharsky, S.Y. Romanov // *Inverse Problems*. – 2013. – V. 29, № 7. – P. 1–22.
13. Lorenz, E.N. Deterministic nonperiodic flow / E.N. Lorenz // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1963. – V. 20, № 1. – P. 130–141.
14. Floudas, C.A. A review of recent advances in global optimization / C.A. Floudas, C.E. Gounaris // *Journal of Global Optimization*. – 2009. – V. 45, № 1. – P. 3–38.
15. Luz, E.F.P. A new multi-particle collision algorithm for optimization in a high performance environment / E.F.P. Luz, J.C. Becceneri, H.F. de Campos Velho // *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 2008. – V. 1. – P. 3–10.
16. Torres, R.H. Multi-particle / V.D. Sulimov, P.M. Shkapov // *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. – 2012. – V. 2, № 12. – P. 734–741.
17. Rios-Coelho, A.C. A Metropolis algorithm combined with Hooke–Jeeves local search method applied to global optimization / A.C. Rios-Coelho, W.F. Sacco, N.A. Henderson // *Applied Mathematics and Computation*. – 2010. – V. 217, № 2. – P. 843–8.
18. Sulimov, V.D. Optimizaciya singulyarnykh chisel matric, zavisyashchih ot parametrov, s ispolzovaniem gibridnykh algoritmov / V.D. Sulimov, P.M. Shkapov, A.V. Sulimov // *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Estestvennye nauki»* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.]. – 2016, № 5 (68). – S. 46–66.
19. Sulimov, V.D. Ustoychivost po Yakobi i vychislitel'naya diagnostika dinamicheskikh system s ispolzovaniem gibridnykh algoritmov / V.D. Sulimov, P.M. Shkapov, A.V. Sulimov // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2017, № 4–2 (324). – P. 61–71.

Sulimov Valeriy Dmitrievich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Senior Teacher of Theoretical Mechanics Department named after prof. N.E. Zhukovskiy
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5
Ph.: 8-499-263-64-96
E-mail: spm@bmstu.ru

Shkapov Pavel Mikhailovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Dr. Sci. (Eng.), Head of Theoretical Mechanics Department named after prof. N.E. Zhukovskiy
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5
Ph.: 8-499-263-69-69
E-mail: spm2@bk.ru

Sulimov Andrey Valeryevich

Branch of Lomonosov Moscow State University in Sevastopol, Sevastopol
Senior specialist on educational-methodical work of physical practicum
299001, Sevastopol, Geroev Sevastopolya Street, 7
Ph.: +7-(8692)-40-18-27
E-mail: avs7@yandex.ru

РЕЖИМНЫЕ НАГРУЗКИ И КОМПЛЕКТАЦИЯ ГЛАВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МОРСКИХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Аннотация. *Представлены результаты исследования характера режимных нагрузок энергетических установок, а также предложения по их комплектации для морских плавучих буровых комплексов разведки нефти и газа на континентальном шельфе.*

Ключевые слова: платформа, скважина, бурение, лебёдка, нагрузка.

Введение

В мире насчитывается 514 самоподъёмных буровых установок (СПБУ), 224 полупогружных буровых установок (ППБУ), 83 буровых судна (БС) и до 2020 года должно быть построено, соответственно, 42, 26 и 35 плавучих буровых платформ (ПБУ), причём, в настоящее время из них используется только, соответственно 63, 68,3 и 50,6 % платформ [1–3]. Энергетические установки (ЭУ) обеспечивают все энергетические потребности ПБУ и определяют их основные технологические характеристики.

Цель и задачи исследования

Задачей данной работы является порежимный анализ характера, ранжирование и суммирование нагрузок ЭУ ПБУ с целью определения установленной мощности ЭУ ПБУ ($N_{\text{е}}^{\text{уст}}$).

Нагрузки ЭУ ПБУ состоят из нагрузок бурового комплекта $N_{\text{БК}}$ (см. рисунок 1 на примере бурового судна (БС)), нагрузок системы подъема платформы над поверхностью моря $N_{\text{П}}$ (для СПБУ), нагрузок системы позиционирования и балластной системы (для ППБУ и БС) и собственных нужд ПБУ $N_{\text{СН}}$, которые ранжируются и суммируются в зависимости от типа ПБУ и режима работы: подготовка к переходу; переход к точке бурения; установка на точке бурения, подъем (для СПБУ); позиционирование (для ППБУ и БС), сборки устьевых устройств и бурение скважины на заданную глубину (сборка инструмента, удлинения бурильной колонны, приготовление и циркуляция бурового раствора, крепление скважины, исследование и каротаж опробование горизонта, ликвидация или консервация скважины).

Основной раздел

Для СПБУ нагрузки ЭУ определяются собственными нуждами ПБУ, приводом домкратов по подъему и спуску опорных колонн и балластной системы для СПБУ, когда принимается 100% балласта для «задавливания» колонн в грунт, для ППБУ и БС – нагрузок системы позиционирования и удержания над точкой бурения и балластной системы для перевода ППБУ в рабочее состояние (погружение понтонов) [4–6].

Перед этими режимами производится контрольное опробование всех судовых систем и устройств, домкратов опорных колонн, вспомогательных дизельгенераторов (ВДГ).

Нагрузки ЭУ не превышают мощности 1–2 ВДГ и носят спокойный характер. В случае работы одного ВДГ – второй находится в «горячем резерве». Так, например, для СПБУ «Сиваш» буксировка осуществляется двумя или тремя ТБС – цугом с $V_S = 2...3$ узла, прокладку осуществляет геофизическое судно, водолазные работы – водолазный бот, навигационное обеспечение и наблюдение за акваторией – АСС «Вихрь»

Для ППБУ при статической системе удержания для травления и обтяжки якорных цепей при позиционировании и работы балластной системы требуется кроме работы двух ВДГ в «горячем резерве» поддерживается один ОДГ.

На режиме «обустройство устья скважины» нагрузки ЭУ СПБУ состоят из:

– постановки водоотделительных колонн и сборки превентора на спайдерной палубе; работе части вспомогательных механизмов технологического комплекса (КНД, КВД, перемешивателя и др.); работы балластной системы; собственных нужд СПБУ.

Для ПБУ и БС для спуска плит временного и постоянного основания, устьевого устройства и секций морского стояка требуется работа грузовых кранов и БЛ, части вспомогательных механизмов технологического комплекса (КНД, КВД, перемешивателя и др.), работа балластной и системы позиционирования, собственных нужд ПБУ.

Для энергообеспечения этих работ требуется работа ОДГ и поддержание второго ОДГ в «горячем резерве».

Нагрузки ПБУ на режиме бурение. Режим «бурения» начинается с бурения под направление: сборки бурового инструмента, когда работают грузовой кран, вспомогательная лебедка, БЛ, элеватор и другие вспомогательные механизмы. Далее идут режимы бурового комплекса: бурение под кондуктор; бурение под 1–3 технологическую, промежуточную и эксплуатационную колонны. При бурении работают 1–2 буровых насоса БН (1 в резерве), ротор (турбобур, электробур) и периодически отключается ротор и включается БЛ (рисунок 3); происходит «приподъем инструмента» и промывка скважины.

Буровое оборудование, выпускаемое в СНГ, нормализовано по номинальной грузоподъемности, соответствующей среднему весу погонного метра буровой колонны (30 кгс/м) при расчетной глубине скважины.

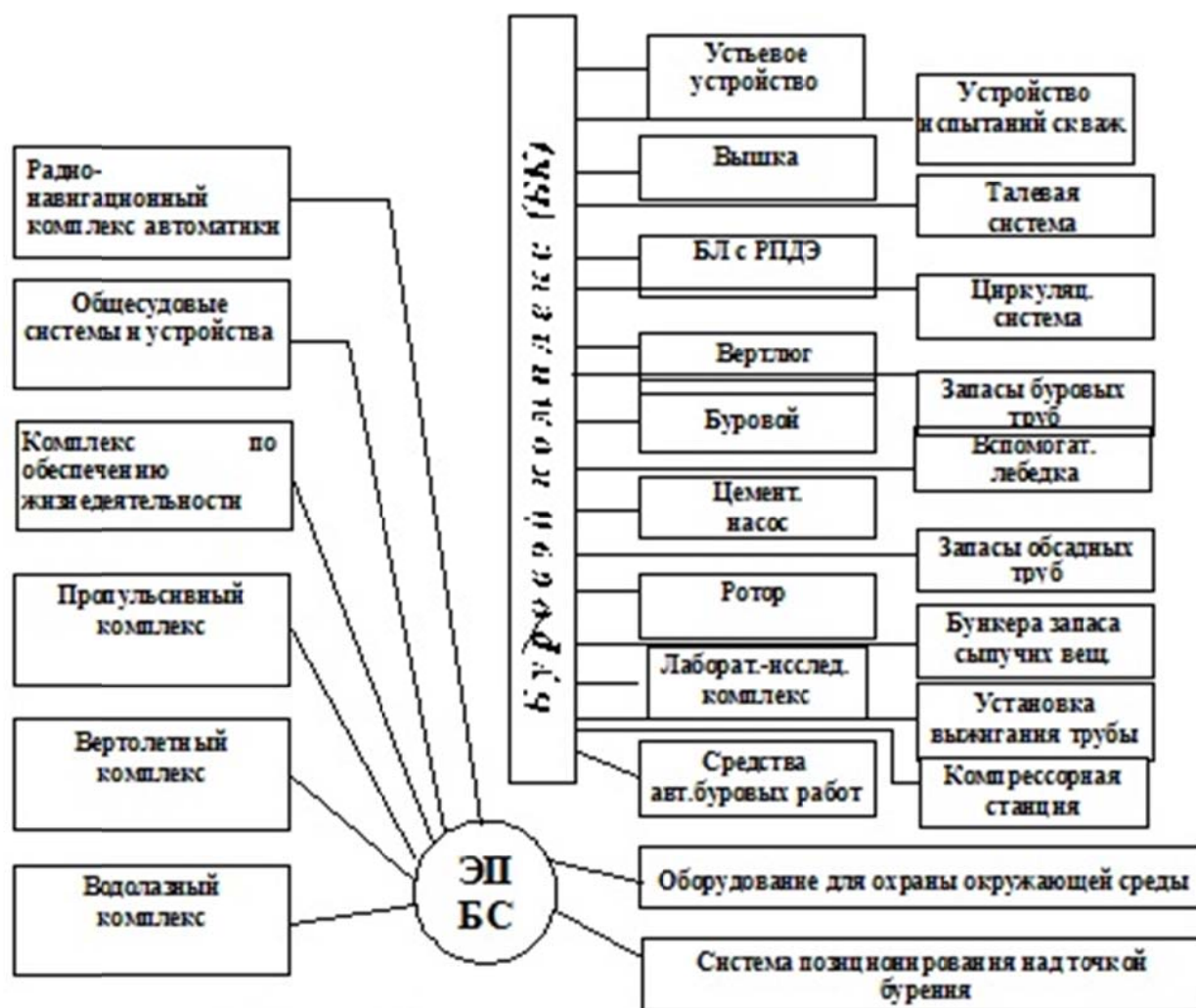


Рисунок 1 – Структурная схема энергообеспечения бурового судна

В МБУ индивидуальный и групповой привод бурового оборудования выполняется очень редко. Стоимость морских скважин намного больше стоимости скважин, пробуренных на суше. Разведочные скважины обычно глубокие и сверхглубокие (6000...9000 м). Поэтому в технологии морского бурения для уменьшения вероятности аварии «прихвата» инструмента или буровой колонны обязателен «приподъем» инструмента на несколько

метров от забоя в процессе бурения, когда выключается ротор и включается БЛ при работающих БН для промывки забоя. Это возможно только при централизованном электроприводе за счет кратковременной перегрузки СЭ

Нагрузки ЭУ от БЛ растут с увеличением глубины скважины (рисунок 2), так как увеличивается вес буровой колонны и работа с максимальной скоростью подъема становится невозможной [7–9]. Подъем инструмента из забоя начинается с $V_{\text{п}}^{\text{min}}$ для того, чтобы избежать «поршневого» эффекта и обвала необсаженных стенок скважины, а также из-за большой массы бурильной колонны и присоединенной массы бурового раствора.

Как видно из рисунка 2 при малых глубинах H_6 $V_{\text{п}}$ невелика и происходит их снижение до $H_6 = 1000$ м, т.к. в БЛ работает всего один электродвигатель.

Как показал опыт эксплуатации СПБУ «Бакы», мощность БЛ используется полностью при $H_6 \geq 2000$ м. Нагрузки ЭУ при включении БЛ носят импульсно–циклический характер с периодом при СПО $\tau_{\text{ц}} = 2\text{--}5$ мин, а при бурении с приподъемом $\tau_{\text{ц}} = 15$ мин. Время работы БЛ зависит от скорости и высоты подъема (при СПО на высоту одной свечи l):

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{l}{V_{\text{п}}},$$

которое обычно составляет 20–90 с (рисунок 2).

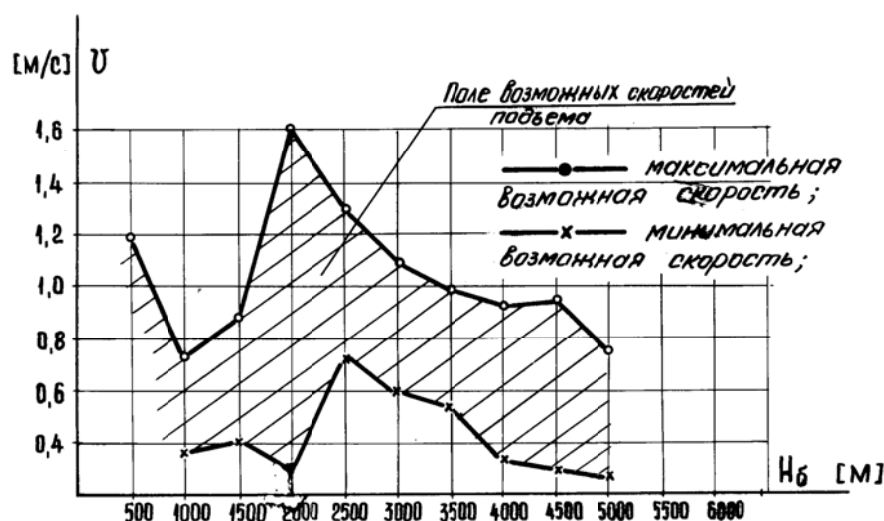


Рисунок 2 – Изменение скорости подъема буровой колонны в зависимости от глубины бурения

При включении БЛ время работы электродвигателей составляет менее 30% в цикле, а увеличение нагрузки происходит от 15–30% до 50–110% номинальной мощности двигателей, что не только значительно снижает средний коэффициент загрузки ЭУ, но и приводит к отключению двигателей автоматикой при выключении БЛ, так как двигатель, работающий по нагрузочной характеристике резко набирает обороты, всережимный регулятор не справляется и ограничитель максимальных оборотов выключает двигатель.

Чтобы уменьшить степень риска приходится включать в работу еще один резервный двигатель и еще более уменьшать коэффициент загрузки ЭУ или ограничивать скорость подъема буровой колонны и, следовательно, уменьшать производительность работ. При этом агрегаты ЭУ должны длительное время работать с малой нагрузкой или вообще на «холостом ходу» («вращающийся» или «незагруженный» резерв).

Нагрузки ЭУ от БН, ротора и вспомогательного оборудования БУ (для приготовления буровых растворов и на другие нужды БУ) более стабильны в пределах определенных глубин скважин. Так, например, для СПБУ «Бакы» и «60–летия Октября» суммарная нагрузка ЭУ от буровых насосов, ротора, вспомогательного оборудования БУ, общесудового и бытового оборудования (эти нагрузки постоянны и составляют 200–300 кВт) от начала бурения до $H_6 = 1000$ м увеличилась до 1000–1100 кВт, колебалась около этих значений до

$H_6 = 3000$ м, а затем снизилась до 600–800 кВт, т.к. значительно снизился расход бурового раствора (меньше диаметр скважины) и несмотря на увеличение напора БН в связи с увеличением H_6 (см. рисунок 3б). Таким образом, коэффициент загрузки установленной мощности бурового оборудования на режиме «бурение с приподъемом инструмента» следует принимать $K_{з.ср.} = 0,5$) [10, 11].

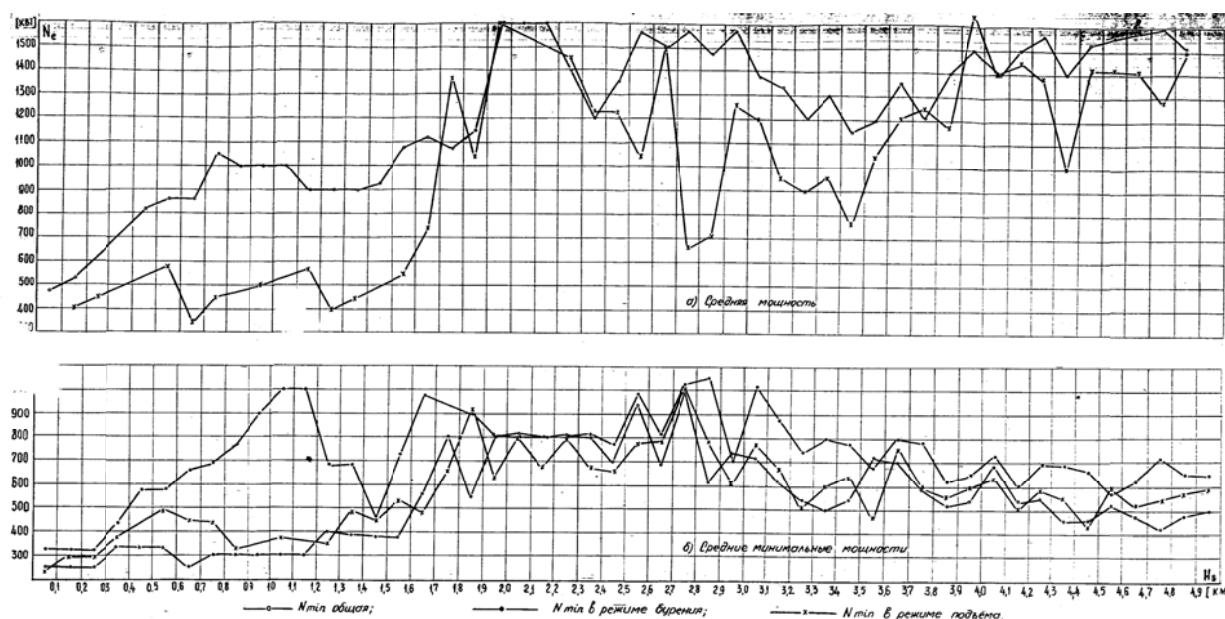


Рисунок 3 – Изменение средней мощности в зависимости от глубины бурения для СПБУ «60 лет Октября» (I скважина)

Сравнительный анализ нагрузок ЭУ СПБУ «Баки» и «60-летия Октября» при бурении пяти скважин показал, что наибольшие фактические нагрузки ЭУ происходят на режиме «бурение с приподъемом инструмента», по которому следует выбирать установленную мощность ЭУ (рисунок 3, а).

Режимы СПО, промывка скважины, расширение скважины, спуск обсадных колонн, цементирование скважины и др. требуют меньших нагрузок ЭУ. Режим «цементирование скважины» должен проводиться с коэффициентами загрузки ЭУ менее 0,5 и не менее чем при 2 работающих агрегатах ЭУ для обеспечения достаточного резерва мощности при выходе из строя одного из работающих агрегатов.

Установленная мощность оборудования БК значительна и превышает нагрузки ЭУ МБУ в несколько раз, т.к. его элементы одновременно не работают.

Большую часть бурового и эксплуатационного оборудования относят к электропотребителям 1 категории, для которых согласно «Правил устройства электроустановок» необходимо питание от двух независимых источников энергии с включением второго источника после аварии первого через 30 с. ЭУ МБУ обычно комплектуются главными двигателями (ОДГ, ОГТГ) с единичной мощностью 0,5–18 МВт, время пуска и приема нагрузки, которыми даже из «горячего резерва» превышает 30 с. Поэтому возможно дополнительное комплектование ЭУ 4–6 аварийными дизельгенераторами типа АС–804, АС–814, АС–500 БАМ (мощностью 0,5–0,6 МВт), которые могли бы обеспечить минимальную нагрузку ЭУ до пуска резервного ГД. Другим, более распространенным способом резервирования является обеспечение нагрузки режима несколькими ГД, суммарная мощность которых превышает необходимую нагрузку ЭУ на данном режиме на единичную мощность одного ГД. Т.е. из условия, что при аварии одного ГД оставшиеся в работе ГД обеспечат нагрузку режима или один ГД как бы находится в «ненагруженном» или «вращающемся» резерве. Это увеличивает выработку ресурса и увеличивает расход топлива, особенно при коэффициентах загрузки и используется только

для турбинных установок, способных длительно работать на «холостом ходу» («незагруженный резерв»). Для ОДГ «вращающийся резерв» используется на самом ответственном режиме «цементирования», а в остальных случаях общепринято использовать «горячий резерв», когда один из ОДГ все время поддерживается в предпусковом состоянии. Это нарушает требования о времени ввода резерва энергообеспечения и увеличивает вероятность «потери скважины». Во всех перечисленных случаях общее количество ГД обеспечивающих режим составляет: $(n_{гд} + 1_p)$.

ПБУ и ряд других технических средств освоения шельфа относятся к саморемонтирующимся, т.е. для них не предусмотрен плановый ремонт с выводом всего технического средства из эксплуатации, а установлено дополнительное количество одноименного оборудования, которое по мере необходимости выводится из эксплуатации для проведения плановых технических обслуживаний и ремонтов, а также послеаварийных ремонтов (ТОР) [4, 7]. Таким образом, минимальное количество двигателей в подобных установках с учетом резервных и ТОР равно $n_{гд} \geq 3$.

Оценка и ранжирование нагрузок для выполнения функций при централизованной ЭУ приобретает первостепенное значение при определении $N_e^{уст}$ и количества главных двигателей.

При этом можно условно классифицировать СЭУ технических средств освоения шельфа (ТСОШ) на однофункциональные и многофункциональные с последовательным и параллельным выполнением функций. Так как все электроэнергетические установки являются централизованными, то есть ГЭУ одновременно выполняет функции ВЭУ ($\Delta N_e^{max}_{ВЭУ}$).

Комплектацию ГЭУ СПБУ (и других аналогичных ТСОШ) с последовательным выполнением функций можно выразить с помощью следующей системы уравнений и неравенств:

$$N_e^{уст} \geq \sum_2^{n_{гд}} N_e^{ГД} \geq N_e^{\Phi 1(max)} K_3^{\Phi 1} + \Delta N_e^{max}_{ВЭУ} + N_e^{ТОР} \geq N_e^{\Phi 2} K_3^{\Phi 2} + N_e^{\Phi 2P} K_3^{\Phi 2P} + \Delta N_e^{max}_{ВЭУ} + N_e^{ТОР} \geq N_e^{\Phi m} K_3^{\Phi m} + \Delta N_e^{max}_{ВЭУ} + N_e^{ТОР} \geq \Delta N_e^{max}_{ВЭУ} + N_e^T \quad (1)$$

где $N_e^{\Phi 1(max)} K_3^{\Phi 1}$ – наиболее напряжённая по мощности функция ЭУ с учётом коэффициента загрузки $K_3^{\Phi 1}$ и резерва мощности, кВт;

$N_e^{\Phi 1(max)}$, $N_e^{\Phi 2}$, ..., $N_e^{\Phi m}$ – последовательно уменьшающаяся нагрузка ГЭУ при выполнении 1; 2; ... m функций ПБУ, кВт;

$N_e^{\Phi 2P} K_3^{\Phi 2P}$ – резервная мощность при выполнении Φ_2 с учётом коэффициента загрузки ГД на $\Phi_2 - K_3^{\Phi 2}$, кВт;

$n_{гд} \geq 3$ количество ГД с учётом резерва и вывода ГД на ТО и в ремонт, кВт;

$$n_{дб}^{ТМТ} = n_{дб} \frac{\sum T_{еп} + \sum T_{ТМТ}}{\sum T_t} - \text{доля ГД выводимых на ТОР, шт.};$$

$n_{гд}^P \geq 1$ – количество резервных ГД, шт.;

$N_e^{ГД} = f(N_e^{\Phi i}, N_e^{\Phi iP}, N_e^{ТОР}, b_e^{min}, \Delta N_{евэу})$ – агрегатная (единичная) мощность ГД, кВт,

где $N_e^{ТОР}$ и $n_{дб}^{ТМТ}$ – соответственно, мощность (кВт) и количество ГД, находящихся на техническом обслуживании и ремонте;

$n_{дб}^T$ – количество резервных ГД;

$\sum T_P$; $\sum T_{ВП}$;

$\sum T_{ТОР}$ – среднее суммарное за весь период эксплуатации, соответственно, время эксплуатации, внеплановых (аварийных) простоев и плановых, профилактики (ТО) и ремонта ГД, ч.

Если ГЭУ скомплектована одинаковыми ГД:

$$N_e^{уст} = n_{гд} N_e^{ГД} = N_e^{ГД} \left[(n_{дб}^{\Phi_{max} + M, 3} + 1) + n_{дб}^{ТМТ} \right] = N_e^{ГД} (n_{дб}^{\Phi_{max} + M, 3} + 1) \left(\frac{\sum T_{еп} + \sum T_{ТМТ}}{\sum T_t} + 1 \right) \quad (2)$$

где $n_{дБ}^{\Phi_{\max} + M_{\dots 3}}$ – количество ГД, обеспечивающих выполнение наиболее напряженной функции и всех общесудовых и бытовых потребителей (ОСБ),

$$n_{ГД}^P = 1.$$

ППБУ и аналогичные ТСОШ одновременно выполняют параллельные функции бурения $\Phi 1^{(\max)}$ и удержания $\Phi 2$ до волнения 7 баллов, так как про дальнейшем увеличении силы шторма выполнение режима бурение небезопасно и бурение прекращается и обеспечивается только удержание. Комплектация ГЭУ ПБУ и ТСОШ с последовательно–параллельным выполнением функций, если нагрузки при выполнении наиболее нагруженной функции превосходят нагрузки при параллельном выполнении других функций, выражается:

$$N_{e}^{уст} \geq \sum_3^{n_{ГД}} N_{e}^{ГД} \geq N_{e}^{\Phi 1(\max)} K_3^{\Phi 1} + N_{e}^{\Phi 2} K_3^{\Phi 2} + N_{e}^{\Phi 1P} K_3^{\Phi 1P} + N_{e}^{\Phi 2P} K_3^{\Phi 2P} + \Delta N_{e}^{\max}_{ВЭУ} + N_{e}^{ТОР} \geq \dots$$

$$\geq \sum_1^m N_{e}^{\Phi i} K_3^{\Phi i} + \sum_1^m N_{e}^{\Phi iP} K_3^{\Phi iP} + \Delta N_{e}^{\max}_{ВЭУ} + N_{e}^{ТОР} \geq \sum_1^K N_{e}^{\Phi i} K_3^{\Phi i} + \sum_1^K N_{e}^{\Phi iP} K_3^{\Phi iP} +$$

$$+ \Delta N_{e}^{\max}_{ВЭУ} + N_{e}^{ТОР} \dots \geq \Delta N_{e}^{\max}_{ВЭУ} + N_{e}^{ТОР} \quad (3)$$

Особенностью комплектации является использование общих резервных ГД для обеспечения нагрузок нескольких функций:

$$\sum_1^m N_{e}^{\Phi iP} K_3^{\Phi iP} = N_{e}^{\Phi(1\dots m)} K_3^{\Phi(1\dots m)P}. \quad (4)$$

Комплектация ВЭУ ПБУ. ВЭУ многофункциональных технических средств с централизованными ЭУ отличается от комплектации традиционных ВЭУ однофункциональных транспортных установок:

– резко сокращается продолжительность работы ВЭУ, т.к. за счет ГЭУ

обеспечивается выполнение всех вспомогательных нужд, а продолжительность работы ГЭУ значительно возрастает, а для некоторых технических средств обязательна непрерывная работа ГЭУ, а работа ВЭУ необходима только в периоды штормовых отстоев в первый (буровой) период эксплуатации;

– при многоагрегатной ГЭУ резервирование ВЭУ можно осуществлять агрегатами ГЭУ. Поэтому ВЭУ по своим характеристикам приближается к аварийной ЭУ и их функции можно совместить:

$$N_{e}^{уст}_{АВЭУ} \geq N_{e}^{ВЭУ} > N_{e}^{АЭУ} \quad (5)$$

Представленные методы комплектации ЭУ СПБУ морских комплексов позволяет оценить оптимальные мощностные ряды ГД, $N_{e}^{ГД}$ для проектируемого морского комплекса в целом и разработать перспективную моторостроительную программу, подчинив ее специфичным условиям эксплуатации.

В качестве ГД технических средств и специализированных судов используются дизели, газодизели, газомоторы и газотурбинные двигатели. До настоящего времени наибольшее влияние на тип ГД оказывали традиционные решения аналогичных наземных буровых установок, имеющих, в основном, индивидуальный или групповой привод оборудования. Учет морских условий эксплуатации, оптимизация характеристик, централизация ЭУ позволяют предъявить к ГД современных технических средств ряд основных требований:

– приспособленность к морским условиям работы (влажный с большим солесодержанием, засорение и обрастание внутренних полостей систем охлаждения забортной воды, ледовые условия в зимний период, большая автономность и др.);

– ограниченные агрегатные мощности, малые средние загрузки, длительная работа на холостом ходу и малой нагрузке, импульсно–циклический характер нагрузок при работе буровых лебедок, подъемных кранов, грейферов и др. подъемных устройств, высокая приемистость, развитое резервирование мощности;

– жесткие массогабаритные требования, определяемые глубиной моря над разрабатываемым месторождением, агрегатные методы монтажа и ремонта, саморемонт, повышенные требования к характеристикам надежности;

– использование высокоэкономичных ГД, утилизация теплоты, сокращение запасов топлива и использование в качестве топлива продуктов скважины, возможность быстрого перехода с жидкого на газообразное топливо и наоборот, более низкий уровень квалификации (чем на морском флоте) обслуживающего персонала и оплата труда в зависимости от производительности технических средств, приспособленность к автоматизации, дистанционному управлению и безвахтенному обслуживанию;

– обеспечение пожаро- и взрывобезопасности, охраны окружающей среды и обитаемости помещений ЭУ, соответствие правилам Российского Морского Регистра судоходства, МАРПОЛ 73/78, МКУБ и других конвенций ИМО.

Наибольшее распространение на отечественных технических средствах получили высоко- и среднеоборотные ДВС, отвечающие поставленным требованиям. Для технических средств, располагающих дешевым природным или попутным нефтяным газом при малых агрегатных мощностях эффективно использовать газовые моторы, газодизели, а при больших агрегатных мощностях или жестких массогабаритных требованиях – газотурбинные двигатели (ГТД). Использование ГТД на дорогом привозном дизельном топливе нерационально, кроме того они имеют меньшую приемистость, чем ДВС и без специальной модернизации значительно снижают экономичность на частичных нагрузках. Для обеспечения надежной работы ГТД необходима совершенная система сепарации влаги принимаемого атмосферного воздуха.

Централизация ЭУ подразумевает использование главной электропередачи. В связи с тем, что большинство главных технических средств специализированных судов требуют электропривод постоянного тока, в современных технических средствах используют электрогенераторы переменного тока, безмашинные тиристорные преобразователи, что значительно упрощает и увеличивает надежность ЭУ. В эксплуатирующихся установках иногда используют смешанные передачи на постоянном и переменном токе (первичные двигатели приводят генераторы постоянного или переменного тока или на одни и те же первичные двигатели навешаны генераторы как постоянного, так и переменного тока, используемые поочередно в зависимости от потребностей или параллельно.

Ввиду наличия на технических средствах технологического оборудования, по мощности соизмеримого с ГД, часто используют для него индивидуальный привод непосредственно от первичного двигателя. В этом случае возникают затруднения компоновочного характера и растет установленная мощность ЭУ за счет увеличения резерва мощности.

В случае необходимости привода малого количества технологического оборудования или использования сухопутного технологического оборудования с традиционным индивидуальным или групповым приводом ухудшаются все характеристики ЭУ за счёт увеличения резерва мощности.

Выбор агрегатной мощности $N_{\epsilon}^{ед}$ по максимальной мощности режима не учитывает продолжительности работы ЭУ на этом режиме с небольшими коэффициентами загрузки, что приводит к большим перерасходам топлива, поэтому, если известен опыт эксплуатации ЭУ с аналогичным технологическим оборудованием, то необходимо построить гistogramмы нагрузок ЭУ за типовой эксплуатационный период (для МБУ – бурение скважины).

Более высоких k_3 ПБУ можно добиться при установке разномощностных ОДГ, но это потребует больших ограничений по времени проведения ТОР и наработка ОДГ разных мощностей будет резко отличаться.

По-видимому, для ПБУ следует создавать мощностные ряды на основе двигателей с унифицированными цилиндропоршневыми группами на основе 26/26, 25/34, 12/18. или использовать ОДГ зарубежного производства, например, типа Катерпиллер.

В действующих ПБУ число и мощность первичных ДВС и генераторов также отличается мало: 2х1400 кВт (генераторы 4х600 + 2х200), 3х660 кВт (генераторы 3х515),

3х1400(генераторы 3х1120), 4х1000 кВт (генераторы 4х1000), 5х1000 (генераторы 5х1000):3х2000 кВт.

Опыта использования ГТД на отечественных специализированных судах не накоплено. Отечественное СПБ «Машпроект» разработало новое поколение судовых ГТГ и ГГПА, отличающееся современными уровнями экономичности и надежности, отвечающее мировым требованиям. Для ГТГ больших мощностей, обслуживающих многофункциональные ЭУ СС, приемистость не играет большого значения, т.к. сбросы и увеличение нагрузки относительно невелики. Дальнейшее увеличение стабильности частоты можно достигнуть за счет выполнения ГТД одновальными, что значительно увеличивает момент инерции роторов ГТД и генератора (ГТД–2500, ГТД–3200), а для ГТД небольших мощностей можно дополнительно устанавливать инерционные накопители энергии, в т.ч. включением с помощью гидротрансформаторов. Использование ГТГ в сочетании с утилизационными котлами позволяет обеспечить потребности СС в паре, в т.ч. и для интенсификации добычи нефти.

Блоки передвижных электростанций на основе авиационных двигателей ПО «Мотор Сич» типа ПАЭС–2500, ПАЭС–1500 для работы на ПБУ мало приспособлены, т.к. выполнены из не коррозионностойких материалов и не приспособлены для работы на влажном морском воздухе со значительным количеством солей.

Заключение

Унификация энергетического оборудования технических средств, МБУ и специальных судов, входящих в состав морских добывающих комплексов позволит не только упростить и удешевить их создание, но и значительно снизит эксплуатационные расходы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлинский С.Л. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации морских сооружений / С.Л. Карлинский, А.А. Малютин. – СПб.: Рубин, 1998. – 250 с.
2. Черенков Н.И. Самоподъемные плавучие платформы и их использование при освоении шельфа / Н.И. Черенков, С.А. Русановский, С.Л. Гончаров // Научно–технические ведомости Севмашвтуза, №1 – 2017. – С.31–36.
3. Черенков Н.И. Некоторые вопросы выбора основных проектных параметров самоподъемных буровых установок / Н.И. Черенков, С.А. Русановский, В.В. Сажин // Научно–технические ведомости Севмашвтуза, №1 – 2017. – С.23–30.
4. Литошенко В.Н. «Режимы работы специализированных судовых энергетических установок»: методические указания для выполнения курсового проекта /СевГТУ: Сост. В.Н. Литошенко. – Севастополь: Изд–во СевГТУ, 2000. – 96 с
5. Литошенко В.Н. Методы повышения надежности и эффективности элементов энергетических установок судов технического флота. – Киев: Общество «Знание» УССР, 1979. – 25 с.
6. Литошенко В.Н. Повышение надежности энергетического обеспечения морских буровых работ. – Киев: общество «Знание» УССР, 1980 – 24 с.
7. Литошенко В.Н. Проектирование и модернизация судовых энергетических установок / В.Н. Литошенко – Севастополь: Изд–во СевНТУ, 2012.–172 с.
8. Мищевич В.И., Логунов Б.М., Уманчик Н.П., Сидоров Р.В., Щекин Ю.Н. Разведка и эксплуатация морских нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1978.–206 с.
- 9.Шостак В.П. Эффективность техники освоения океана (направление проектных исследований) – Киев: «Наукова думка», 2002.– 135 с.
10. Литошенко В.Н., Ципин В.М. Комплектация энергетических установок морских плавучих кранов.– Л.: Судостроение, №6, 1983.– с.22–24.
11. Лобанов В.А. Справочник по технике освоения шельфа./В.А.Лобанов.– Л.: Судостроение, 1983 – 288 с.

Аблаев Алим Рустемович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоустановок морских судов и сооружений»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. 8978–810–05–64

E–mail: ARAblaev@sevsu.ru

A.R. ABLAEV

MODE LOADS AND COMPLETE SETTING OF MAIN ENERGY INSTALLATIONS OF MARINE FLOATING DRILLING COMPLEXES FOR EXPLORATION OF OIL AND GAS DEPOSITS

Abstract. *The results of a study of the nature of the regime loads of power plants, as well as proposals for their configuration for offshore floating drilling systems for oil and gas exploration on the continental shelf are presented.*

Keywords: *platform, well, drilling, winch, load.*

BIBLIOGRAPHY

1. Karlinskiy, S.L. Osobennosti proektirovaniya, stroitelstva i expluatacii morskikh soorugeniya. SPb.: Rubin, 1998.
2. Cherenkov, N.I., Rusanovskiy, S.A., Goncharov, S.L. "Samopodemnie plavuchie platformy i ih ispolzovanie pri osvoenii shelfa" Nauchno–tehnicheskie vedomosti Sevmashvtuza 1 (2017): 31–36.
3. Cherenkov, N.I., Rusanovskiy, S.A., Saginov, V.V. "Nekotore voprosi vibora osnovnih proektnih parametrov samopodemnih burovih ustanovok" Nauchno–tehnicheskie vedomosti Sevmashvtuza 1 (2017): 23–30.
4. Litoshenko, V.N. Regimi raboti specializirovannih sudovih energeticheskikh ustanovok. Sevastopol: SevGTU, 2000.
5. Litoshenko, V.N. Metodi povisheniya nadegnosti i effektivnosti elementov energeticheskikh ustanovok sudov tehnikeskogo flota. Kiev: Znanie, 1979.
6. Litoshenko, V.N. Povishenie nadegnosti energeticheskogo obespecheniya morskikh burovih rabot. Kiev: Znanie, 1980.
7. Litoshenko, V.N. Proektirovanie i modernizatsiya sudovih energeticheskikh ustanovok. Sevastopol: SevNTU, 2012.
8. Mishevich, V. I., B. M. Logunov, N. P. Umanchik, R. V. Sidorov, and Ju. N. Shekin. Razvedka i expluatsiya morskikh neftyanikh i gazovikh mestorogdeniy. M.: Nedra, 1978.
9. Shostak, V.P. Effektivnost tehniki osvoeniya okeana (napravlenie proektnih issledovaniy). Kiev: Naukova dumka, 2002.
10. Litoshenko, V.N., and Cipin, V.M. "Komplektatsiya energeticheskikh ustanovok morskikh plavuchih kranov" Sudostroenie 6 (1983): 22–24.
11. Lobanov, V.A. Spravochnik po tehnike osvoeniya shelfa. L.: Sudostroenie, 1983.

Ablaev Alim Rustemovich

Ph.D., Associate Professor

Sevastopol State University

299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33

Ph.: 8978–810–05–64

E–mail: ARABlaev@sevsu.ru

И.Н. МОРЕВА, Е.В. ХРОМОВ

КРИВАЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТЯГИ. ТЯГА НА ШВАРТОВАХ И СКОРОСТЬ ХОДА В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросу определения эксплуатационных характеристик гребного комплекса на произвольных режимах.

Ключевые слова: судно, двигатель, мощность, обороты, частота вращения, винтовая характеристика, дизель, скорость хода.

Введение.

Наибольшее распространение на морских транспортных судах получили пропульсивные установки с малооборотными двухтактными дизелями и прямой передачей на винт фиксированного шага.

Двигатели характеризуются: номинальной мощностью, номинальной частотой вращения, удельной массой, удельными расходами топлива и масла, габаритами и многими другими показателями.

Поле рабочих режимов двигателя указывает возможные сочетания мощности и частоты вращения. Ограничивающие это поле характеристики существенно зависят от конструктивных особенностей двигателя и завода – изготовителя. Приблизительно, сохраняя только качественный вид, для дизеля их можно построить по значениям номинальной мощности и номинальной частоты вращения (рисунок 1). Линия 1 – это ограничительная мощность при температуре выхлопных газов, соединяет начало координат и точку А с номинальными значениями мощности и частоты вращения. Линия 2 – это регуляторная характеристика, по которой снижается мощность при увеличении частоты вращения сверх номинальной. Она соединяет точку А и точку $1,1 \cdot n_{\text{ном}}$ на оси абсцисс. Линия 3 – это характеристика, ограничивающая минимальную устойчивую частоту вращения двигателя. Эта частота примерно равна $0,30 \cdot n_{\text{ном}}$. Линия 4 – это характеристика холостого хода. Она соединяет начало координат с точкой $0,2 \cdot P_{\text{с ном}}$ на регуляторной характеристике. Поле возможных режимов работы двигателя на рисунке заштриховано.

Винтовой характеристикой называется зависимость мощности, потребляемой гребным винтом в определенных условиях плавания, от его частоты вращения. Если нанести винтовую характеристику на поле рабочих режимов главного двигателя, то легко можно оценить взаимодействие гребного винта и главного двигателя. Возможны три случая (рисунок 1). Винтовая характеристика I проходит через точку А, т.е. при номинальной частоте вращения гребной винт потребляет номинальную мощность. Такой гребной винт называют соответствующим двигателю. Винтовая характеристика II относится к гребному винту с повышенной потребляемой мощностью, в этом случае двигатель будет работать в точке В, т.е. развивает пониженную мощность при пониженной частоте вращения. Такой гребной винт называют гидродинамически тяжелым. Винтовая характеристика III относится к гребному винту с пониженной потребляемой мощностью. В этом случае, если не было бы регуляторной характеристики, двигатель работал бы в точке U, т.е. развивал бы повышенную мощность при повышенной частоте вращения. За счет регуляторной характеристики двигатель работает в точке С, развивает пониженную мощность при повышенной частоте вращения. Такой гребной винт называется гидродинамически легким.

Если спроектировать гребной винт, соответствующий двигателю в момент сдаточных испытаний, то спустя небольшое время вследствие обрастания корпуса судна морскими организмами увеличится буксировочная мощность, возрастет потребляемая гребным винтом мощность, и он превратится в гидродинамически тяжелый. При этом двигатель будет работать на пониженных оборотах, развивать пониженную мощность. Поэтому при выборе главного двигателя и проектировании гребного винта необходимо обеспечить полное

использование мощности главного двигателя в междоковый период. Для этого гребной винт в момент сдаточных испытаний должен быть гидродинамически легким. Достичь этого можно, проектируя его на потребление номинальной мощности при повышенной частоте вращения т.е. в качестве расчетной принимать точку D, а не точку A. За счет регуляторной характеристики двигатель с полученным гребным винтом будет работать в точке C, т.е. в момент сдаточных испытаний он будет иметь запас по мощности 10–15 %.

Промышленность выпускает дизели с дискретным рядом мощностей и частот вращения. Выбор конкретного двигателя производится по каталогу. Его номинальная мощность должна быть близка к оптимальной мощности и увеличенной на 10–15 % для запаса на утяжеление гребного винта в процессе эксплуатации. Номинальная частота вращения двигателя должна быть близка к полученной оптимальной частоте вращения. Отличия по мощности и частоте вращения допускаются как в большую, так и в меньшую стороны.

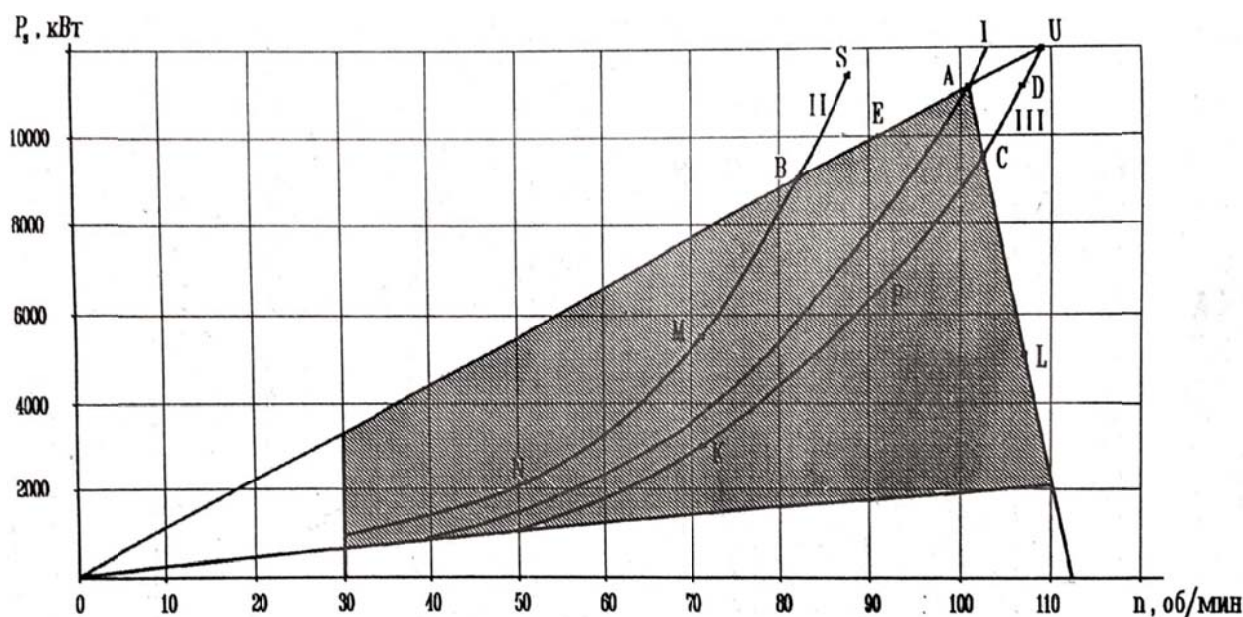


Рисунок 1 – Поле рабочих режимов главного двигателя и винтовые характеристики гребного винта

Постановка задачи.

Расчет гребного комплекса судна сводится к решению следующих задач:

- выбор типа движителя (винт открытый или винт в насадке);
- выбор серии гребных винтов, обеспечивающей наивысшее гидродинамическое качество винта при приемлемых кавитационных свойствах и прочностных характеристиках;
- определение механических характеристик оптимального двигателя (т.е. оптимальной частоты вращения гребного вала и минимальной мощности, обеспечивающих достижение заданной скорости хода);
- выбор реального гребного двигателя (т.е. его типа, марки, частоты вращения выходного вала и мощности на валу);
- оценка оптимальных геометрических характеристик гребного винта, обеспечивающего наивысшую достижимую скорость хода с выбранным двигателем при отсутствии кавитации и достаточной прочности лопастей гребного винта;
- расчет эксплуатационных характеристик гребного комплекса на произвольных режимах.

В данной работе рассматривается последняя задача. Для ее выполнения необходимо иметь параметры и характеристики гребного комплекса: класс гребного винта; материал гребного винта и его временное сопротивление; данные о типе гребного винта (ВФШ/ВРШ);

расчетный режим; серия гребных винтов; число лопастей, диаметр, шаговое и дисковое отношение; данные о сопротивлении судна в двух (или одном) режимах на скоростных испытаниях и в штормовую погоду; данные о коэффициентах взаимодействия на основном расчетном режиме; тип ГЭУ; тип и серия гребных винтов; мощность, частота вращения на фланце двигателя и коэффициент механических потерь; ординаты узловых точек ограничительной и регуляторной характеристик двигателя.

Результатом задачи является: кривая предельной тяги на ходовых режимах, кривая тяги на швартовах и данные о мощности и оборотах двигателя при работе по винтовой характеристике.

Кривая предельной тяги представляет собой зависимость развиваемой гребным комплексом тяги от скорости хода $T_E = f(v)$ при работе гребного двигателя по предельным характеристикам. Применительно к дизелю, работающему в качестве главного двигателя, в качестве предельных характеристик принимаются: верхняя ограничительная и регуляторная.

Верхняя ограничительная характеристика задается фирмой – изготовителем дизеля. Регуляторная характеристика соответствует работе двигателя по предельно допустимой частоте вращения вала.

Ограничительные характеристики принимаются по рекомендациям фирм–изготовителей двигателей.

В приближенных расчетах ограничительные характеристики обычно задаются в виде

$$P_S = \left(\frac{P_{SH}}{n_H} \right) \cdot n, \quad n = n_H \text{ при } P_S \leq P_{SH},$$

где P_{SH} – мощность на фланце двигателя;

n_H – номинальная частота вращения гребного вала.

Расчет кривой предельной тяги ведется для уже спроектированного гребного комплекса.

При использовании приближенных формул для оценки коэффициентов взаимодействия W_T, t следует иметь ввиду, что они обычно относятся к ходовым режимам, и не могут непосредственно использоваться для оценки коэффициентов взаимодействия во всем диапазоне изменения K_{DE} от нуля (швартовный режим) до значения, соответствующего свободному ходу.

В расчетах, в первом приближении, обычно считается, что

$$W_T \approx \text{const} \neq f(K_{DE}), \quad t \approx t_0 + (t_p - t_0) \frac{K_{DE}}{(K_{DE})_p},$$

где t_0 – коэффициент засасывания на швартовах (рекомендуется принимать $t_0 = 0,04$);

t_p – коэффициент засасывания на расчетном режиме, при $K_{DE} = (K_{DE})_p$;

K_{DE} – обратный коэффициент нагрузки по тяге.

При этом частота вращения вала на швартовах при выходе двигателя на работу по верхней заградительной характеристике n_1 , равная наибольшей частоте вращения винта (и соответствующая наибольшей тяге гребного комплекса) на швартовах равна

$$n_1 = \sqrt{\left(\frac{P_{DH}}{n_H} \right) \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot K_{Q0} \cdot \rho \cdot D^5 \cdot i_Q}}, \text{ в номинальном режиме } P_{DH} = \frac{P_{SH} \cdot \eta_S}{i_Q}, \text{ кВт,}$$

где K_{Q0} – коэффициент момента на швартовах,

D – диаметр гребного винта,

i_Q – коэффициент влияния неравномерности потока на момент;

η_S – коэффициент механических потерь; ρ – плотность забортной воды.

Заключение.

Эксплуатационные характеристики гребного комплекса на произвольных режимах позволяют оценить достижимую скорость хода судна с принятым гребным комплексом на любых режимах – от швартовного и хода в условиях штормового плавания до хода в легком грузу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Л. Судостроение. 1988.
2. Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М. Транспорт, 1987.
3. Компьютерный практикум по теории корабля. Текстовая часть. / Сост. Былым В.Н. – Севастополь: Изд-во СПИ, 1992. – 134 с.
4. Сопротивление движению судов и движители. Методические указания к практическим занятиям № 1–8 по дисциплине «Статика и динамика» для студентов специальности 7.100201 – «Корабли и океанотехника» всех форм обучения. Часть 2 / Сост. В.Г. Зинковский– Горбатенко. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – 56 с.

Морева Ирина Николаевна

Севастопольский
государственный университет,
г. Севастополь
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Океанотехника и
кораблестроение»
Тел.: +78692544232
E-mail: i.n.moreva@mail.ru

Хромов Егор Владимирович

Севастопольский
государственный университет,
г. Севастополь
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Энергоустановки морских судов
и сооружений»
Тел.: +78692243561
E-mail: ev.khromov@mail.ru

I.N. MOREVA, E.V. KHROMOV

CURVE OF EXTREME DRAFT. DRAFT ON MOORING AND COURSE SPEED IN STORM CONDITIONS

Abstract. *The present article is devoted to a question of definition of operational characteristics of a rowing complex on any modes.*

Keywords: *ship, engine, power, turns, rotation frequency, screw characteristic, diesel, course speed.*

BIBLIOGRAPHY

1. Artyushkov L. S., Achkinadze A.Sh., Rusetsky A And. Ship propellers. L. Shipbuilding. 1988.
2. Katsman F.M. Operation of a propulsive complex of the sea vessel. M. Transport, 1987.
3. Computer workshop on the theory of the ship. Text part. / Bylym V.N. – Sevastopol: SHI publishing house, 1992. – 134 p.
4. Resistance to the movement of vessels and propellers. Methodical instructions to a practical training No. 1–8 on discipline «A statics and dynamics» for students of specialty 7.100201 – «The ships and an ocean engineering» all forms of education. Part 2 / Sost. V.G. Zinkovskiy–Gorbatenko.– Sevastopol: Publishing house of SEVNTU, 2005. – 56 p.

Moreva Irina Nikolaevna

Sevastopol state University,
Sevastopol
Candidate of technical Sciences,
Associate Professor the Department
«Ocean Engineering and Shipbuilding»
Ph: + 78692544232
E-mail: i.n.moreva@mail.ru

Khromov Egor Vladimirovich

Sevastopol State University,
Sevastopol
Candidate of technical Sciences,
Associate Professor of the Department
«Ship power plants and structures»
Ph. +78692243561
E-mail: ev.khromov@mail.ru

Е.В. ГЕОРГИЕВСКАЯ

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОТУРБИН С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЙ

Аннотация. Деградационные отказы оборудования, связанные с естественными процессами старения и изнашивания, возникают, когда его элементы приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. Чтобы не допустить преждевременного отказа оборудования и избежать аварийного останова, необходимо обоснованно определять его индивидуальный ресурс учетом действующих механизмов деградационных отказов, фактических эксплуатационных условий, принятой системы технического обслуживания и ремонта. Корректная оценка долговечности позволяет своевременно запланировать необходимую реконструкцию, модернизацию, замену исчерпавшего ресурс оборудования или внести коррективы в график плановых ремонтов.

Несмотря на длительный положительный опыт эксплуатации до сих пор не существует нормативно закреплённых методик расчета долговечности гидротурбин, а уникальность гидроагрегатов и особенности условий их работы не позволяют накопить необходимую для достоверных оценок статистическую базу. Представленный в статье подход, используя методы механики разрушений, дает возможность построить индивидуальный долгосрочный прогноз развития опасных дефектов с учетом всех конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей.

Ключевые слова: гидротурбина, механика разрушения, трещина, ресурс, надежность.

Введение

Гидротурбины (ГТ) зарекомендовали себя как надежное и стабильно работающее оборудование, поэтому на протяжении многих лет они не рассматривались как потенциальный источник серьезной опасности, несмотря на периодически случающиеся инциденты [1–4]. В результате вопросам надежности, безопасности и ресурса ГТ, важной составляющей которых является оценка долговечности, уделялось мало внимания.

Для России поворотным моментом стала произошедшая в 2009 г. авария на Саяно–Шушенской ГЭС. После нее было разработано большое количество новых отраслевых нормативных документов, регулирующих различные аспекты жизненного цикла ГТ и направленных на повышение безопасности работы гидрооборудования.

Однако до сих пор отсутствует нормативная методика оценки долговечности ГТ на стадии эксплуатации с учетом режимных параметров и индивидуальных особенностей. В современных условиях это является весьма актуальной проблемой, особенно для отработавшего длительный срок оборудования.

Особенности условий эксплуатации

Гидроагрегаты (ГА), в том числе мощные, как высокоманевренное оборудование, часто используются для покрытия пиков потребления энергии и поддержания стабильности энергосистемы, что приводит к частому изменению режимов их работы. Режимные факторы являются преобладающими при оценке долговечности и ресурса ГТ, определяя частоту воздействия и уровень нагруженности элементов [5–7].

Уровень динамических напряжений может существенно отличаться на различных режимах, изменяясь от нескольких процентов (по отношению к статической составляющей) на оптимальном по КПД режиме до десятков процентов на непроектных режимах вдали от номинальной мощности. Рисунок 1 демонстрирует характерный относительный уровень динамических напряжений на проектных и непроектных режимах по результатам обработки экспериментальных исследований, проведенных специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» на ряде высоконапорных мощных радиально–осевых агрегатах [8].

К непроектным традиционно относятся нестационарные режимы, на которых на стадии проектирования не предполагалась длительная работа (режимы малой и средней мощности, форсированный по мощности режим, холостой ход), а также переходные режимы, в том числе пуски–остановы ГА. Как видно из представленных данных, на режимах средней мощности (35–50%) наблюдается ярко выраженный всплеск динамических напряжений.

Повышенные динамические напряжения приводят к быстрому накоплению повреждений в материале, преждевременному образованию трещин в несущих элементах и, в конечном итоге, разрушению ГТ вследствие деградационного отказа. Однако не все трещины одинаково опасны с точки зрения обеспечения надежности работы оборудования.

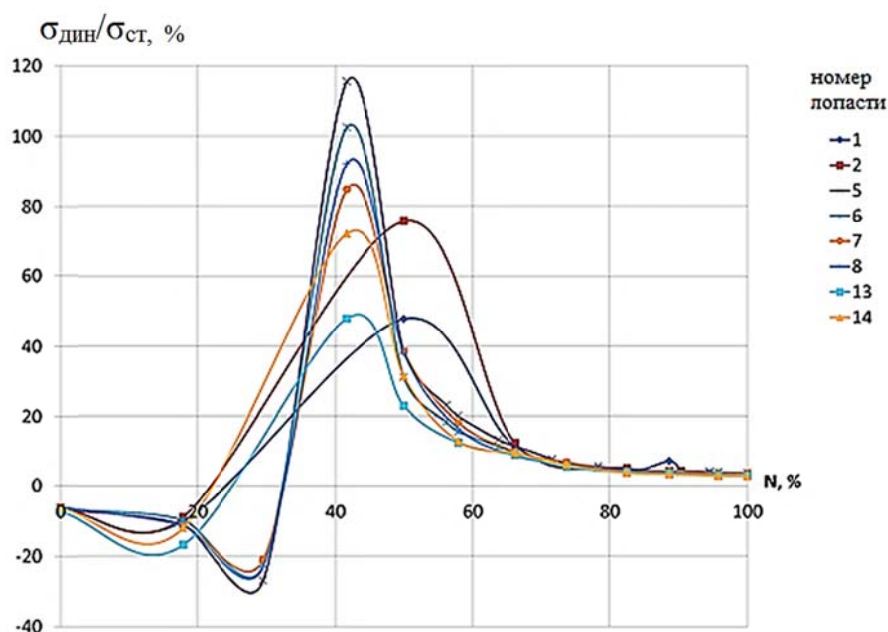
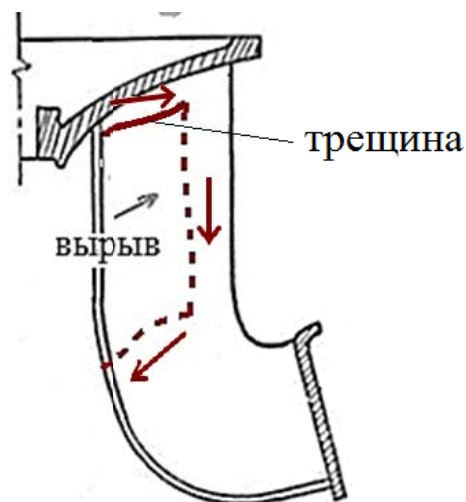


Рисунок 1 – Относительные динамические напряжения в рабочем колесе ГТ

Например, некоторые зарубежные специалисты считают, что даже протяженные сквозные трещины (рисунок 2, а) в зоне сопряжения лопасти со ступицей рабочего колеса (РК) радиально-осевой гидротурбины вследствие высокой жесткости конструкции не оказывают существенного влияния на безопасность работы ГТ и сказываются только на стоимости и длительности связанного с их устранением ремонта [9]. Такие трещины часто обнаруживаются только в периоды плановых остановов ГА, т.к. они практически не влияют на контролируемые в ходе эксплуатации параметры турбины.



а



б

Рисунок 2 – Сценарии развития трещины в рабочих колесах ГТ:

а) сквозная трещина в лопасти РК [9]

б) изменение направления развития трещины

По мнению автора, представленный на рисунке 2, а сценарий развития безопасной трещины не всегда реализуется на практике, т.к. в процессе роста трещины происходит перераспределение напряжений в области ее вершины. В результате трещина может поменять направление, причем неоднократно, что приведет к вырыву фрагмента лопасти, как схематично показано на рисунке 2б, где стрелки показывают направление роста трещины. Оторванный фрагмент, попав в узкие зазоры между вращающейся и неподвижной частями агрегата может вызвать серьезные повреждения агрегата вплоть до аварийного останова.

Критерии опасности трещин

Для практических целей важно адекватно прогнозировать появление опасных усталостных трещин в несущих элементах ГТ (рабочие колеса, валы, ответственный крепеж) в условиях реальной эксплуатации. Процесс зарождения и развития трещины в элементах ГТ можно условно разделить на два этапа, отличающихся механизмом развития трещины.

Первый этап – зарождение и стадия медленного роста трещины, когда основной движущей силой являются низкочастотные (НЧ) нагрузки, характеризующиеся большими амплитудами и сопровождающие работу ГТ на непроектных режимах (см. рисунок 1). К низкочастотным обычно относят нагрузки до двойной оборотной частоты включительно. Под воздействием НЧ-нагрузок исходные дефекты материала (пустоты, включения, неоднородность в зоне сплавления и т.п.) постепенно развиваются в макротрещины. Далее происходит медленный стабильный рост трещин.

Этот этап может продолжаться несколько лет, иногда несколько десятков лет. Такие трещины можно отнести к безопасным, т.е. не оказывающим существенного влияния на надежность и безопасность работы ГА. На этом этапе высокочастотные (ВЧ) нагрузки практически не воздействуют на кинетику трещин, поскольку и дефекты и амплитуды напряжений от ВЧ-нагрузок еще слишком малы. Развитие трещин по этому механизму происходит вплоть до некоторой пороговой длины трещины ℓ_{th} , определяемой характеристиками материала, конструктивными особенностями и условиями нагружения.

На втором этапе определяющими становятся уже ВЧ-нагрузки, которые сопровождают работу ГТ на всех режимах эксплуатации, включая близкие к оптимуму режимы. Высокочастотные нагрузки в гидротурбинах возникают в результате прохождения потока воды через решетки профилей колонн статора, лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса.

Обычно на режимах большой мощности, близким к проектным значениям, амплитуда ВЧ-нагрузок незначительна. Например, в наиболее напряженной зоне лопастной системы рабочих колес (при отсутствии трещин) соответствующие динамические напряжения не превышают нескольких мегапаскалей. Но поскольку в материале уже присутствуют макротрещины пороговой длины, образовавшиеся на первом этапе эксплуатации, то даже малые по амплитуде нагрузки оказывают влияние на скорость роста трещины.

За счет большой частоты воздействия (десятки и сотни Герц) и высокого уровня локальных напряжений в области вершины трещин ВЧ-нагрузки быстро приводят к разрушению конструкции. Очевидно, что такие трещины являются опасными и должны учитываться при оценке надежности и безопасности эксплуатации ГТ.

Таким образом, в качестве порогового значения, разделяющего опасные и неопасные трещины, можно принять длину трещины, соответствующую моменту качественного изменения механизма роста трещины (рисунок 3): кривая «НЧ» соответствует развитию трещины только под действием низкочастотных нагрузок, а кривая «ВЧ» – под действием совокупности низко- и высокочастотных нагрузок.

Прогнозирование развития трещин в гидротурбинах

С учетом современных вычислительных и диагностических возможностей прогнозирование роста трещин в элементах гидротурбин целесообразно проводить расчетно-экспериментальными методами, в основе которых заложены принципы линейной механики разрушений.

Предполагается, что в процессе эксплуатации в элементах ГТ накапливаются усталостные повреждения, в том числе микро- и даже макротрещины небольшого размера, которые не удается обнаружить традиционными методами неразрушающего контроля (НК) металла в рамках штатных диагностических обследований. С учетом особенностей конструкции, больших габаритных размеров деталей и узлов ГТ, ограниченной чувствительности методов НК, сложностью подготовки поверхности элементов для проведения контроля обнаружение трещин на ранних стадиях их развития оказывается весьма затруднительным. В результате в эксплуатацию, как правило, допускается оборудование с необнаруженными, но фактически существующими трещинами протяженностью минимум несколько миллиметров.

Локальные напряжения в зоне вершины трещины определяются на базе конечно-элементного расчета с использованием 3D-модели ГТ. Основной сложностью является достоверное определение величин динамической составляющей нагрузки во всем диапазоне режимов эксплуатации, что требует разработки специальных инженерных методов [10].

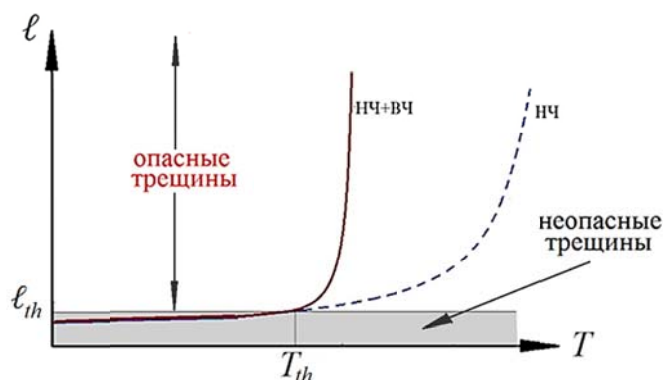


Рисунок 3 – Критерий опасности трещин

В качестве исходных дефектов задаются либо обнаруженные повреждения с учетом их фактической геометрии, либо расчетные трещины, размер которых определяется, прежде всего, чувствительностью примененных методов НК и доступностью мест контроля. Размер и расположение расчетных дефектов выбираются на основании опыта диагностирования гидротурбин с учетом особенностей эксплуатации оборудования на конкретной ГЭС. Такой подход может быть реализован в широко используемых современных расчетных программных комплексах, например, Ansys.

В результате расчета определяется коэффициент интенсивности напряжений (КИН), который в совокупности с характеристиками материала определяет скорость роста трещины $d\ell/dN$, где N – число циклов нагружения. Если размах КИН не превышает порогового значения K_{th} , то трещина не развивается. При достижении КИН значения K_C (вязкость разрушения) происходит разрушение. Параметры K_{th} и K_C являются характеризующими трещиностойкости параметрами материала, которые определяются экспериментально.

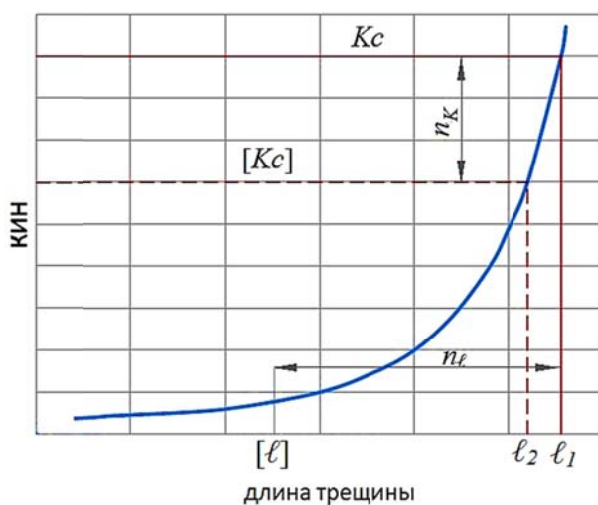


Рисунок 4 – Определение критических размеров трещины

Таким образом, возможность подрастания трещины под действием ВЧ-нагрузок может быть определена из неравенства:

$$\Delta K^{B\chi} \geq K_{th}.$$

Момент разрушения определяется по результатам моделирования поэтапного подрастания трещины. С учетом высокого уровня неопределенности внешних нагрузок, сложности диагностирования трещин на ранних стадиях развития и неточности расчетных процедур рекомендуется использовать следующие коэффициенты запаса:

- по длине трещины $n_\ell = 2,0-2,5$;
- по величине вязкости разрушения $n_K = 1,5$.

На рисунке 4 представлена схема определения допускаемой длины трещины, при достижении которой необходимо прекратить эксплуатацию поврежденного элемента в связи с повышенным риском его разрушения.

Алгоритм оценки долговечности

С учетом выше изложенных соображений алгоритм оценки долговечности можно представить в следующем виде.

1. Определение характеристик трещиностойкости материала K_c и K_{th} .
2. Разработка конечно-элементных 3D-моделей рассматриваемого элемента ГТ, объединяющих геометрические параметры, условия сопряжения и закрепления элементов, параметры нагружения на всех режимах эксплуатации, свойства материала.
3. Расчетное моделирование трещин с учетом опыта эксплуатации и диагностирования.
4. Определение напряженного состояния рассматриваемого элемента, в том числе локального в зоне вершины трещины.
5. Построение расчетной зависимости размаха КИН от длины трещины $\Delta K(\ell)$ от действия ВЧ-нагрузок.
6. Определение длины трещины, соответствующей пороговому значению КИН:

$$\ell_{th} = \ell(K_{th}).$$

Уровень чувствительности применяемых для контроля методов неразрушающего контроля должен быть таким, чтобы трещины, имеющие длину ℓ_{th} , уверенно распознавались.

7. Определение допускаемой длины трещины из условия трещиностойкости:

$$\begin{aligned} [\ell] &= \min\{\ell_1/n_\ell; \ell_2\}, \\ \ell_1 &= \ell(K_c); \\ \ell_2 &= \ell([K_c]), \\ [K_c] &= K_c/n_K. \end{aligned}$$

8. Определение допускаемого количества циклов $[N]$ или допускаемого времени эксплуатации $[T]$ до достижения допускаемой длины трещины:

$$[N] = N([\ell]) \text{ или } [T] = T([\ell]).$$

Заключение

Предложенный подход к расчетной оценке долговечности позволяет учитывать все необходимые индивидуальные особенности гидротурбины, влияющие на ее ресурс, не предъявляет излишних требований к вычислительной технике, времени и стоимости расчетных процедур, а также дает возможность с необходимой инженерной точностью оценить ресурсные характеристики и запланировать своевременный ремонт или замену изношенных элементов [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Luo Y., Wang Z. A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines // Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016), p. 1–14. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.025.
2. Chirag Trivedi, Bhupendra Gandhi, Cervantes Michel. Effect of transients on Francis turbine runner life: a review // Journal of Hydraulic Research. 2013. Vol. 51–Issue 2. Pp. 112–132. doi: 10.1080/00221686.2012.732971.
3. Георгиевская Е. Ресурс гидротурбин – гарантия надежности и безопасности эксплуатации ГЭС. Аналитический обзор литературы. LAP Lambert Academic Publishing. 2018. 157 p. ISBN 978–613–6–95791–3. (rus).
4. Ming Zhang, Yan Liu, Weiqiang Wang, Pengfei Wang, Jianfeng Li The fatigue of impellers and blades (Review Article) // Engineering Failure Analysis, Volume 62, April 2016, Pages 208–231 doi:10.1016/j.engfailanal.2016.02.001.
5. Георгиевская Е.В. Влияние переходных процессов на надежность и ресурс мощных турбо- и гидроагрегатов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 3 (323). С. 22–30.
6. Zouhar J., Obrovsky J., Feilhauer M., Skotak A. Case Study and Numerical Analysis of Vibration and Runner Cracks for the Lipno I Hydroelectric Project // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 49. P. 072011. doi:10.1088/1755–1315/49/7/072011.
7. Георгиевская Е.В. Динамика гидротурбин в условиях расширенного диапазона эксплуатационных режимов // «Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы». Труды четвертой научно-технической конференции, 2017. [http://imash.ru/netcat_files/file/Kaplunov/BCE%20ТЕЗИСЫ%20\(испр\).pdf](http://imash.ru/netcat_files/file/Kaplunov/BCE%20ТЕЗИСЫ%20(испр).pdf) (дата обращения 24.01.2018).
8. Панов К.А. Прочностные испытания лопастей радиально-осевых турбин Усть-Илимской ГЭС // В сб.: Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Научные труды Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2016. С. 86–96.
9. D. Frunzaverdel, S. Muntean, G. Mărginean, V. Câmpiani, L. Marşavina, R. Terzi, V. Şerban. Failure analysis of a Francis turbine runner // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2010. Vol. 12. P. 012115. doi:10.1088/1755–1315/12/1/012115.
10. Георгиевская Е.В. Энергетический подход к оценке динамических напряжений в гидротурбинах // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. № 4. С. 88–97. doi 10.18721/JEST.230408.

11. Георгиевская Е.В. Планово-предупредительные и восстановительные ремонты как инструмент управления ресурсом гидроагрегатов // Гидротехника. 2018. №1 (50). С. 48–52.

Георгиевская Евгения Викторовна

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург

Кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией прочности турбин ТЭС, АЭС и ГЭС

Адрес: Россия, 191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6

Тел. +7(812)578–87–24, +7(921)971–64–43

E-mail: GeorgievskayaEV@ckti.ru, resurs24@ckti.ru

E.V. GEORGIEVSKAIA

ESTIMATION OF THE HYDRAULIC TURBINES DURABILITY FROM THE FRACTURE MECHANICS POSITIONS

Abstract. *Degradation failures of equipment associated with natural aging and wear occur when its elements are approaching the limit of physical wear conditions. In order to prevent premature destruction of equipment and to avoid emergency shutdown, it is necessary to determine its individual lifetime with considering the existing mechanisms of degradation failures, actual operating conditions, the adopted system of maintenance and repair. The correct durability assessment allows to plan the necessary reconstruction, modernization, replacement of the exhausted equipment or to make adjustments to the schedule of planned repairs.*

Despite the long-term positive experience of operation, there are still no standard methods for calculating the durability of hydraulic turbines, and the uniqueness of hydraulic units and the peculiarities of their working conditions do not allow to accumulate the necessary statistical base for reliable estimates. The approach presented in the article, using the methods of fracture mechanics, makes it possible to build an individual long-term forecast of the development of dangerous defects taking into account all design, technological and operational features.

Keywords: *hydraulic turbine, lifetime, fracture mechanics, crack.*

BIBLIOGRAPHY

1. Liu X., Luo Y., Wang Z. A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines // Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016). p. 1–14. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.025.
2. Chirag Trivedi, Bupendra Gandhi, Cervantes Michel. Effect of transients on Francis turbine runner life: a review // Journal of Hydraulic Research. 2013. Vol. 51–Issue 2. Pp. 112–132. doi: 10.1080/00221686.2012.732971.
3. Georgievskaya Ye. Resurs gidroturbin – garantia nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii GES. Analiticheskiy obzor literatury. LAP Lambert Academic Publishing. 2018. 157 p. ISBN 978–613–6–95791–3. (rus).
4. Ming Zhang, Yan Liu, Weiqiang Wang, Pengfei Wang, Jianfeng Li The fatigue of impellers and blades (Review Article) // Engineering Failure Analysis, Volume 62, April 2016, Pages 208–231 doi:10.1016/j.engfailanal.2016.02.001.
5. Georgievskaya Ye.V. Vlivanie perekhodnykh protsessov na nadezhnost i resurs moshchnykh turbo- i gidroagregatov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2017. № 3 (323). S. 22–30.
6. Zouhar J., Obrovsky J., Feilhauer M., Skotak A. Case Study and Numerical Analysis of Vibration and Runner Cracks for the Lipno I Hydroelectric Project // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 49. P. 072011. doi:10.1088/1755–1315/49/7/072011.
7. Georgievskaya Ye.V. Dinamika gidroturbin v usloviyakh rasshirennoy diapazona ekspluatatsionnykh rezhimov // «Dinamika i prochnost konstruktivnykh aerogidrouprugikh sistem. Chislennyye metody». Trudy chetvertoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 2017. [http://imash.ru/netcat_files/file/Kaplunov/VSE%20TEZISY%20\(ispr\).pdf](http://imash.ru/netcat_files/file/Kaplunov/VSE%20TEZISY%20(ispr).pdf) (data obrashcheniya 24.01.2018).
8. Panov K.A. Prochnostnyye ispytaniya lopastey radialno-osevykh turbin Ust-Ilimskoy GES // V sb.: Gidravlicheskiye mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmootomatika. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya. Nauchnyye trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg, 2016. S. 86–96.
9. D. Frunzaverdel, S. Muntean, G. Mărginean, V. Câmpian, L. Marsavina, R. Terzi, V. Serban. Failure analysis of a Francis turbine runner // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2010. Vol. 12. P. 012115. doi:10.1088/1755–1315/12/1/012115.
10. Georgievskaya Ye.V. Energeticheskiy podkhod k otsenke dinamicheskikh napravlennykh v gidroturbinakh // Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2017. № 4. S. 88–97. doi 10.18721/JEST.230408.
11. Georgievskaya Ye.V. Planovo-predupreditelnyye i vosstanovitelnyye remonty kak instrument upravleniya resursom gidroagregatov // Gidrotekhnika. 2018. №1 (50). S. 48–52.

Georgievskaya Evgenia Viktorovna

JSC «NPO CKTI»

Ph.D., Head of Turbine Strength Test Laboratory for the Thermal, Nuclear and Hydro Power Plants

3/6, Atamanskaya St., St. Petersburg, 191167

Tel. +7(812)578–87–24, +7(921)971–64–43

E-mail: GeorgievskayaEV@ckti.ru, resurs24@ckti.ru

А.Л. ВОРОНЦОВ, Е.О. РЕЩИКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Аннотация. С помощью теории пластического течения по методу А.Л. Воронцова получены формулы, необходимые для расчёта напряжений и силовых параметров процесса внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки.

Ключевые слова: объёмная штамповка, выдавливание, напряжения, деформации, трубная заготовка.

Введение

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что трубные изделия с цилиндрическим выступом в полости широко используются в промышленности. Они применяются, например, для производства элементов гидро- и пневмосистем высокого давления: гидравлических фильтров маслопроводов с дросселем и обратным клапаном (рисунок 1, а, [1]), пневмодросселей (рисунок 1, б, [2]), гидродросселей (рисунок 1, в, [2]). Крупносерийным производством подобных изделий занимаются не только наши, но и, например, немецкие фирмы (рисунок 1, г).

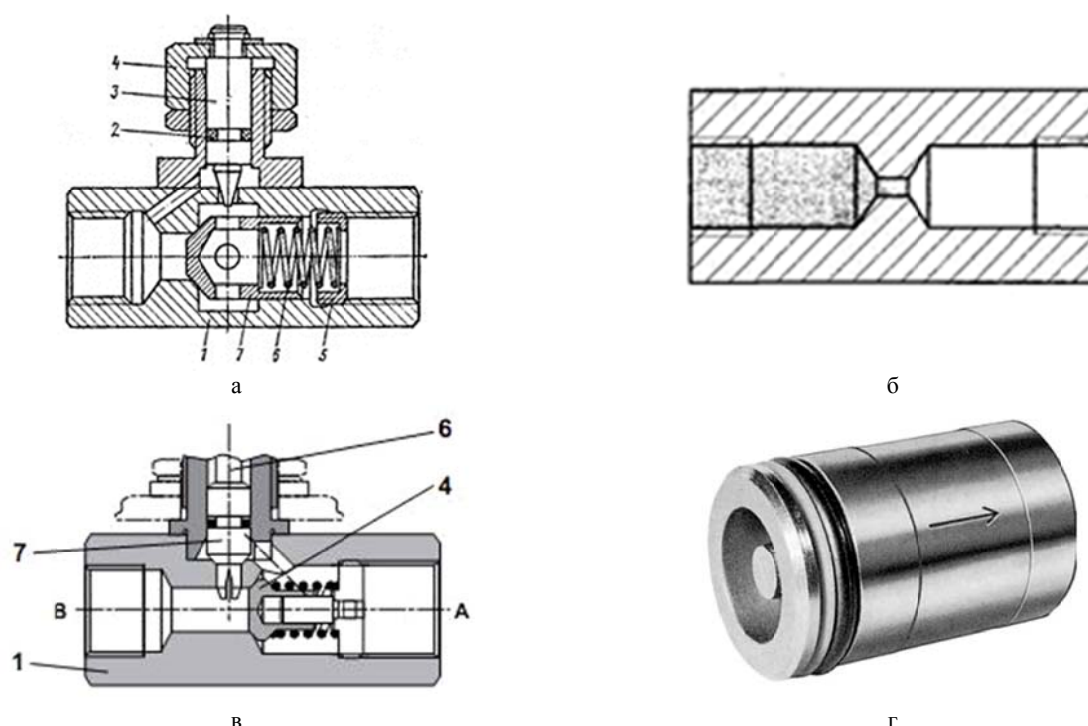


Рисунок 1 – Примеры трубных изделий с цилиндрическим выступом в полости:
 а – гидравлический фильтр маслопровода с дросселем и обратным клапаном; б – пневмодроссель;
 в – гидродроссель DRV; г – дроссельный патрон с обратным клапаном германской фирмы «ANG»

Сделанный нами анализ справочной литературы показал, что подобные изделия в настоящее время в подавляющем большинстве случаев получают резанием из сплошных заготовок. Это, соответственно, предопределяет в производстве таких изделий присущие резанию недостатки: низкий коэффициент использования металла, низкую производительность, низкую стойкость инструмента, малое упрочнение, перерезание волокон металла.

В настоящее время остро стоит задача снижения энергетических затрат и расхода металла, а также повышения производительности и качества при производстве подобных изделий, которая, на наш взгляд, может быть успешно решена путём применения радиального выдавливания трубной заготовки.

Такое выдавливание показано в общих принципиальных таблицах справочников [8, с. 91, таблица 1, п. 13; 9, с. 10]. Однако никаких описаний экспериментальных исследований такого выдавливания или же теоретических формул для расчёта его основных технологических параметров в данных справочниках не приведено. Отсутствуют исследования радиального выдавливания внутреннего выступа и в книгах [4–7, 11, 12].

Наиболее близким аналогом является радиальное выдавливание наружного выступа, подробно изученное экспериментально и теоретически в работах [4, 7]. Но формулы, полученные для проектирования этого процесса непригодны для расчётов радиального выдавливания трубных изделий с внутренним выступом.

Поэтому проведение углублённого теоретического и экспериментального исследования радиального выдавливания внутреннего выступа является весьма актуальным.

В расчетной схеме процесса (рисунок 2) используется цилиндрическая система координат ρ , θ , z , а очаг пластической деформации представлен в виде двух областей: области 1, соответствующей образуемому внутреннему выступу, и примыкающей к матрице области 2, с которой взаимодействуют жёсткие области 3 и 4.

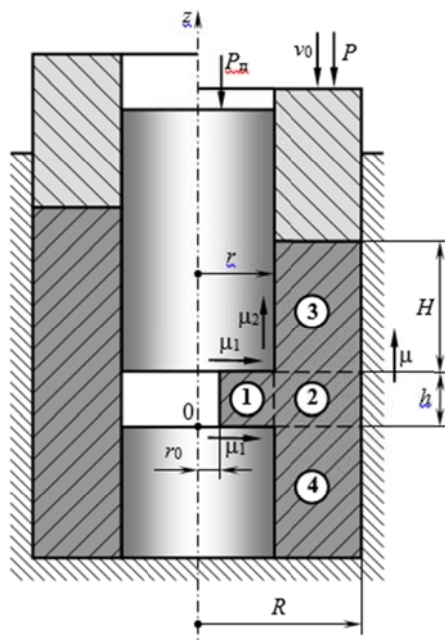


Рисунок 2 – Расчетная схема радиального выдавливания трубных изделий с внутренним выступом

В данной статье рассмотрим определение кинематического и напряжённого состояний выдавливаемой заготовки.

Теоретическое определение кинематического, напряжённого и деформированного состояний заготовки выполняем по методу пластического течения А.Л. Воронцова [3–6], который ориентирован на гарантированное получение верхней оценки и, соответственно, опирается на кинематически возможные скорости течения, что очень важно в связи с указанным в работе [11] несовершенством классической теории пластичности, занижающим оценку силовых параметров.

Очевидно, что вследствие симметрии все характеристики пластической деформации (скорости, деформации и напряжения) не зависят от окружной (тангенциальной) координаты θ .

При рассмотрении осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат ρ , θ , z полная система уравнений теории пластичности включает в себя [13]: уравнения равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_p}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{pz}}{\partial z} + \frac{\sigma_p - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zp}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{zp}}{\rho} = 0; \end{array} \right. \quad (2)$$

систему уравнений Леви–Мизеса, связывающих напряжения и скорости деформаций

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_p, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_\theta = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_\theta, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z = \sigma + \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \xi_z, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{pz} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\xi_i} \eta_{pz}; \end{array} \right. \quad (6)$$

интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_p - \xi_\theta)^2 + (\xi_\theta - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_p)^2 + \frac{3}{2} \eta_{pz}^2}; \quad (7)$$

условие несжимаемости (условие постоянства объёма)

$$\xi_p + \xi_\theta + \xi_z = 0; \quad (8)$$

кинематические уравнения Коши, связывающие скорости деформации со скоростями течения

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_p = \frac{\partial v_p}{\partial \rho}, \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_\theta = \frac{v_p}{\rho}, \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{pz} = \frac{\partial v_p}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Таким образом, осесимметричная задача идеальной пластичности включает 12 уравнений, в которые входит 12 неизвестных величин: напряжения σ_p , σ_θ , σ_z , τ_{pz} среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление) σ , скорости деформаций ξ_p , ξ_θ , ξ_z , η_{pz} , интенсивность скоростей деформаций ξ_i , скорости перемещения материальных точек среды (скорости течения) v_p , v_z .

Под задачей идеальной пластичности понимается задача, в которой используется модель идеального жёсткопластического материала, т.е. материала, у которого отсутствует упрочнение.

Математический аппарат для решения задач теории пластического течения физических тел, обладающих свойствами деформационного упрочнения, является

существенно более сложным. В этом случае к полной системе вышеприведённых 12 уравнений необходимо добавить ещё два уравнения [14]:

$$\frac{\partial e_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial e_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial e_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial e_i}{\partial z} = \xi_i, \quad (13)$$

$$\sigma_i = \Phi(e_i), \quad (14)$$

где e_i – накопленная деформация (степень деформации) в рассматриваемой точке тела,

$\Phi(e_i)$ – функция, описывающая зависимость напряжения текучести σ_s конкретного материала от накопленной деформации и считающаяся вполне определённой из опытов на простое растяжение или сжатие (напомним, что по условию пластичности интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_s$ [15]).

В полную систему уравнений осесимметричной задачи не входят ни известное выражение для гидростатического давления, ни условие пластичности Губера–Мизеса поскольку в работе [15] доказано, что при использовании уравнений Леви–Мизеса (3)–(6) они удовлетворяются автоматически.

Сначала решим задачу идеальной пластичности. Упрочнение учитываем средней по очагу пластической деформации величиной напряжения текучести σ_s . Далее для обобщения используются относительные величины напряжений, отнесённые к указанной величине σ_s . Силы контактного трения определяются по закону Зибеля как $\tau_k = \mu \beta \sigma_s$, где μ – коэффициент трения по напряжению текучести, а β – коэффициент Лоде [11].

Решая последовательно представленную систему уравнений определим: касательное напряжение в области 1:

$$\tau_{\rho z} = \beta \mu_1 \frac{r_0}{h} \cdot \frac{z}{\rho}. \quad (15)$$

радиальное напряжение:

$$\sigma_\rho = -\beta \left(\mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \ln \frac{\rho}{r_0}. \quad (16)$$

осевое напряжение:

$$\sigma_z = -\beta \left[1 + \left(\mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \ln \frac{\rho}{r_0} \right]. \quad (17)$$

Знание этого напряжения необходимо для расчёта величины распорной силы P_p , действующей на оправку при затекании металла в зазор между ними:

$$\begin{aligned} P_p &= 2\pi \int_{r_0}^r |\sigma_z| \rho d\rho = 2\pi \int_{r_0}^r \beta \left[1 + \left(\mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \ln \frac{\rho}{r_0} \right] \rho d\rho = \\ &= \pi \beta \left[0,5 \left(1 - \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) (r^2 - r_0^2) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) r^2 \ln \frac{r}{r_0} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Очевидно, что сила прижима P_n , необходимая для удержания верхней оправки в заданном положении, может быть меньше распорной силы P_p вследствие того, что ей помогает сила трения, действующая на оправку со стороны области 3:

$$P_n = P_p - 2\pi r_n \beta \mu_2 = \pi \beta \left[0,5 \left(1 - \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) (r^2 - r_0^2) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) r^2 \ln \frac{r}{r_0} - 2r_n \mu_2 \right]. \quad (19)$$

Теперь рассмотрим область 2.

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = -\beta \left\{ \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \left[(h-z)z - 0,5(\rho^2 - r^2) + R^2 \ln \frac{\rho}{r} \right] + \frac{R^2}{3\beta^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} \right\}. \quad (20)$$

Осевое напряжение:

$$\sigma_z = -\beta \left\{ 1 + \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \left[(h-z)z - 0,5(\rho^2 - r^2) + R^2 \ln \frac{\rho}{r} \right] + \frac{R^2}{3\beta^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} \right\}. \quad (21)$$

Сила, необходимая для осуществления пластической деформации собственно радиальным выдавливанием

$$P_1 = 2\pi \int_r^R |\sigma_z|_{z=h} \rho d\rho = \pi(R^2 - r^2) \beta \left[1 + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} + \frac{R^2}{3\beta^2 r^2} + \frac{r \left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75R^4 + R^2 r^2 - 0,25r^4 \right)}{h(R^2 - r^2)^2} - \frac{2R^2}{3\beta^2 (R^2 - r^2)} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (22)$$

Сила, затрачиваемая на преодоление сил контактного трения при проталкивании недеформируемой части заготовки 3 в контейнере, определяется выражением:

$$P_2 = 2\pi \beta H (\mu R + \mu_2 r). \quad (23)$$

Полная сила радиального выдавливания:

$$P = P_1 + P_2 = \pi(R^2 - r^2) \beta \left[1 + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} + \frac{R^2}{3\beta^2 r^2} + 2H \frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + \frac{r \left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75R^4 + R^2 r^2 - 0,25r^4 \right)}{h(R^2 - r^2)^2} - \frac{2R^2}{3\beta^2 (R^2 - r^2)} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (24)$$

С учётом равенства (24) относительная удельная сила радиального выдавливания определена выражением

$$q = \frac{P}{\pi(R^2 - r^2)} = \beta \left[1 + \left(1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \ln \frac{r}{r_0} + \frac{R^2}{3\beta^2 r^2} + 2H \frac{\mu R + \mu_2 r}{R^2 - r^2} + \frac{r \left(R^4 \ln \frac{R}{r} - 0,75R^4 + R^2 r^2 - 0,25r^4 \right)}{h(R^2 - r^2)^2} - \frac{2R^2}{3\beta^2 (R^2 - r^2)} \ln \frac{R}{r} \right]. \quad (25)$$

Таким образом получены формулы для технологических расчетов полной и удельной сил радиального выдавливания полых цилиндрических изделий с внутренним выступом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. М.: Машиностроение. 1982. 423 с.
2. Лепешкин А. В., Михайлин А. А., Шейпак А. А. Гидравлика и гидропневмопривод. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. М.: МГИУ. 2003. 352 с.
3. Воронцов А. Л. Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение. 2004. 721 с.
4. Воронцов А. Л. Теория малоотходной штамповки. М.: Машиностроение. 2005. 859 с.
5. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. Том 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 396 с.
6. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. Том 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. 441 с.
7. Холодная объёмная штамповка. Справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. М.: Машиностроение. 1973. 496 с.
8. Ковка и штамповка. Справочник под ред. Е. И. Семёнова. Том 3. Холодная объёмная штамповка. Штамповка металлических порошков / Е. Г. Белков, Г. В. Бнатын, А. Л. Воронцов и др. М.: Машиностроение. 2010. 352 с.
9. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение. 1983. 200 с.
10. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.
11. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 3. Непарность касательных напряжений // Производство проката. 2010. № 5. С. 2–8.
12. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Напряжённое и кинематическое состояния при осадке цилиндрической заготовки с трением на торцах. Метод баланса работ. Часть 1 // Производство проката. 2010. № 9. С. 2–13.
13. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 6. Особенности приложения теории пластичности к анализу операций обработки металлов давлением // Производство проката. 2010. № 8. С. 2–12.
14. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 9. Степень деформации и накопленная деформация. Деформированное состояние заготовки и учёт упрочнения при осадке и вдавливании в полупространство. Часть 1 // Производство проката. 2011. № 2. С. 41–48.
15. Воронцов А. Л. Некоторые проблемы механики деформируемого твёрдого тела и её технологических приложений. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Напряжённое и кинематическое состояния при осадке цилиндрической заготовки с трением на торцах. Метод баланса работ. Часть 2 // Производство проката. 2010. № 10. С. 2–14.

Воронцов Андрей Львович

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: avorontsov55@mail.ru

Рещиков Егор Олегович

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
магистрант 1-го курса, кафедра «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-17-71
E-mail: egorreschikov@rambler.ru

A.L. VORONTSOV, E.O. RESCHIKOV

KINEMATIC AND STRESS SYSTEM DETERMINATION OF PIPE WORKPIECE DURING RADIAL PRESSING

Abstract. *With help of plastic flow theory according to A. L. Vorontsov method the equations needed for stress and force parameters of pipe workpiece inside radial pressing is determined.*

Keywords: *die forging, pressing, stress, deformations, pipe workpiece.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. / T. M. Bashta, S. S. Rudnev, B. B. Nekrasov i dr. M.: Mashinostroenie. 1982. 423 s.
2. Lepeshkin A. V., Mihajlin A. A., Shejpak A. A. Gidravlika i gidropnevmoprivod. CH. 2. Gidravlicheskie mashiny i gidropnevmoprivod. M.: MGIU. 2003. 352 s.
3. Voroncov A. L. Teoriya shtampovki vydavlivaniem. M.: Mashinostroenie. 2004. 721 s.
4. Voroncov A. L. Teoriya maloethodnoj shtampovki. M.: Mashinostroenie. 2005. 859 s.
5. Voroncov A. L. Teoriya i raschety processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Tom 1. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana. 2014. 396 s.
6. Voroncov A. L. Teoriya i raschety processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Tom 2. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana. 2014. 441 s.
7. Holodnaya ob»yomnaya shtampovka. Spravochnik / Pod red. G. A. Navrockogo. M.: Mashinostroenie. 1973. 496 s.
8. Kovka i shtampovka. Spravochnik pod red. E. I. Semyonova. Tom 3. Holodnaya ob»yomnaya shtampovka. Shtampovka metallicheskih poroshkov / E. G. Belkov, G. V. Bnatyan, A. L. Voroncov i dr. M.: Mashinostroenie. 2010. 352 s.
9. Ovchinnikov A. G. Osnovy teorii shtampovki vydavlivaniem na pressah. M.: Mashinostroenie. 1983. 200 s.
10. Storozhev M. V., Popov E. A. Teoriya obrabotki metallov davleniem. M.: Mashinostroenie. 1977. 423 s.
11. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 3. Neparnost kasatelnyh napryazhenij // Proizvodstvo prokata. 2010. № 5. S. 2–8.
12. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 7. Osesimmetrichnaya zadacha teorii plastichnosti. Napryazhyonnoe i kinematischeskoe sostoyaniya pri osadke cilindricheskoj zagotovki s treniem na torcah. Metod balansa rabot. CHast 1 // Proizvodstvo prokata. 2010. № 9. S. 2–13.
13. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 6. Osobennosti prilozheniya teorii plastichnosti k analizu operacij obrabotki metallov davleniem // Proizvodstvo prokata. 2010. № 8. S. 2–12.
14. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 9. Stepen deformacii i nakoplenaya deformaciya. Deformirovannoe sostoyanie zagotovki i uchyot uprochneniya pri osadke i vdavlivanii v poluprostranstvo. CHast 1 // Proizvodstvo prokata. 2011. № 2. S. 41–48.
15. Voroncov A. L. Nekotorye problemy mekhaniki deformiruемого tvyordogo tela i eyo tekhnologicheskikh prilozhenij. 7. Osesimmetrichnaya zadacha teorii plastichnosti. Napryazhyonnoe i kinematischeskoe sostoyaniya pri osadke cilindricheskoj zagotovki s treniem na torcah. Metod balansa rabot. CHast 2 // Proizvodstvo prokata. 2010. № 10. S. 2–14.

Vorontsov Andrey Lvovich

Bauman Moscow State Technical University
 Doctor of Tech. Science, Professor of Department
 «Technology of material working»
 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
 Tel.: +7 (499) 267-17-71
 E-mail: avorontsov55@mail.ru

Reschikov Egor Olegovich

Bauman Moscow State Technical University
 Student of Department «Technology of material working»
 105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
 Tel.: +7 (499) 267-17-71
 E-mail: egorreschikov@rambler.ru

В.И. ПАХАЛЮК

УЧЕТ ЕЖЕДНЕВНЫХ РЕЖИМОВ АКТИВНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗНОСА В СФЕРИЧЕСКОМ ШАРНИРЕ С ПОЛИМЕРНЫМ КОМПОНЕНТОМ ТОТАЛЬНОГО ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА

Аннотация. В настоящем исследовании выполнена оценка влияния основных видов ежедневного режима активности (ЕРА) пациентов после тотального эндопротезирования (артропластики) тазобедренного сустава (ТАТБС) на параметры износа материалов пары трения путем моделирования линейного и объемного износа по закону Арчарда в сферическом шарнире тотального эндопротеза тазобедренного сустава (ТЭТБС) с полимерным компонентом. Математическая модель износа, построенная на основе алгоритмов и программ конечно-элементного анализа в программных системах ANSYS и MATLAB, исследована численными методами. Используемые в модели виды ЕРА, а именно: горизонтальная ходьба, подъем и опускание по лестнице, посадка на стул и вставание со стула, и глубокое приседание, описывались типичными для них диаграммами угловых перемещений бедренного компонента ТАТБС и диаграммами приложенной силы. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что за один и тот же промежуток времени общая величина износа при ЕРА существенно выше, чем в случае горизонтальной ходьбы, которая рекомендуется ISO 14242-1 для испытаний ТЭТБС на износ. Следовательно, оценка величины износа при ЕРА оказывается более информативной для прогнозирования функциональной долговечности ТЭТБС. Анализ результатов моделирования позволяет также отметить, что сумма износов, вычисленных для всех видов ЕРА, практически совпадает с общей величиной износа при ЕРА. Этот эффект независимости вкладов в общую величину износа каждого режима активности, позволяет существенно упростить решение задачи оценки износа при нетипичных видах деятельности, включая стохастические.

Ключевые слова: ежедневный режим активности, износ, конечно-элементное моделирование, сферический сустав.

Введение.

ЕРА привлекают все большее внимание в исследованиях, связанных с их влиянием на жизненное поведение обычного пациента в пост оперативный период после ТАТБС, так как это более естественные условия его жизни. Кроме горизонтальной ходьбы, к ЕРА можно отнести наиболее частые режимы активности, такие как ходьба по лестнице, посадка на стул и вставание со стула и приседание [1].

В некоторых исследованиях при различных видах ЕРА определялся максимальный диапазон движения (МДД) в различных плоскостях в тазобедренном суставе после ТАТБС [2–4]. В ссылке [5] выполнена оценка влияния ЕРА на усталостную долговечность ножки и микроперемещения имплантата с использованием устройства для испытаний. Но наибольшее количество исследований связано с кинематикой и кинетикой больших суставов нижней конечности, таких как тазобедренный, коленный и голеностопный при различных видах ЕРА. Так, например, в [6–8] исследовалась только кинематика во время ходьбы по лестнице, а в [9–11] кинематика и кинетика этих же режимов активности. В ссылках [12, 13] исследовалась кинематика вставания со стула, а в [14–16] кинематика посадки на стул и вставания с него. В [17, 18] выполнены исследования, как кинематики, так и кинетики больших суставов нижней конечности при вставании со стула. В ссылках [19, 20] исследовалась кинематика этих же суставов при приседании. Кроме того, для полноты оценки ЕРА особый интерес представляет частота и продолжительность каждого из режимов активности, оценка которых была выполнена в [21]. Необходимо отметить, что во многих вышеуказанных ссылках результаты представлены в терминах максимальных значений соответствующих параметров, например, угловых перемещений, нагрузок, моментов, и очень редко в виде графических зависимостей от времени цикла указанного параметра. Более того, несмотря на то, что каждый из суставов имеет минимум три вращательные степени свободы, а вектор приложенной силы, как правило, имеет ненулевые проекции в трехмерном пространстве, большинство приведенных данных представлены в упрощенной форме. Например, угловое перемещение указано только в одной плоскости, указан только результирующий вектор приложенной силы, исследование данного вида двигательной активности выполнено не на всем временном цикле шага, а только в позиционной фазе без фазы качания и т.д.

Особый интерес представляют исследования, в которых выполнены оценки влияния ЕРА на параметры износа элементов искусственных суставов в терминах, например, линейного, объемного или гравиметрического (потеря массы) износа. По этому поводу в доступной литературе найдено очень мало ссылок. В частности, в [22] приведены результаты исследований характеристик износа на устройстве для испытаний эндопротеза коленного сустава при различных видах ЕРА, которые ранее были учтены нами при синтезе биоподобного искусственного коленного сустава [23]. А в ссылке [1] описаны аналогичные исследования сферического шарнира ТЭТБС с полимерным компонентом, но на специализированном устройстве для испытаний сферических пар трения на износ. Ясно, что для успешного выполнения таких испытаний необходимо знать действительные кинематические зависимости движения в суставе, в том числе, угловые перемещения в трех плоскостях за полный цикл шага для всех используемых видов ЕРА, а также их кинетику, т.е. изменение координат вектора приложенной силы на аналогичном шаге.

Попытка математического моделирования износа по закону Арчарда [24, 25] в сферическом шарнире ТЭТБС с полимерным компонентом при различных видах ЕРА с использованием аппроксимирующих выражений в зависимости от параметров нагрузки, размеров головки и шероховатости ее поверхности предпринята в работе [26]. Но, несмотря на потенциальные возможности использованного в работе конечно–элементного анализа, автором был принят ряд серьезных упрощений, в результате которых оказалось возможным судить лишь о сравнительной оценке влияния ЕРА на объемный износ полимерного элемента ТЭТБС.

Целью настоящего исследования является оценка влияния основных видов ЕРА у пациента после ТЭТБС на параметры износа и их вклад в общую его величину путем моделирования линейного и объемного износа по закону Арчарда в сферическом шарнире ТЭТБС с полимерным компонентом. Исследование выполнено на основе методов конечно–элементного анализа с использованием ранее разработанных нами подходов, подробно изложенных в работах [27, 28]. В вычислительных алгоритмах, реализованных в ANSYS и MATLAB, использовались кинематические диаграммы угловых перемещений бедренного компонента и диаграммы изменения координат вектора приложенной силы, характерные для основных видов ЕРА.

Обзор доступных литературных источников позволяет утверждать, что учет влияния на износ пары трения в процессе ЕРА в постоперативный период после ТЭТБС, в такой постановке выполнен впервые и может служить дополнительной уточняющей информацией при выборе материалов и системном синтезе инновационных конструкций тотальных эндопротезов тазобедренного сустава с полимерным компонентом [29]. Разработанные в данной работе алгоритмы численного моделирования износа на стадии синтеза, в отличие от моделирования на симуляторах позволяют существенно ускорить и удешевить процесс анализа множества вариантов новых пар трения и выбора наилучшего среди них в соответствии с заданными критериями качества.

Материалы и методы

Модель пары трения ТЭТБС, подробно описанная нами ранее в работах [27, 28], содержит твердую сферическую бедренную головку из кобальт–хромового сплава или керамики (оксид алюминия или диоксид циркония) с широко используемым стандартным диаметром 32 мм, сопряженную с мягкой вертлужной чашкой из сверхвысокого молекулярного веса полиэтилена (СВМВПЭ). Радиальный зазор между элементами пары трения составляет 0,15 мм. Модули упругости и коэффициенты Пуассона приняты равными: для чашки – $E_ч=1,4$ ГПа, $\nu_ч=0,46$; для головки – $E_г=210$ ГПа, $\nu_г=0,3$. Модель сферического шарнира правого ТЭТБС, показанная на рисунке 1, определена в неподвижной анатомической системе координат xyz . При моделировании износа используется упрощенная координатная система XYZ , жестко связанная с чашкой с началом, расположенным в ее центре (рисунок 2). Начало подвижной системы координат xyz , используемой при определении углов Эйлера, жестко связано с центром головки и совпадает с центром чашки. Головка имеет три вращательных степени свободы, обычно в литературе обозначаемые как FE (сгибание–разгибание), AA (абдукция–аддукция), IOR (внутреннее–внешнее вращение).

Моделирование износа основано на классическом законе Арчарда, согласно которому для идеальных однородно нагруженных изотропных поверхностей с номинальными

контактными давлениями в линейно упругой области местное приращение глубины износа в точке контактирующей поверхности $\Delta H(\theta, \varphi)$ в сферической системе координат в дискретной форме можно описать следующей зависимостью [30]

$$\Delta H(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_w \sigma(\theta, \varphi, t_i) \Delta S(\theta, \varphi, t_i) \quad (1)$$

где $\sigma(\theta, \varphi, t_i)$ – нормальное контактное давление между двумя взаимодействующими поверхностями в этой же точке в момент времени цикла ходьбы;

t_i – приращение длины дуги скольжения $\Delta S(\theta, \varphi, t_i)$ между соседними расчетными точками при тех же условиях;

k_w – коэффициент, зависящий от материала, характера поверхности и, как было обнаружено, от номинального контактного давления.

В работе [28] представлена модифицированная формула для определения глубины износа с учетом изменения коэффициента износа в зависимости от контактного давления.

Конечно–элементный анализ модели глубины износа, построенной с учетом зависимости (1) выполнен в программных системах ANSYS и MATLAB. При этом для определения приращения длины дуги скольжения $\Delta S(\theta, \varphi, t_i)$ использовались кинематические диаграммы угловых перемещений бедренного компонента сустава, а при определении нормального контактного давления $\sigma(\theta, \varphi, t_i)$ путем решения контактной задачи, учитывалось изменение величины вектора приложенной силы на длине шага. Алгоритм вычислений детально был представлен нами в работах [27, 28], в которых исследовались параметры износа в процессе горизонтальной ходьбы в двух вариантах: согласно требованиям ISO 14242–1, а также для угловых положений бедра, измеренных Jonhston и Smidt, с учетом диаграмм приложенной силы, измеренной Paul [31]. В действительности же пациент кроме горизонтальной ходьбы ежедневно совершает и другие двигательные действия (ЕРА), учет которых позволяет определить параметры износа, более близкие к реальным.

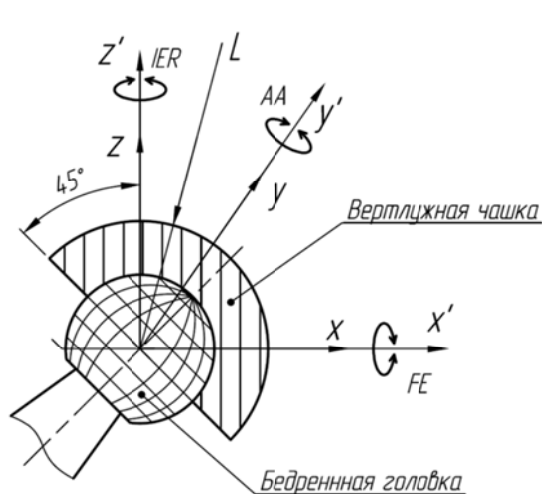


Рисунок 1 – Вид спереди правого тазобедренного сустава с показанными направлениями вращения (L–вектор результирующей нагрузки) [27, 28]

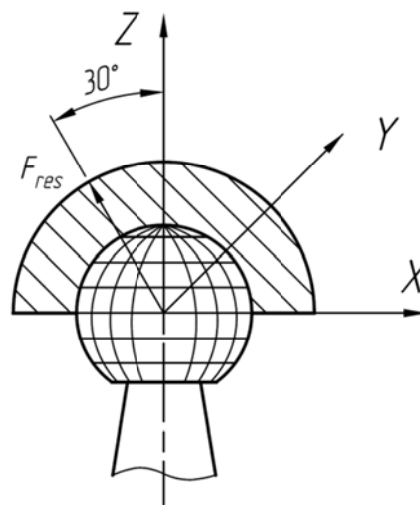


Рисунок 2 – Упрощенная сферическая координатная система для использования при моделировании износа [27, 28]

В ссылке [1] приведены результаты испытаний ТЭТБС на износ на моделирующем устройстве с учетом четырех основных типичных видов нормальных ЕРА пациента: горизонтальная ходьба, подъем и опускание по лестнице, посадка на стул и вставание с него, и глубокое приседание. В этом же исследовании, исходя из частоты цикла каждого вида режима активности, определена его приведенная продолжительность, которая распределяется следующим образом: 44% – горизонтальная ходьба, 24% – поднятие и опускание по лестнице, 12% – посадка на стул, 12% – вставание со стула, и 8% – глубокое приседание. При этом приведенная длительность каждого цикла соответствует периоду времени 1 с. Испытания при горизонтальной ходьбе, представленные в [1], проводились согласно требованиям ISO 14242–1 для диаграмм угловых перемещений бедренного компонента сустава и приложенной силы. Для других видов активности приведены диаграммы только результирующего вектора приложенной

силы для самого худшего случая при силе веса пациента в 1000 Н, но никаких кинематических диаграмм угловых перемещений не представлено.

В настоящем исследовании выполнено численное моделирование износа сферического компонента ТЭТБС, основываясь на указанных в [1] видах ЕРА и их продолжительности. При этом износ в процессе горизонтальной ходьбы оценивался с использованием параметров, регламентированных ISO 14242–1. В расчетной схеме модели наружная поверхность чашки неподвижна относительно базовой системы координат, поэтому при определении приложенной силы использовался метод инверсии, согласно которому вектор силы прикладывается к центру головки и направлен в сторону чашки. Диаграммы изменения координат двумерного результирующего вектора приложенной силы в зависимости от времени цикла (в процентах), заданные согласно ISO 14242–1 в системе координат, показанной на рисунке 1, представлены на рисунке 3, а графики изменения координат трехмерного вектора приложенной силы, соответствующие наихудшему случаю при силе веса пациента в 1000 Н для таких видов ЕРА как подъем по лестнице, опускание по лестнице, посадка на стул и вставание с него, заимствованные из работы [32], показаны, соответственно, на рисунках 4–8. При преобразовании координат вектора приложенной силы при переходе из системы координат, указанной в [32], в упрощенную координатную систему (рисунок 2), учитывался средний угол anteversion (смещение вперед), равный $12,5^\circ$ [32], и угол между осью шейки ножки и вертикальной компонентой вектора силы при положении оси ножки параллельно оси бедренной кости, равный 45° . Поэтому направляющие коэффициенты преобразования координат вектора силы приняты следующими

$$k_X = \cos 12,5^\circ \cos 45^\circ = 0,69; k_Y = \cos 12,5^\circ = 0,976; k_Z = \cos 45^\circ = 0,707.$$

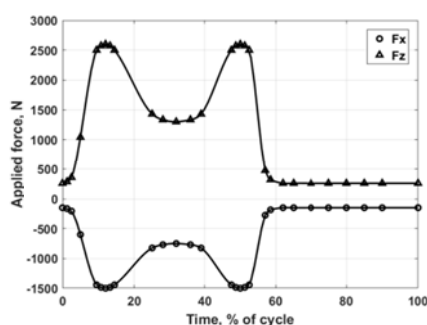


Рисунок 3 – Диаграммы двумерного вектора приложенной силы согласно ISO 14242–1

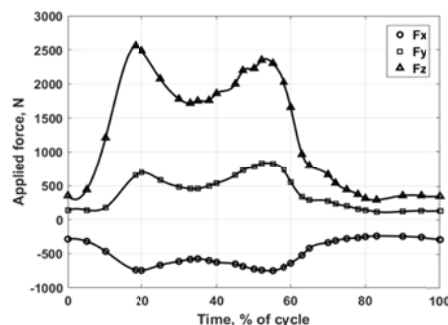


Рисунок 4 – Диаграммы трехмерного вектора приложенной силы для подъема по лестнице

Достоверные диаграммы изменения координат вектора приложенной силы в процессе глубокого приседания в доступной литературе не представлены. Поэтому для оценки параметров износа при этом виде двигательной активности использовался график изменения результирующего вектора силы, приведенный в [1], который был также преобразован при переходе к упрощенной системе координат по аналогии с горизонтальной ходьбой и представлен на рисунке 8.

Необходимые для моделирования кинематические диаграммы угловых перемещений бедренного компонента сустава для различных видов ЕРА, которые обычно используются исследователями и доступны во многих литературных источниках, показаны на рисунках 9–13.

Численное моделирование износа было выполнено двумя способами. Первый из них заключался в том, что все виды ЕРА, указанные выше, выстраивались в заранее определенном порядке с заданной продолжительностью действия в течение одного цикла моделирования: 44% – горизонтальная ходьба, 24% – подъем–опускание по лестнице, 12% – посадка на стул, 12% – вставание со стула, и 8% – глубокое приседание. Чтобы придерживаться примерного числа шагов, при котором производится коррекция опорной поверхности геометрии чашки путем перемещения узлов на величину полученного линейного износа [25], было выбрано минимальное их число в количестве 500000.

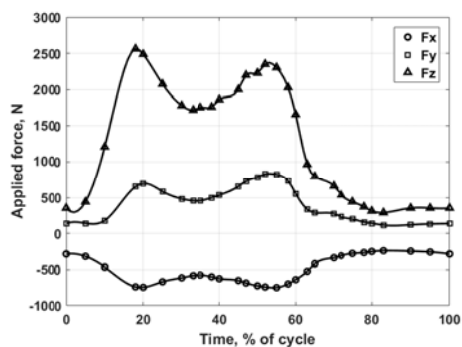


Рисунок 5 – Диаграммы трехмерного вектора приложенной силы для опускания по лестнице

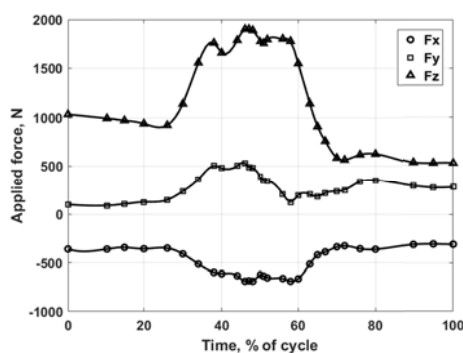


Рисунок 6 – Диаграммы трехмерного вектора приложенной силы для посадки на стул

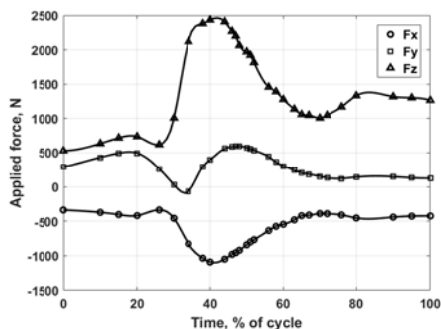


Рисунок 7 – Диаграммы трехмерного вектора приложенной силы для вставания со стула

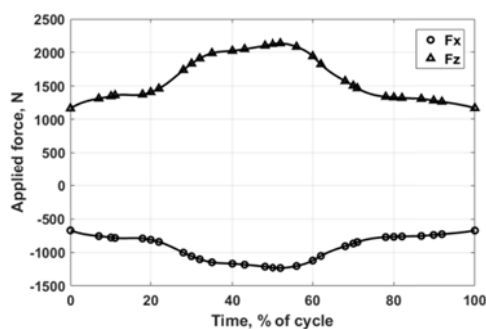


Рисунок 8 – Диаграммы двумерного вектора приложенной силы для глубокого приседания

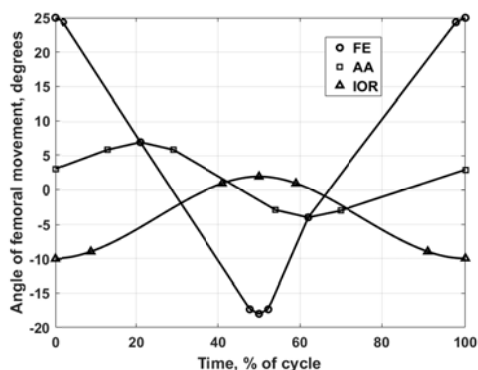


Рисунок 9 – Диаграммы угловых перемещений бедренной головки согласно требованиям ISO 14242-1

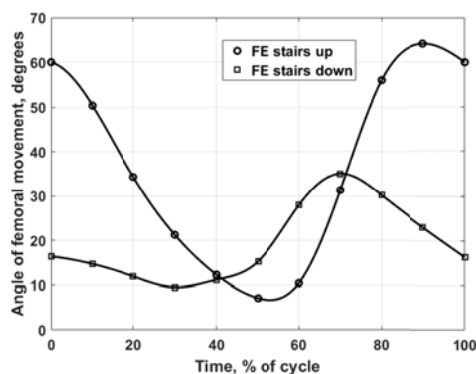


Рисунок 10 – Диаграммы угловых перемещений бедренной головки для опускания-подъема по лестнице [10]

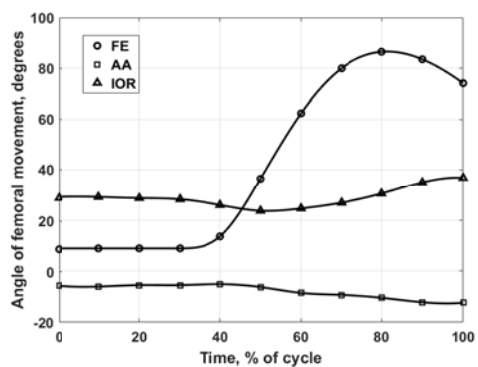


Рисунок 11 – Диаграммы угловых перемещений бедренной головки для посадки на стул [14]

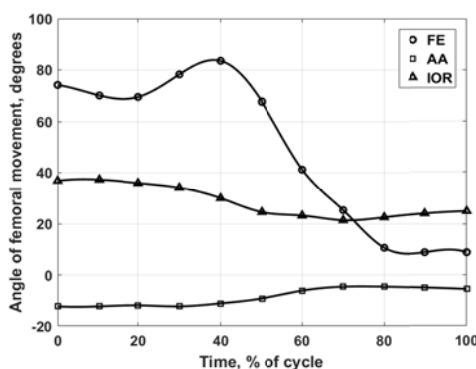


Рисунок 12 – Диаграммы угловых перемещений бедренной головки для вставания со стула [14]

При этом число повторений каждого вида ЕРА, которое необходимо для реализации их приведенной продолжительности, принято кратным 20000. В таком случае они соответствуют числу шагов: 220000, 120000, 60000, 60000, 40000, соответственно. Общее

число шагов в модели, принято равным 5 миллионов, что позволяет реализовать 10 циклов коррекции геометрии опорной поверхности чашки. Учитывая, что каждый шаг разбит на 25 временных интервалов, в каждом из которых выполняется решение контактной задачи в ANSYS, легко подсчитать число таких решений, которые для шести видов ЕРА составляют за один цикл 150, а для 10 циклов это уже 1500, что существенно увеличивает компьютерное время. Принимая во внимание, что в данной работе не ставится задача получения абсолютно точных значений параметров износа, а исследуется оценка, главным образом, качественного влияния каждого из видов ЕРА на параметры износа и их вклад в общую величину износа, то выбранная длительность моделирования позволяет сделать это достаточно убедительно.

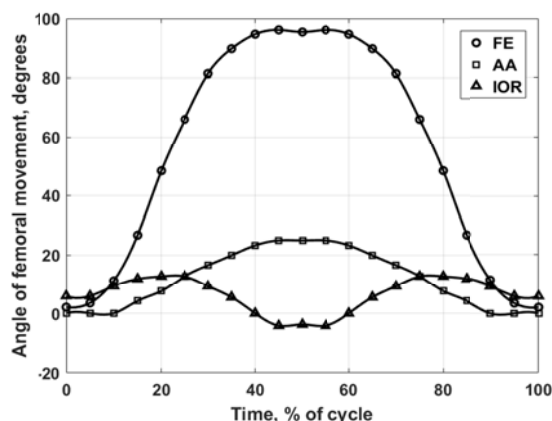


Рисунок 13 – Диаграммы угловых перемещений бедренной головки для глубокого приседания[19]

Второй способ моделирования заключается в том, чтобы оценить вклад каждого из указанных видов ЕРА в общую величину износа. Для этого в каждом цикле моделируется лишь один из этих видов ЕРА со своей продолжительностью в диапазоне до 10 циклов коррекции геометрии опорной поверхности чашки, т.е. до 5 миллионов шагов.

Результаты

На рисунке 14 представлены диаграммы линейного износа при моделировании влияния ЕРА по первому и по второму способу для каждого из видов ЕРА, а на рисунке 15 то же самое, но для накопленного объемного износа.

На рисунках 16, 17 приведены диаграммы линейного и накопленного объемного износа при моделировании ЕРА по первому способу и в случае, когда пациент будет совершать только горизонтальную ходьбу согласно требованиям ISO 14242–1 при такой же продолжительности цикла, как и при суммарном ЕРА. На рисунке 18 в виде гистограммы показан вклад каждого из вышеуказанных видов ЕРА в общую величину износа.

Дискуссия

Диаграммы, показанные на рисунках 14–15, свидетельствуют о ярко выраженной линейной зависимости, наблюдаемой как для линейного, так и для накопленного объемного износа от количества циклов (шагов) для всех отдельных видов ЕРА и их суммарного воздействия. Их элементарный анализ позволяет также отметить, что сумма износов, вычисленных для всех видов ЕРА, практически совпадает с общей величиной износа при ЕРА. Этот эффект независимости вкладов в общую величину износа каждого режима активности, позволяет существенно упростить решение задачи оценки износа при нетипичных режимах активности, включая стохастические.

Из диаграмм, показанных на рисунках 16, 17 следует, что общая величина износа при ЕРА существенно выше, чем в случае только горизонтальной ходьбы, которая рекомендуется ISO 14242–1 для испытаний ТЭТБС на износ. При этом наибольший вклад в общую величину износа (примерно 41%) вносит подъем–опускание по лестнице (см. рисунок 18), несмотря на то, что его длительность составляет всего 24% от общего времени цикла.

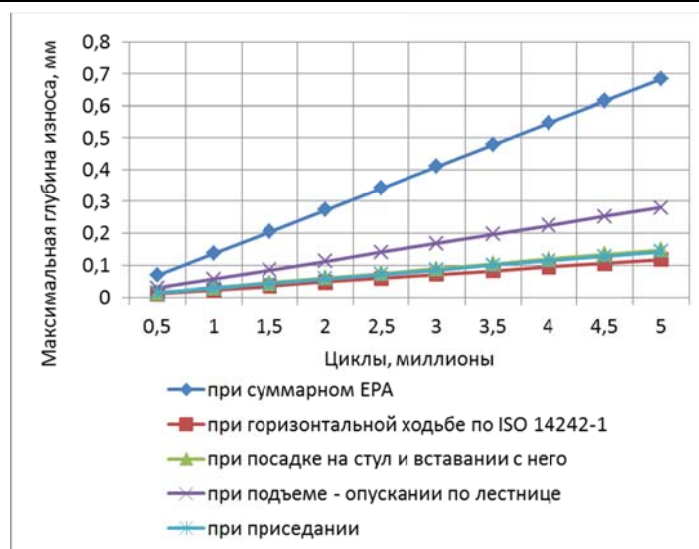


Рисунок 14 – Диаграммы линейного износа при суммарном EPA и вклада каждого из видов EPA отдельно

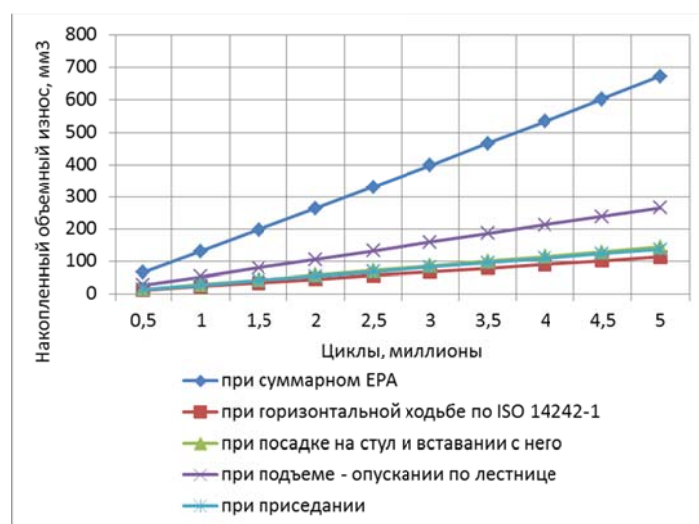


Рисунок 15 – Диаграммы накопленного объемного износа при суммарном EPA и вклада каждого из видов EPA отдельно



Рисунок 16 – Диаграммы линейного износа при суммарном EPA и только для горизонтальной ходьбы согласно ISO 14242-1 при той же длительности цикла, что и для EPA



Рисунок 17 – Диаграммы накопленного объемного износа при суммарном EPA и только для горизонтальной ходьбы согласно ISO 14242–1 при той же длительности цикла, что и для EPA

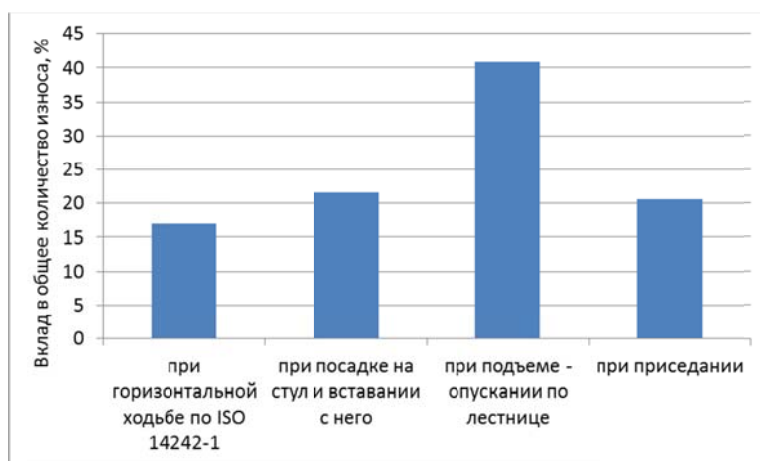


Рисунок 18 – Гистограмма вклада каждого из указанных видов EPA в общую величину износа

Около 21% величины общего износа происходит в период посадки на стул–вставания со стула и приседания, хотя по длительности они отличаются в 3 раза. И, наконец, наименьший вклад в общий износ (примерно 17%) вносит горизонтальная ходьба, несмотря на большую длительность действия (44% от общего времени цикла). Следовательно, оценка величины износа при EPA оказывается более информативной для прогнозирования функциональной долговечности ТЭТБС по сравнению с рекомендуемой ISO 14242–1 оценкой при горизонтальной ходьбе.

Линейную форму зависимостей характеристик износа, полученных на рисунках 14–17, можно, вероятно, объяснить просто геометрическими соотношениями параметров фигур, сформированных из сферы. Форма контакта в сферическом соединении на поверхности чашки, когда головка углубляется в нее во время ее износа, представляет собой приблизительно сферическую поверхность шарового сегмента, где, по мере углубления головки, эта поверхность и объем сегмента линейно возрастают в зависимости от глубины износа в соответствии с известными математическими соотношениями. Этот вывод также подтверждается результатами, полученными в [32] и в ряде работ, приведенных в [27, 28].

Величины параметров износа для горизонтальной ходьбы, представленные на рисунках 16, 17, согласуются с их значениями в работах [27, 28, 30, 31], что указывает на достоверность полученных результатов исследования. Но они несколько отличаются от результатов моделирования на симуляторе, указанных в [1], хотя используемый диаметр головки одинаковый и составляет 32 мм. Это может быть вызвано тем, что кинематические диаграммы угловых перемещений бедренного компонента, использованные в [1], отличались

от использованных в настоящем исследовании. Эти диаграммы оказывают влияние на длину пути скольжения точек поверхности головки по поверхности чашки и, тем самым, влияют на глубину износа согласно формуле (1). Поэтому наличие такого фактора могло привести к серьезным различиям в полученных результатах.

Полученные в данном исследовании результаты, свидетельствуют о том, что с целью продления ресурса ТЭТБС, пациентам после ТАТБС можно дать следующие рекомендации: существенно ограничить режимы активности подъем–опускание по лестнице путем использования лифта и глубокое приседание путем его возможной замены посадкой на стул – вставание со стула.

Заключение

В настоящем исследовании впервые выполнена оценка влияния основных видов ЕРА у пациентов после ТАТЭБС на параметры износа и их вклад в общую его величину путем моделирования линейного и объемного износа по закону Арчарда в сферическом шарнире ТЭТБС с полимерным компонентом. Исследование выполнено на основе методов конечно–элементного анализа с использованием ранее разработанных нами подходов, подробно изложенных в работах [27, 28]. В вычислительных алгоритмах, реализованных в ANSYS и MATLAB, использовались кинематические диаграммы угловых перемещений бедренного компонента и диаграммы изменения координат вектора приложенной силы, характерные для основных видов ЕРА, таких как горизонтальная ходьба, подъем–опускание по лестнице, посадка на стул, вставание со стула и глубокое приседание. Для проверки адекватности использованной в исследовании математической модели и подтверждения достоверности полученных результатов, в ближайшей перспективе будет выполнена экспериментальная оценка износа на разработанном нами моделирующем устройстве, позволяющем с высокой точностью реализовать все кинематические и кинетические параметры движений в суставе, характерные для ЕРА, конструкция и принцип действия которого описаны в [33, 34]. Такое подтверждение необходимо для разработки обоснованных методов прогноза функциональной долговечности ТЭТБС различных конструкций при произвольных режимах двигательной активности пациента после ТАТЭБС.

Моделирование в этой работе было выполнено в предположении справедливости закона Арчарда в его простейшей форме. Однако известно, что это лишь очень грубое приближение. При определенных условиях износ в данной трибологической паре может резко увеличиться или исчезнуть почти полностью [35]. Было бы интересно узнать условия переходов между «нормальным» износом, сильным износом и почти износостойкими условиями. Кроме того, в настоящем подходе не рассматривался явно перенос изнашиваемых частиц во фрикционную зону, что, однако, может существенно влиять на процесс износа [36]. Наконец, было бы интересно рассмотреть возможность аналогичного моделирования с использованием метода граничных элементов, который показал свою специфическую эффективность для моделирования контактных задач [37].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Affatato S. Quantification of wear and deformation in different configurations of polyethylene acetabular cups using micro x-ray computed tomography/ S. Affatato, F. Zanini, S. Carmignato // *Materials*. – 2017. – Vol. 100(3). – P. 259–270.
2. Matsushita I. Activities of daily living after total hip arthroplasty. Is a 32-mm femoral head superior to a 26-mm head for improving daily activities?/ I. Matsushita, Y. Morita, R. Gejo, T. Kimura // *International Orthopaedics (SICOT)*. – 2011. – Vol. 35. – P. 25–29.
3. Turley G.F. Establishing a range of motion boundary for total hip arthroplasty /G.F. Turley, S.M.Y. Ahmed, M.A. Williams, D.R. Griffin // *Proc InstnMechEngrs, Part H: J Engineering in Medicine*. – 2011. – Vol. 225. – P. 769–782.
4. Charbonnier C. Analysis of hip range of motion in everyday life: a pilot study/ C. Charbonnier, S. Chague, J. Schmid et al. // *Hip Int*. – 2015. – Vol. 25(1). – P. 82–90.
5. Kristofolini I. Preclinical assessment of the long-term endurance of cemented hip stems. Part 1: effects of daily activities – a comparison of two load histories/ I. Kristofolini, A.S. Teutonico, P. Savigni et al. // *Proc InstnMechEngrs, Part H: J Engineering in Medicine*. – 2007. – Vol. 221. – P. 569–584.
6. Lin H.C. Three-dimensional analysis of kinematic and kinetic coordination of the lower limb joints during stair ascent and descent / H.C. Lin, T.W. Lu, H.C. Hsu // *Biomed EngAppl Basis Comm*. – 2004. – Vol. 16. – P. 101–108.

7. Abbas S.J. Kinematic analysis of human climbing up and down stairs at different inclinations/ S.J. Abbas, Z.M. Abdulhassan // *Eng Tech Journal, Part A*. – 2013. – Vol. 31(8). – P. 1556–1566.
8. Livingston L.A. Stairclimbing kinematics on stairs of differing dimensions / L.A. Livingston, J.M. Stevenson, J.O. Sandra // *Arch Phys Med Rehabil*. – 1991. – Vol. 72. – P. 398–402.
9. Adiputra L.S. Biomechanics of descending and ascending walk / L.S. Adiputra, S. Parasuraman, M.K.A. Ahamed khan, I. Elamvazuthi // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Vol. 76. – P. 264–269.
10. Protopapadaki A. Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals/ A. Protopapadaki, W.I. Drechsler, M.C. Cramp et al. // *Clinical Biomechanics*. – 2007. – Vol. 22. – P. 203–210.
11. Andriacchi T.P. A study of lower-limb mechanics during stair climbing/ T.P. Andriacchi, G.B. Andersson, R.W. Fermier et al. // *J Bone Joint Surg Am*. – 1980. – Vol. 62. – P. 749–757.
12. Hara D. Kinematic analysis of healthy hips during weight-bearing activities by 3D-to-2D model-to-image registration technique/ D. Hara, Y. Nakashima, S. Hamai et al. // *BioMed Research International*. – 2014. – P. 1–8.
13. Schenkman M. Whole-body movements during rising to standing from sitting, / M. Schenkman, R.A. Berger, P.O. Riley et al. // *Phys Ther*. – 1990. – Vol. 70(10). – P. 638–648.
14. Blazkiewicz M. A new method of determination of phases and symmetry in stand-to-sit-to-stand movement / M. Blazkiewicz, I. Wiszomirska, A. Wit // *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. – 2014. – Vol. 27(4). – P. 660–671.
15. Mourey F.A. Kinematic comparison between elderly and young subjects standing up from and sitting down in a chair / F. Mourey, T. Pozzo, I. Rouhier–Marcer, J.P. Didier // *Age and Aging*. – 1998. – Vol. 27. – P. 137–146.
16. Millington P.J. Biomechanical analysis of the sit-to-stand motion in elderly persons/ P.J. Millington, B.M. Myclebust, G.M. Shambes // *Arch Phys Med Rehabil*. – 1992. – Vol. 73. – P. 609–617.
17. Yoshioka S. Computation of the kinematics and the minimum peak joint moments of sit-to-stand movements / S. Yoshioka, A. Nagano, R. Himeno, S. Fukushima // *BioMedical Engineering OnLine*. – 2007. – Vol. 6(26). – P. 1–14.
18. Yoshioka S. Biomechanical analysis of the relation between movement time and joint development during a sit-to-stand task / S. Yoshioka, A. Nagano, D.C. Hey, S. Fukushima // *BioMedical Engineering OnLine*. – 2009. – Vol. 8(27). – P. 1–9.
19. Hemmerich A. Hip, knee, and ankle kinematic of high range of motion activities of daily living/ A. Hemmerich, H. Brown, S. Smith et al. // *J Orthop Res*. – 2006. – Vol. 24(4). – P. 770–781.
20. Bagwell J.J. Hip kinematics and kinetics in persons with and without cam femoroacetabular impingement during a deep squat task/ J.J. Bagwell, J. Snibbe, M. Gerhardt, C.M. Powers // *Clin Biomech*. – 2016. – Vol. 31. – P. 87–92.
21. Morlock M. Duration and frequency of everyday activities in total hip patients/ M. Morlock, E. Schneider, A. Bluhm et al. // *J Biomech*. – 2001. – Vol. 34. – P. 873–881.
22. Reinders J. Wear testing of moderate activities of daily living using in vivo measured knee joint loading/ J. Reinders, R. Sonntag, L. Vot et al. // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10(3). – P. 1–14.
23. Poliakov A. Biosimilar artificial knee for transfemoral prostheses and exoskeletons/ A. Poliakov, V. Pakhaliuk, N. Lozinskiy et al. // *Facta Universitatis–Series Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 14(3). – P. 321–328.
24. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces/ J. F. Archard // *Journal of Applied Physics*. – 1953. – Vol. 24. – P. 981–988.
25. Popov V.L. Contact mechanics and friction. Physical principles and applications. – Berlin: Springer. – 2017. – 391 p.
26. Sivasankar M. Wear analysis of acetabular cup for daily activities/ M. Sivasankar, K.S.S. Reddy, T. Benarjee et al. // *Indian J Biomech*. – 2012. – Vol. 3(1–2). – P. 13–19.
27. Pakhaliuk V.I. Improving the finite element simulation of wear of total hip prosthesis spherical joint with the polymeric component/ V.I. Pakhaliuk, A.M. Polyakov, M.I. Kalinin, V.A. Kramar // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 539–548.
28. Пахалюк В.И. Расширение условий моделирования износа в сферическом шарнире с полимерным элементом тотального эндопротеза тазобедренного сустава / В.И. Пахалюк // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2017. – № 4–2 (324). – С. 34–43.
29. Poliakov A. System analysis and synthesis of total hip joint endoprosthesis/ A. Poliakov, V. Pakhaliuk, M. Kalinin et al. // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 530–538.
30. Maxian T.A. A sliding-distance-coupled finite element formulation for polyethylene wear in total hip arthroplasty/ T.A. Maxian, T.D. Brown, D.R. Pedersen, J.J. Callaghan, // *J Biomech*. – 1996. – Vol. 27. – P. 687–692.
31. Kang L. A simple fully integrated contact-coupled wear prediction for ultra-high weight polyethylene hip implants / L. Kang, A.I. Galvin, Z.M. Jin, J. Fisher // *Proc Instn Mech Engrs, Part H: J Engineering in Medicine*. – 2006. – Vol. 220(1). – P. 35–46.
32. Bergmann G. Standardized loads acting in hip implants/ G. Bergmann, A. Bender, G. Dymke et al. // *PLoS ONE*. – 2016. – Vol. 11(5). – P. 1–23.
33. Poliakov O. Stand and control system for wear testing of the spherical joints of vehicle suspension at complex loading conditions/ O. Poliakov, V. Pakhaliuk, V. Lazarev et al. // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC–PapersOnline)*. – 2013. – Vol. 1. – P. 106–111.
34. Pakhaliuk V. The kinematic and dynamic performances of the loading mechanism of the hip joint wear simulator, / V. Pakhaliuk, A. Poliakov, I. Desyatov et al. // *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. – 2011. – Vol. 22(1). P. –0595–0596.
35. Li Q. On the possibility of frictional damping with reduced wear: A note on the applicability of Archards law of adhesive wear under conditions of fretting/ Q. Li, V.L. Popov // *Physical Mesomechanics*. – 2017. – Vol. 20(5). – P. 91–95.

36. Popov V.L. Simulation of wear in combustion engines/V.L. Popov, A. Gervé, B. Kehrwald et al. // Computational Materials Science. – 2000. – Vol. 19(1–4). – P. 285–291.

37. Pohrt R. Complete boundary element formulation for normal and tangential contact problems / R. Pohrt, Q. Li // Physical Mesomechanics. – 2014. – Vol. 17(4). – P. 334–340.

Пахалюк Владимир Иванович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Техническая механика и машиноведение»

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053

Тел. 8 (692) 435–161

E-mail: pahaluk@sevsu.ru

V.I. PAKHALIUK

THE CONSIDERING OF ACTIVITY OF DAILY LIVING AT SIMULATION OF WEAR IN A SPHERICAL JOINT WITH POLYMERIC COMPONENT OF A TOTAL HIP REPLACEMENT

Abstract. *The present study assessed the impact of the main typical activities of patients daily living (ADL) after total hip arthroplasty (THA) on wear parameters of sliding couples materials by simulation the linear and volumetric wear according to the Archards law in a spherical joint with a polymeric element of a total hip replacement (THR). The mathematical wear model, built on the basis of algorithms and custom codes of finite element analysis in ANSYS and MATLAB software systems, has been studied numerically. The activities used in the model were: level walking, stair ascending–stair descending, chair sitting–chair rising, and deep squatting. They were described by typical waveforms of the angular displacements of the THRs femoral component and the waveforms of the applied force. The results of the simulation show that for the same duration the overall wear value with ADL is significantly higher than in a case of level walking according to the requirements of ISO 14242–1. Therefore, the evaluation of the wear value for ADL is more informative for predicting the functional life time of the THR. Analysis of simulation results shows that the amount of wear calculated for all activities separately is practically the same as the overall wear value obtained at summary action of ADL. This effect of the independence of contributions to the total amount of wear of each activity makes it possible to significantly simplify the solution of the problem of wear estimating for typical activities, including stochastic ones.*

Keywords: *activities of daily living, total hip replacement, wear, finite element simulation, spherical joint.*

BIBLIOGRAPHY

1. Affatato S. Quantification of wear and deformation in different configurations of polyethylene acetabular cups using micro x-ray computed tomography/ S. Affatato, F. Zanini, S. Carmignato // Materials. – 2017. – Vol. 100(3). – P. 259–270.

2. Matsushita I. Activities of daily living after total hip arthroplasty. Is a 32-mm femoral head superior to a 26-mm head for improving daily activities?/ I. Matsushita, Y. Morita, R. Gejo, T. Kimura // International Orthopaedics (SICOT). – 2011. – Vol. 35. – P. 25–29.

3. Turley G.F. Establishing a range of motion boundary for total hip arthroplasty / G.F. Turley, S.M.Y. Ahmed, M.A. Williams, D.R. Griffin // Proc Instn Mech Engrs, Part H: J Engineering in Medicine. – 2011. – Vol. 225. – P. 769–782.

4. Charbonnier C. Analysis of hip range of motion in everyday life: a pilot study/ C. Charbonnier, S. Chague, J. Schmid et al. // Hip Int. – 2015. – Vol. 25(1). – P. 82–90.

5. Kristofolini I. Preclinical assessment of the long-term endurance of cemented hip stems. Part 1: effects of daily activities – a comparison of two load histories/ I. Kristofolini, A.S. Teutonico, P. Savigni et al. // Proc Instn Mech Engrs, Part H: J Engineering in Medicine. – 2007. – Vol. 221. – P. 569–584.

6. Lin H.C. Three-dimensional analysis of kinematic and kinetic coordination of the lower limb joints during stair ascent and descent / H.C. Lin, T.W. Lu, H.C. Hsu // Biomed Eng Appl Basis Comm. – 2004. – Vol. 16. – P. 101–108.

7. Abbas S.J. Kinematic analysis of human climbing up and down stairs at different inclinations/ S.J. Abbas, Z.M. Abdulhassan // Eng Tech Journal, Part A. – 2013. – Vol. 31(8). – P. 1556–1566.

8. Livingston L.A. Stairclimbing kinematics on stairs of differing dimensions / L.A. Livingston, J.M. Stevenson, J.O. Sandra // Arch Phys Med Rehabil. – 1991. – Vol. 72. – P. 398–402.

9. Adiputra L.S. Biomechanics of descending and ascending walk / L.S. Adiputra, S. Parasuraman, M.K.A. Ahamed Khan, I. Elamvazuthi // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 76. – P. 264–269.

10. Protopapadaki A. Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals/ A. Protopapadaki, W.I. Drechsler, M.C. Cramp et al. // Clinical Biomechanics. – 2007. – Vol. 22. – P. 203–210.

11. Andriacchi T.P. A study of lower-limb mechanics during stair climbing/ T.P. Andriacchi, G.B. Andersson, R.W. Fermier et al. // J Bone Joint Surg Am. – 1980. – Vol. 62. – P. 749–757.

12. Hara D. Kinematic analysis of healthy hips during weight-bearing activities by 3D-to-2D model-to-image registration technique/ D. Hara, Y. Nakashima, S. Hamai et al. // BioMed Research International. – 2014. – P. 1–8.

13. Schenkman M. Whole-body movements during rising to standing from sitting, / M.Schenkman, R.A. Berger, P.O.Riley et al. // *Phys Ther.* – 1990. – Vol 70(10). – P.638–648.
14. Blazkiewicz M. A new method of determination of phases and symmetry in stand-to-sit-to-stand movement / M.Blazkiewicz, I. Wiszomirska, A. Wit // *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health.* – 2014. – Vol 27(4). – P. 660–671.
15. Mourey F.A kinematic comparison between elderly and young subjects standing up from and sitting down in a chair / F.Mourey, T. Pozzo, I.Rouhier–Marcer, J.P. Didier // *Age and Aging.* – 1998. – Vol. 27. – P. 137–146.
16. Millington P.J. Biomechanical analysis of the sit-to-stand motion in elderly persons/ P.J.Millington, B.M. Myclebust, G.M. Shambes // *Arch Phys Med Rehabil.* – 1992. – Vol. 73. – P. 609–617.
17. Yoshioka S. Computation of the kinematics and the minimum peak joint moments of sit-to-stand movements / S.Yoshioka, A. Nagano, R. Himeno, S. Fukushima // *BioMedical Engineering OnLine.* – 2007. – Vol. 6(26). – P. 1–14.
18. Yoshioka S. Biomechanical analysis of the relation between movement time and joint development during a sit-to-stand task / S.Yoshioka, A. Nagano, D.C. Hey, S. Fukushima // *BioMedical Engineering OnLine.* – 2009. – Vol. 8(27). – P. 1–9.
19. Hemmerich A. Hip, knee, and ankle kinematic of high range of motion activities of daily living/ A.Hemmerich, H.Brown, S. Smith et al. // *J Orthop Res.* – 2006. – Vol. 24(4). – P. 770–781.
20. Bagwell J.J.Hip kinematics and kinetics in persons with and without cam femoroacetabular impingement during a deep squat task/ J.J.Bagwell, J. Snibbe, M. Gerhardt, C.M. Powers // *ClinBiomech.* – 2016. – Vol. 31. – P. 87–92.
21. Morlock M.Duration and frequency of everyday activities in total hip patients/M.Morlock, E. Schneider, A. Bluhm et al. // *J Biomech.* – 2001. – Vol. 34. – P. 873–881.
22. Reinders J. Wear testing of moderate activities of daily living using in vivo measured knee joint loading/ J.Reinders, R. Sonntag, L. Vot et al. // *PLoS ONE.* – 2015. – Vol. 10(3). – P. 1–14.
23. Poliakov A. Biosimilar artificial knee for transfemoral prostheses and exoskeletons/ A.Poliakov, V.Pakhaliuk, N. Lozinskiy et al. // *FactaUniversitatis–Series Mechanical Engineering.* – 2016. – Vol. 14(3). – P. 321–328.
24. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces/ J. F.Archard // *Journal of Applied Physics.* – 1953. – Vol. 24. – P. 981–988.
25. Popov V.L. Contact mechanics and friction. Physical principles and applications. – Berlin: Springer. – 2017. – 391 p.
26. Sivasankar M. Wear analysis of acetabular cup for daily activities/ M.Sivasankar, K.S.S. Reddy, T. Benarjee et al. // *Indian J Biomech.* – 2012. – Vol. 3(1–2). – P. 13–19.
27. Pakhaliuk V.I. Improving the finite element simulation of wear of total hip prosthesis spherical joint with the polymeric component/ V.I.Pakhaliuk, A.M. Polyakov, M.I. Kalinin, V.A. Kramar // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 100. – P. 539–548.
28. Pakhaliuk V.I. Rasshireniye usloviy modelirovaniya iznosa v sfericheskom sharnire s polimernym elementom totalnogo endoproteza tazobedrennogo sustava / V.I. Pakhaliuk // *Fundamentalnyye i prikladnyye problem tekhniki i tekhnologii.* – 2017. – № 4–2 (324). – S. 34–43.
29. Poliakov A. System analysis and synthesis of total hip joint endoprosthesis/ A.Poliakov, V. Pakhaliuk, M. Kalinin et al. // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 100. – P. 530–538.
30. Maxian T.A. A sliding-distance-coupled finite element formulation for polyethylene wear in total hip arthroplasty/ T.A.Maxian, T.D. Brown, D.R. Pedersen, J.J. Callaghan, // *J Biomech.* – 1996. – Vol. 27. – P. 687–692.
31. Kang L. A simple fully integrated contact-coupled wear prediction for ultra-high weight polyethylene hip implants / L.Kang, A.I. Galvin, Z.M. Jin, J. Fisher // *Proc InstnMechEngrs, Part H: J Engineering in Medicine.* – 2006. – Vol. 220(1). – P. 35–46.
32. Bergmann G. Standardized loads acting in hip implants/ G.Bergmann, A. Bender, G. Dymke et al. // *PLoS ONE.* – 2016. – Vol. 11(5). – P. 1–23.
33. Poliakov O. Stand and control system for wear testing of the spherical joints of vehicle suspension at complex loading conditions/ O.Poliakov, V. Pakhaliuk, V. Lazarev et al. // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC–PapersOnline).* – 2013. – Vol. 1. – P. 106–111.
34. Pakhaliuk V.The kinematic and dynamic performances of the loading mechanism of the hip joint wear simulator, / V.Pakhaliuk, A. Poliakov, I. Desyatov et al. // *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium.* – 2011. – Vol. 22(1). P. –0595–0596.
35. Li Q. On the possibility of frictional damping with reduced wear: A note on the applicability of Archards law of adhesive wear under conditions of fretting/ Q.Li, V.L. Popov // *Physical Mesomechanics.* – 2017. – Vol. 20(5). – P. 91–95.
36. Popov V.L.Simulation of wear in combustion engines/V.L. Popov, A. Gervé, B. Kehrwald et al. // *Computational Materials Science.* – 2000. – Vol. 19(1–4). – P. 285–291.
37. Pohrt R. Complete boundary element formulation for normal and tangential contact problems / R. Pohrt, Q. Li // *Physical Mesomechanics.* – 2014. – Vol. 17(4). – P. 334–340.

Pakhaliuk Vladimir Ivanovich

FSAEI HE “Sevastopol State University”

Ph.D., Associate Professor, Head of Engineering Mechanics and Machinery Department

Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053

Ph. 8 (692) 435–161

E– mail: pahaluk@sevsu.ru

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПЕРЕГРЕВА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Аннотация. В настоящей работе получен высокопроизводительный алгоритм дальнего прогноза температуры для предотвращения перегрева при обработке металлов резанием. Управляющим воздействием системы при превышении прогнозного значения температуры над допустимым представляется увеличение количества подаваемой в рабочую зону смазочно-охлаждающей жидкости, уменьшение скорости резания, уменьшение подачи станка, либо комбинация этих воздействий.

Ключевые слова: обработка металлов резанием, металлорежущие станки, обработка на станках с ЧПУ, перегрев, прогноз температуры.

Введение.

Предотвращение перегрева при обработке металлов резанием является существенным фактором, обеспечивающим производство изделий [1 - 2].

С одной стороны, эффективность производства повышается с количеством выпущенных изделий в единицу времени. С другой – повышение скорости обработки и подачи станка без принятия дополнительных мер приводит к резкому росту температуры рабочей зоны [3]. При превышении температуры сверх допустимой для инструмента из данного материала (практически [4] данная величина лежит в диапазоне 600 - 950°C, меньшие значения соответствуют сталям, большие – твердым сплавам) происходит нежелательное изменение свойств инструмента вследствие термических эффектов, вследствие таких явлений как: диффузия атомов из обрабатываемого материала в инструмент, окисление поверхности, выкрашивание твердосплавного инструмента.

Совместное действие названных факторов может при непрерывной обработке привести инструмент в полную негодность [5, с.55] через несколько сотен метров его пути, чему при характерных значениях скорости резания соответствует время порядка единиц секунд. При успешном же завершении операции, выполненной в подобном режиме, нагретый до температур более 1000°C инструмент подвергается затем самопроизвольному отпуску при свободном остывании в воздухе с потерей режущих свойств, либо столь же самопроизвольной закалке при омывании его смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ).

Применительно к обрабатываемому изделию, несмотря на то, что большая часть выделяемого при обработке тепла (70 – 90%) передается стружке, наличие подобных температур в рабочей зоне способно вызвать искажение геометрической формы изделия и значительное снижение чистоты получаемой поверхности. При обработке с жидкостным охлаждением высокие температуры вызывают интенсивное выкипание СОЖ, которая затем конденсируется на электронных компонентах схемы управления станка и со временем приводит к их выходу из строя.

Поэтому на любом производстве, имеющем металлорежущие станки, возникает и решается задача устранения данных явлений. Способом активного противодействия перегреву при обработке с жидкостным охлаждением является управление подачей СОЖ. При сухой обработке приходится менять либо подачу станка либо скорость резания, определенное применение может иметь принудительное воздушное охлаждение рабочей зоны.

Вместе с тем, при неизменных параметрах технологического процесса стохастический характер параметров заготовок дает предпосылки к возникновению случаев перегрева, которые к настоящему времени все еще продолжают происходить.

Способом радикального снижения их количества представляется мониторинг изменения температуры рабочей зоны с началом обработки и выдача прогноза её равновесного значения. Если прогнозное значение оказывается больше допустимого, осуществляется управляющее воздействие в виде изменения параметров технологического процесса: увеличения подачи СОЖ либо снижения скорости обработки или подачи станка и выполняется новый прогноз.

В работах [3], [6] и [7] предлагается принципиальное решение данной задачи построением конечно-элементной модели процесса резания. Вместе с тем, препятствием применения полученных результатов на практике является необходимость определения

граничных условий с высокой точностью и отсутствие быстрых и адекватных алгоритмов дальнего прогноза временного ряда температурных измерений. Один из таких алгоритмов мы и предложим в настоящей работе.

Постановка задачи.

Представим последовательность измеренных значений температуры в рабочей зоне как случайный процесс дискретного времени $T(t)$, с реализацией

$$T = T_1, T_2, T_3, \dots, T_n, \dots \quad (1)$$

Известно, что для каждого порядкового номера n сечение процесса представляет собой постоянную величину, зависящую только от n . Таким образом, при повторении процесса все его реализации совпадают друг с другом и дисперсия каждого сечения равна нулю. Кроме того, значения реализации можно описать единой формулой

$$T(t) = T_{\lfloor t/\Delta t \rfloor}, \quad (2)$$

где в правой части дробный индекс округляется до ближайшего целого числа; Δt – шаг изменения времени.

Далее, считаем, что, существует предельное значение

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n. \quad (3)$$

Возникает задача, не зная зависимость $T(t)$ (2), но располагая последовательностью первых $(m+1)$ значений реализации процесса, определить A и дать оценку T_n при $n \rightarrow \infty$ в виде, пригодном для управления станком с ЧПУ в режиме реального времени.

Материал исследования. Очевидно, не производя иных допущений, данная задача допускает множественные решения – в отличие от стохастического подхода, опирающегося на допущение о неслучайности свойств членов ряда как случайных величин (одно- и многомерные распределения, моменты различных порядков, автокорреляционная функция и др.) у нас нет информации относительно детерминированной функции (2), определяющей реализацию (1) и мы не можем восстановить её путем применения статистических критериев к доступной реализации (которая предполагается единственно возможной). С другой стороны, при явном задании $T(t)$ получается тривиальная задача на исследование свойств заданной функции.

В работах [8 - 9] мы предлагаем промежуточный подход, при котором, применительно к данной задаче делаются допущения относительно комплекснозначного расширения $T(t)$, $T(z)$, позволяющие по вектору коэффициентов его разложения в степенной ряд в точке, не являющейся особой, сделать выводы о его поведении при стремлении аргумента к бесконечно удаленной точке комплексной плоскости. Затем полученные свойства используются для оценки поведения $X(t)$ при неограниченном возрастании действительного аргумента t , и величина A (3) и сопутствующие коэффициенты вычисляются для реализации $x(t)$ с помощью вектора приближенных коэффициентов разложения её в степенной ряд, полученных одним из численных методов.

Используя результаты, полученные в [9], перейдем к прогнозной оценке значений реализации T_n процесса T при неограниченном возрастании n . Пусть нам известна таблица из m значений реализации x , перекрывающих интервал времени $t \in [0, (m-1) \cdot \Delta t]$.

Применительно к комплексной области, содержащей действительную ось времени, которая будет предметом нашего дальнейшего рассмотрения, для выполнения условий теоремы 1 [6] будет достаточным сходимость разложения $T(t)$ в ряд

$$T(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q'_k}{(t+1)^k} \quad (4)$$

при $t \in (-1/2, \infty)$, и сходимость ряда

$$T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot t^n \quad (5)$$

в окрестности точки ($t = 0$) с возможностью непрерывного аналитического продолжения в положительном направлении вдоль всей действительной оси времени.

Тогда, если нам известны все коэффициенты (5) с бесконечно высокой точностью и мы проводим вычисления с неограниченным количеством значащих цифр, то для нахождения коэффициентов (4) мы можем непосредственно использовать суммы, приведенные в [9]

$$\begin{cases} q'_0 = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{s=0}^m c_s \cdot \binom{m}{s} \\ q'_k = (-1)^k \cdot \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{s=1}^m c_s \cdot \sum_{n=0}^k (-1)^n \cdot \binom{m-n}{k-n} \cdot \binom{m}{s+1} \end{cases} \quad (6)$$

неограниченно увеличивая m , мы будем получать значения, стремящиеся к точным.

Тогда прогноз предельного значения переходного процесса изменения температуры в рабочей зоне будет равен коэффициенту нулевого порядка разложения (4)

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n = q'_0. \quad (7)$$

С возрастанием n приближенное равенство

$$T_n \approx \sum_{s=0}^k \frac{q'_s}{(t+1)^s}, \quad (8)$$

где $t = n \cdot \Delta t$, для любого фиксированного k будет выполняться со сколь угодно высокой степенью точности, то есть, искомая оценка изменения температуры при больших значениях времени примет вид

$$T_n = \sum_{s=0}^k \frac{q'_s}{(t+1)^s} + O(t^{-(k+1)}), n \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Однако в нашем случае коэффициенты (5) могут быть заданы только приближенно, что обуславливает дополнительную потерю точности результата. С возрастанием количества операций над приближенно заданными числами будет, очевидно, расти и погрешность результата, причем структура формул (6) в вычислительном плане реализует особенно неблагоприятный случай: разность больших близких чисел, возникающих при умножении приближенно заданных коэффициентов (5) на биномиальные коэффициенты. Поскольку последние неограниченно растут с возрастанием параметра m , очевидно, что сходиться к конечному значению такая вычислительная схема может только при наличии положительных и отрицательных слагаемых, дающих сумму, по меньшей мере, меньшую наибольшего из них.

Введем условный аргумент η

$$\eta = \frac{t}{t+1}, \quad (10)$$

так что

$$t = \frac{\eta}{1-\eta}. \quad (11)$$

Будем рассматривать процесс дискретного аргумента $T(i)$, соответствующий равноотстоящим интервалам изменения η ($i = 1, 2, \dots$), i – порядковый номер элемента в последовательности.

В частности, при $t \in [0, \infty]$, $\eta \in [0, 1]$. Тогда, зная p равноотстоящих значений η , последнее значение можно вычислить с их помощью интерполяцией на один шаг вперед. Для установления взаимно-однозначного соответствия между последовательностями значений η и t используем соотношение (10).

При этом для одних и тех же значений температуры T_i постоянный шаг изменения условного аргумента $\Delta\eta$

$$\Delta\eta = \frac{1}{p} \quad (12)$$

будет соответствовать переменному шагу изменения времени Δt_i , зависящему от порядкового номера элемента в последовательности

$$\Delta t_i = t_{i+t} - t_i = \frac{\Delta\eta}{(1-(i+1) \cdot \Delta\eta) \cdot (1-i \cdot \Delta\eta)}. \quad (13)$$

Тогда:

$$\eta_i = i \cdot \Delta\eta; \quad (14)$$

$$t_i = \frac{i \cdot \Delta\eta}{1 - i \cdot \Delta\eta}, \quad (15)$$

Учитывая (14) – (15), упорядоченная последовательность $\{T_i, \eta_i\}$ может быть представлена как дискретизация либо функции $T(t)$ через интервалы (13), либо функции $U(\eta) = T\left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)$ через интервалы (12). Вторая из этих трактовок при принятых допущениях (текст за формулой 4) устанавливает взаимосвязь между коэффициентами (4) и коэффициентами степенного разложения $U(\eta)$ в точке ($\eta=1$) с помощью следующих формул

$$\begin{cases} q'_0 = U(1) \\ q'_1 = -\frac{d}{d\eta} \cdot U(\eta) \Big|_{\eta=1} \\ q'_n = (-1)^n \cdot \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^n}{d\eta^n} \cdot U(\eta) \Big|_{\eta=1} \end{cases} \quad (16)$$

Первое значение в правой части (16) может быть получены непосредственной экстраполяцией последовательности $\{T_i, \eta_i\}$ на один шаг вперед. Остальные значения правых частей находятся по тому же принципу экстраполяцией последовательности производных функции $T(\eta) \left\{ \frac{d^n T}{d\eta^n}, \eta_i \right\}$.

При достаточно гладких функциях с достаточной для практики точностью применима экстраполяция полиномом Лагранжа. Как было показано в [7], непосредственная расчетная формула принимает вид

$$T_{p+1} = A = q'_0 = (-1)^p \cdot \sum_{i=0}^p (-1)^i \cdot \binom{p+1}{i} \cdot T_i, \quad (17)$$

где количество используемых точек следует выбирать из диапазона $p = 4, \dots, 10$.

Справедливость предлагаемого подхода проверим на таблице условных данных, полученных табулированием функции $T(\eta) = 1000 \cdot \arctg\left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)$ с округлением до 0,1 °С.

Пример 1. Зависимость от времени температуры рабочей зоны описывается неравномерным временным рядом, представленным в таблице 1. Требуется определить равновесное значение температуры.

Таблица 1 – опорные точки после обработки условного ряда температуры T °С неравноотстоящими интервалами измерений

0	0	0	0,0
1	0,1	0,1111	11,1
2	0,2	0,2500	25,0
3	0,3	0,4286	42,8
4	0,4	0,6667	66,5
5	0,5	1,0000	99,6
6	0,6	1,5000	148,9
7	0,7	2,3333	229,2
8	0,8	4,0000	380,5
9	0,9	9,0000	732,8
10	1,0	∞	?

Используя формулу (17) при $p = 6$ применительно к последнему столбцу таблицы, получим

$$A = -(66,5 - 6 \cdot 99,6 + 15 \cdot 148,9 - 20 \cdot 229,2 + 15 \cdot 380,5 - 6 \cdot 732,8) = 1570,9, \quad (18)$$

что отличается от точного значения $500\pi \approx 1570,8^\circ\text{C}$ на одну единицу последнего разряда (относительная погрешность $\varepsilon=0,0064\%$). В реальных условиях достижение такого значения температуры при обработке вызвало бы недопустимый перегрев инструмента для подавляющего большинства материалов. Вместе с тем, последнее из используемых значений $732,8^\circ\text{C}$ еще лежит в допустимых пределах также для большинства из них и не вызвало бы срабатывания защиты по текущему уровню температуры. Отметим, что при выборе другого количества точек из рекомендуемого диапазона относительная погрешность не превышает 10 – 15% с различным знаком.

Выводы.

В настоящей работе был предложен способ предотвращения перегрева при обработке металла на металлорежущем станке с ЧПУ, основанный на прогнозировании предельно возможной температуры рабочей зоны и формировании управляющего воздействия: увеличения подачи СОЖ либо уменьшения скорости обработки при неблагоприятных результатах прогноза.

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм дальнего прогноза основывается на неравномерном временном ряде температурных измерений, который может быть получен либо специально путем опроса датчика в рассчитанные по формулам (13 – 15) моменты времени, либо может быть сформирован из равномерного временного ряда путем интерполяции. За счет этого было на 1 – 2 порядка снижено количество используемых точек и затратность расчетной формулы относительно решения аналогичной задачи для точки теплового поля объекта судовой энергетики [10], которая для формулы (17) по операциям умножения составляет $O(m)$. Это позволяет использовать алгоритм в режиме реального времени для выработки управляющего воздействия по прогнозу температуры от датчиков, размещенных вблизи рабочей зоны.

Отметим, что формулы (10) и (11) позволяют осуществить масштабирование времени, отличающееся от приведенного в таблице 1 при сохранении принципа выполнения ближнего прогноза температуры для условного параметра η с целью получения дальнего прогноза её же для времени t . Для этого следует значение η , соответствующее последнему известному значению температуры, полагать не предпоследним возможным значением, как было сделано в таблице 1, а лежащим в середине диапазона, соответственно, применяя формулу (16) столько раз, сколько остается неиспользованных значений η для данной дискретизации.

Наиболее применимым предлагаемый подход коррекции рабочего процесса по прогнозной предельной температуре представляется для станков, осуществляющих достаточно длительные непрерывные циклы обработки, в ходе которых действительная температура приближается к прогнозному равновесному значению. Если же обработка завершается ранее, то, очевидно, что достигаемый нагрев будет меньше и прогнозные значения в принципе не могут быть достигнуты. Это, в свою очередь, дает предпосылки для существования в условном пространстве «скорость резания – подача станка» некоторой наихудшей области применительно к одной и той же задаче формообразования, при которой достигнутая температура будет максимальной. Область применения метода в том же пространстве – режимы с высокой скоростью и малой подачей, для них формулы (10 – 17) допускают использование в целях построения системы защиты от перегрева при введении в ЧПУ станка обратной связи по температуре шпинделя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка металлов резанием: Справочник технолога/А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ.ред. А.А. Панова - М.: Машиностроение, 2004. - 784 с.
2. Ren, H. Mechanics of Machining With Chamfered Tools/H. Ren, Y. Altintas// J. Manuf. Sci. Eng 122(4), (Dec 1999), p.650-659.
3. Abukshim, N.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining/N.A. Abukshim P.T. Mativenga M.A. Sheikh// International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 7–8, (June 2006), p.782-800
4. Тимошенко А.В., Лебедев В.В. Предотвращение аварийных ситуаций при работе со станком с ЧПУ./А.В. Тимошенко, В.В. Лебедев // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XIV Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2014. – С. 179-181.
5. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design./Y. Altintas – Cambridge University Press, 2012– 364 p.
6. Baker M. A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing /M. Baker, J. Rosler, C. Siemens// Comput. Struct. 80 (2002) p.495-513

7. Lei S. Thermo-mechanical modelling of orthogonal machining process by finite element analysis /S.Lei,Y-C. Schin, F.P.Incropera// Int. J. Mach. Tools Manuf. 39 (1999) 731 - 750.
- 8.Неменко А.В. Применение асимптотических методов к задаче прогнозирования тепловых переходных процессов в судовой энергетической установке/ А.В. Неменко, М.М. Никитин // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2011. – вып. 119 – с. 66 – 70.
9. Mihail Nikitin. Asymptotic expansion of a function defined by power series [Электронный ресурс]: Электрон. страница (1 файл 194 Кб). – Свободный доступ из сети Интернет – <http://arxiv.org/abs/1006.0178v2>.
10. Неменко А.В. Прогнозная оценка параметров теплового поля судовой энергетической установки/ А.В. Неменко, М.М. Никитин// Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2014. – вып. 148 – с. 207 – 210.

Неменко Александра Васильевна
 ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Кандидат технических наук, доцент кафедры
 «Техническая механика и машиноведение»
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. +79788330519
 E-mail: valesan@list.ru

Никитин Михаил Михайлович
 ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
 Аспирант кафедры «Высшая математика»
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 Тел. +79780621579
 E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

OVERHEATING PREVENTION DURING MACHINING OF METALS

Abstract. *In this paper for this purpose, a high-performance long-range forecasting algorithm has been obtained overheating prevention during machining of metals. The controlling effect of the system when the forecast temperature exceeds the permissible value is an increase in the amount of lubricant supplied to the working zone, a reduction in the cutting speed, a decrease in the feed of the machine, or a combination of these effects.*

Keywords: *metal machining, metal cutting machines, CNC machining, overheating, temperature forecast.*

BIBLIOGRAPHY

1. Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tekhnologa/A.A. Panov, V.V. Anikin, N.G. Bojm i dr.; Pod obshch.red. A.A. Panova - M.: Mashinostroenie, 2004. - 784 s.
- 2.Ren, H. Mechanics of Machining With Chamfered Tools/H. Ren,Y. Altintas// J. Manuf. Sci. Eng 122(4), (Dec 1999), p.650-659.
3. Abukshim, N.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining/N.A.AbukshimP.T.MativengaM.A.Sheikh//International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 7–8, (June 2006), p.782-800
- 4.Timoshenko A.V., Lebedev V.V. Predotvrashchenie avariynih situacij pri rabote so stankom s CHPU./A.V. Timoshenko, V.V. Lebedev // Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ehkonomike i tekhnike: Sb. statej XIV Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. – Penza: PDZ, 2014. – S. 179-181.
5. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design./Y. Altintas – Cambridge University Press, 2012– 364 p.
6. Baker M. A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing /M. Baker, J. Rosler, C. Siemens// Comput.Struct.80 (2002) p.495-513
7. Lei S. Thermo-mechanical modelling of orthogonal machining process by finite element analysis /S.Lei,Y-C. Schin, F.P.Incropera// Int. J. Mach. Tools Manuf. 39 (1999) 731 - 750.
- 8.Nemenko A.V. Primenenie asimptoticheskikh metodov k zadache prognozirovaniya teplovyh perekhodnyh processov v sudovoj ehnergeticheskoy ustanovke/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin // Vestnik SevNTU. Ser. Mekhanika, ehnergetika, ehkologiya: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2011. – vyp. 119 – s. 66 – 70.
9. Mihail Nikitin. Asymptotic expansion of a function defined by power series [EHlektronnyj resurs]: EHlektron. stranica (1 fajl 194 Kb). – Svobodnyj dostup iz seti Internet – <http://arxiv.org/abs/1006.0178v2>.
10. Nemenko A.V. Prognoznaya ocenka parametrov teplovogo polya sudovoj ehnergeticheskoy ustanovki/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin// Vestnik SevNTU. Ser. Mekhanika, ehnergetika, ehkologiya: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2014. – vyp. 148 – s. 207 – 210.

Nemenko Aleksandra Vasiljevna
 Federal State Autonomous Educational Foundation
 «Sevastopol State University», Sevastopol
 Ph.D., assistant professor of chair «Technical Mechanics
 and Machine Theory»
 299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
 Ph.: +79788330519
 E-mail: valesan@list.ru

Nikitin Mikhail Mikhailovich
 Federal State Autonomous Educational Foundation
 «Sevastopol State University», Sevastopol
 Post-graduate student of chair «Higher Mathematics»,
 engineer of laboratory «Stochastic modeling of systems»
 299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33
 Ph.: +79780621579
 E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

РАСПОЗНАВАНИЕ ФАЗЫ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ИНВАЛИДА ПРИ ХОДЬБЕ НА ТРАНСФЕМОРАЛЬНОМ ПРОТЕЗЕ

Аннотация. *Неправильное распознавание фазы двигательной активности при ходьбе на управляемом протезе может приводить к потере устойчивости инвалида с последующим падением. Вероятность падения возрастает также в случае превышения критического времени или критических ошибок распознавания фазы активности и связанных с ними неправильных команд, генерируемых системой управления протезом. В связи с этим качество алгоритмов распознавания фазы активности и намерений инвалида осуществить то или иное двигательное действие в ближайшей перспективе оказывает непосредственное влияние на уровень его безопасности в процессе ходьбы. В данной работе обоснован метод быстрого распознавания фазы двигательной активности инвалида при ходьбе на управляемом трансфеморальном протезе, основанный на свойствах моментных инвариантов X_u , использование которого в интеллектуальных системах управления позволит свести к минимуму критические ошибки, время распознавания режима и фазы активности, и, следовательно, повысить безопасность инвалида в процессе ходьбы.*

Ключевые слова: *управляемый трансфеморальный протез, безопасность ходьбы на протезе, режим двигательной активности, фаза двигательной активности, распознавание, моментные инварианты X_u .*

Введение.

В [1] представлены общие соображения относительно синтеза интеллектуальных систем управления (ИСУ) для управляемых трансфеморальных протезов (ТФП) в рамках интеллектуально-синергетической концепции (ИСК). Как и в большинстве современных ИСУ, в системе управления, синтезируемой на основе ИСК, предусматривается трехуровневая архитектура, включающая контроллеры высшего (HLC), среднего (MLC) и низшего (LLC) уровней [2]. Но при этом реализуется основная идея ИСК, состоящая в том, что ИСУ включает в себя две подсистемы: интеллектуальную (ИПС= $HLC+MLC$) и синергетическую (СПС= $MLC+LLC$). При этом ИПС ответственна за распознавание двигательных намерений пользователя, а СПС – за их биоподобную реализацию [1,3]. В принципе, как отмечено в [4], контроллеры такой ИСУ могут выполнять свои функции с использованием разных алгоритмов, каждый из которых может быть оптимальным с точки зрения разных критериев и условий. Но безусловным требованием к таким алгоритмам является обеспечение безопасности пользователя в процессе локомоции с ТФП.

Несмотря на то, что ИПС непосредственно не участвует в управлении приводами ТФП, она опосредованно играет важную роль в управлении, вырабатывая стратегию и тактику движений элементов протеза, которые обосновываются в результате распознавания намерений пользователя осуществить определенное движение в ближайшей или среднесрочной перспективе. Объективные ошибки распознавания намерений и их классификации зависят от многих факторов и, в общем случае, носят случайный характер, и поэтому неизбежны при использовании любых алгоритмов распознавания. Более того, пользователь ТФП в течение достаточно короткого промежутка времени может изменять свои первоначальные намерения, что способствует появлению субъективных ошибок. Поэтому точное решение задачи распознавания намерений оказывается невозможным.

Время, в течение которого ИСУ должна обеспечить возможность перехода ТФП из одного режима активности в другой, принято называть «критическим временем» [5], а любые ошибки, приводящие к субъективному ощущению пользователем состояния неустойчивого равновесия – «критическими ошибками» [6]. Введение этих терминов в практику управления протезами позволило разделить все возможные ошибки, связанные с распознаванием и классификацией намерений, на некритические, т.е. такие, при которых наихудшим вариантом последствий является отсутствие помощи пользователю со стороны протеза, и критические – при которых пользователь не только может потерять равновесие с последующим падением, но даже чувствовать себя неуверенно при использовании вспомогательного устройства.

Фундаментальные исследования в области управления ТФП позволили F. Zhang с коллегами сделать вывод о том, что не все ошибки приводят к неустойчивому равновесию

[7] и что такие характеристики как точность распознавания режима активности и уровень ошибки, могут оказаться недостаточными для реальной оценки потенциала алгоритма распознавания. В связи с этим они предложили оценивать качество алгоритмов распознавания по затратам времени и качеству идентификации критических ошибок, что представляется более обоснованным с функциональной точки зрения [7].

Помимо обеспечения безопасности, качественное распознавание фазы активности в ИПС важно для надежного определения граничных условий задачи планирования биоподобных движений элементов ТФП в СПС [1]. Известно, что большинство ИСУ для достижения этих целей используют информацию о распознанном в НЛС режиме активности и текущее состояние устройства, определяемое с помощью сенсоров, установленных в устройстве или непосредственно в пользователе [4]. Но такой подход не позволяет непосредственно решить задачу планирования синергетически оптимальных (биоподобных) движений даже при условии качественного распознавания режима активности, т.к. не предоставляет информацию о времени, оставшемся до окончания данного режима активности [1]. Следовательно, использование быстрых алгоритмов распознавания фазы активности в ИПС способствует увеличению качества планирования движений элементов ТФП не только для реализации типичных периодических режимов активности, но и в процессе свободного управления ТФП.

Основная часть.

Известно множество методов и алгоритмов распознавания намерений, режимов и фаз активности, которые используются в системах управления ТФП и достаточно подробно описаны в обзоре [4]. Но работы по их совершенствованию продолжаются и в настоящее время. В данной работе предлагается достаточно простой и очень быстрый метод распознавания фазы активности инвалида, основанный на использовании эталонных образов режимов активности, представленных в ИПС в виде матриц моментных инвариантов Ху[8].

Каждый из режимов активности пользователя ТФП может быть исследован экспериментально и представлен в базе данных ИПС в виде набора информативных параметров, к которым могут быть отнесены: углы поворота: бедра (φ_H), голени (φ_K), стопы (φ_A); положение тазобедренного сустава относительно опорной поверхности стопы (y_H); крутящие моменты в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах (T_H , T_K , T_A , соответственно); вертикальная ($VGRF$) и горизонтальная ($HGRF$) составляющие опорной реакции и другие. В настоящее время вопрос о том, какие из этих параметров могут быть выбраны в качестве независимых, остается открытым. Но, в то же время, можно утверждать, что зависимости между приведенными выше и другими параметрами состояния в большинстве случаев нелинейны [9]. Поэтому экспериментальный набор всех возможных параметров, измеренных на некоторой фазе в произвольном режиме активности, можно считать уникальным. Другими словами, информативные параметры, которые могут быть зависимыми на определенном режиме активности, можно считать независимыми на множестве возможных режимов активности. Следовательно, некоторая точка ω в n -мерном параметрическом пространстве активности Ω , может быть представлена набором координат p_{ijk} , $k=1, \dots, n$: $\omega_{ij} = \{p_{ij1}, p_{ij2}, \dots, p_{ijn}\}$, где n – число принятых информативных параметров состояния; i – номер фазы, соответствующий режиму активности с номером j ; p – идентификатор параметра.

Для однозначного представления точки ω в n -мерном пространстве Ω , помимо независимости n параметров, необходимо, чтобы само пространство удовлетворяло условию полноты [10]. Но на практике такое представление невозможно, т.к. неизвестен полный набор независимых параметров, однозначно определяющих активность человека. Т.е., некоторая точка ω теоретически может представлять бесконечное множество состояний (фаз), соответствующих бесконечному множеству режимов активности в пространстве Ω .

Один из подходов, позволяющих снизить степень неопределенности фазы активности, состоит в локализации исследуемого пространства Ω . Т.е., если вместо всех возможных режимов активности исследовать только один, например, нормальную ходьбу по горизонтальной поверхности, то вероятность того, что две или большее число фаз будут представлены одним и тем же набором параметров будет крайне низкой. Но увеличение исследуемой области, путем включения в нее других режимов активности, неизбежно будет приводить к увеличению вероятности появления дополнительных состояний,

соответствующих одному и тому же набору информативных параметров, если их число не соответствует условию полноты пространства активности.

Учитывая отмеченные выше условия, предположим, что фаза активности пользователя ТФП однозначно определяется набором четырех информативных параметров: $\varphi_H, \varphi_K, \varphi_A, VGRF$, которые будем считать условно независимыми. Тогда произвольная точка ω в 4-х мерном параметрическом пространстве, представляется следующим образом: $\omega_{ij} = \{\varphi_{ijH}, \varphi_{ijK}, \varphi_{ijA}, VGRF_{ij}\}$. Множество всех допустимых точек ω_{ij} задает ограниченное пространство активности Ω , которое является объединением подпространств режимов активности $\Omega_j, j=1, \dots, s$, т.е.: $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_s$.

Расположив информативные параметры в лексикографической последовательности:

$\varphi_H < \varphi_K < \varphi_A < VGRF$, и нормируя их так, что $\varphi_{ijH} = \frac{\varphi_{ijH}^*}{\varphi_{ijH}^{\max}}, \varphi_{ijK} = \frac{\varphi_{ijK}^*}{\varphi_{ijK}^{\max}}, \varphi_{ijA} = \frac{\varphi_{ijA}^*}{\varphi_{ijA}^{\max}}, VGRF_{ij} = \frac{VGRF_{ij}^*}{VGRF_{ij}^{\max}}$, где

$\varphi_{ijH}^*, \varphi_{ijK}^*, \varphi_{ijA}^*, VGRF_{ij}^*$ – реальные значения параметров, а $\varphi_{ijH}^{\max}, \varphi_{ijK}^{\max}, \varphi_{ijA}^{\max}, VGRF_{ij}^{\max}$ – модули их максимально возможных значений, можно получить образ точки ω_{ij} . Тогда множество таких образов, расположенных в заданном порядке так, что $0 < 1 < 2 < \dots < N$, будет представлять образ режима активности Ω_j . Наконец, объединение полученных таким путем s образов, дает полный образ ограниченного пространства активности Ω конкретного пользователя ТФП.

Образы фаз активности, режимов активности и пространства потенциально возможной активности человека могут быть получены экспериментально и для наглядности представлены в графической форме. В качестве примера на рисунке 1 показаны диаграммы изменения нормированных информативных параметров для трех типовых режимов активности: нормальная ходьба по горизонтальной поверхности (Ω_1), подъем по ступенькам (Ω_2) и опускание по ступенькам (Ω_3), которые были получены в результате обработки информации от IMU-сенсоров, установленных на бедре, голени, стопе и сенсоров давления, установленных в подошве обуви трех взрослых здоровых мужчин возрастом 22, 23 и 24 года. Легко заметить, что эти диаграммы в общих чертах подобны тем, которые доступны в настоящее время во многих литературных источниках.

На рисунках 2, 3 и 4 показаны графические образы режимов активности, сформированные для 20 фаз на каждом из представленных выше режимов активности: Ω_1, Ω_2 and Ω_3 , соответственно. Легко видеть, что графический образ каждой фазы (ω_{ij}) практически отличается от всех других, что подтверждает его уникальность в исследуемом пространстве активности $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$. Следовательно, задачу распознавания фазы активности пользователя ТФП можно свести к задаче распознавания образов, выбрав при этом надлежащий метод, обеспечивающий высокое качество распознавания в сочетании с высоким быстродействием. С этой точки зрения представляют интерес методы распознавания образов, основанные на использовании моментных инвариантов Ху [8, 10-13].

Предположим, что существует и доступно для исследования эталонное пространство активности Ω , которое представляет все потенциально возможные режимы активности пользователя ТФП. Но даже в таком случае оценить принадлежность реальной фазы активности к определенной области пространства Ω можно лишь приближенно. Это объясняется изменчивостью состояния пользователя и условий окружающей среды, а также систематическими и случайными ошибками реальных сенсорных систем. Т.е., в реальных условиях образ фазы активности пользователя ТФП, определяемый в соответствии с информацией, поступающей от сенсоров, каждый раз будет отличаться от эталонного образа.

В общем случае соотношение между эталонным $f(\Omega)$ и наблюдаемым $g(\Omega)$ образом может быть описано, т.н. функцией деградации, широко используемой в области распознавания изображений [10]:

$$g = D(f),$$

где D – некоторый оператор деградации.

Т.к. оператор D неизвестен или описывается параметрической моделью с неизвестными параметрами, основная задача, решаемая в процессе распознавания, состоит в сопоставлении неизвестного образа $f(\Omega)$, наблюдаемому путем измерения образу $g(\Omega)$, на основе априорной информации о деградации. Ее решение может быть получено на основе

моментных инвариантов X_u [8], которые весьма эффективно используются для распознавания изображений объектов, заданных в виде контуров на плоскости посредством K точек $B_i = \{x_{Bi}, y_{Bi}\}$ [11].

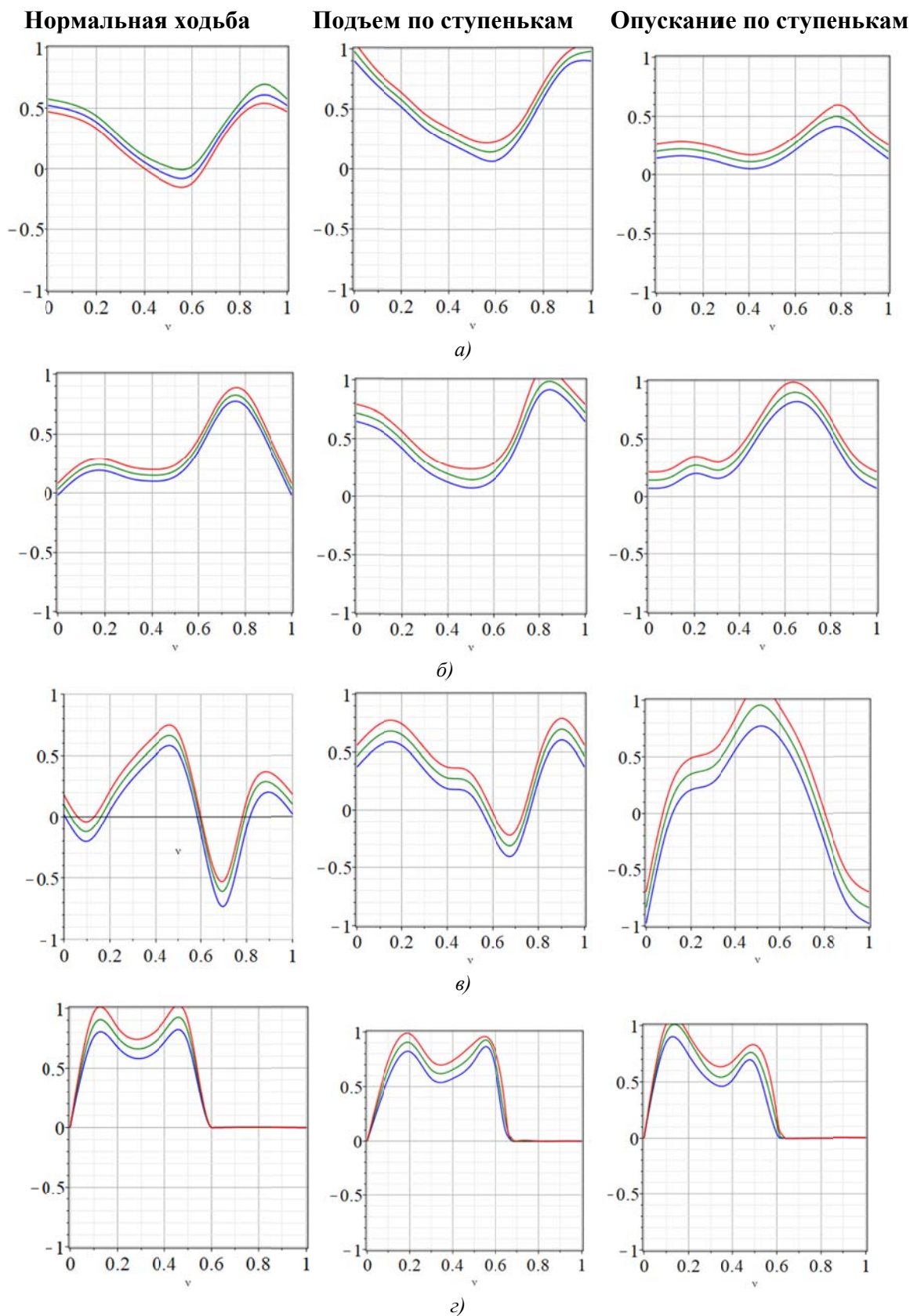


Рисунок 1 – Изменение параметров при различных режимах активности:

а) угол поворота бедра; б) угол поворота голени;

в) угол поворота стопы; г) вертикальная составляющая опорной реакции

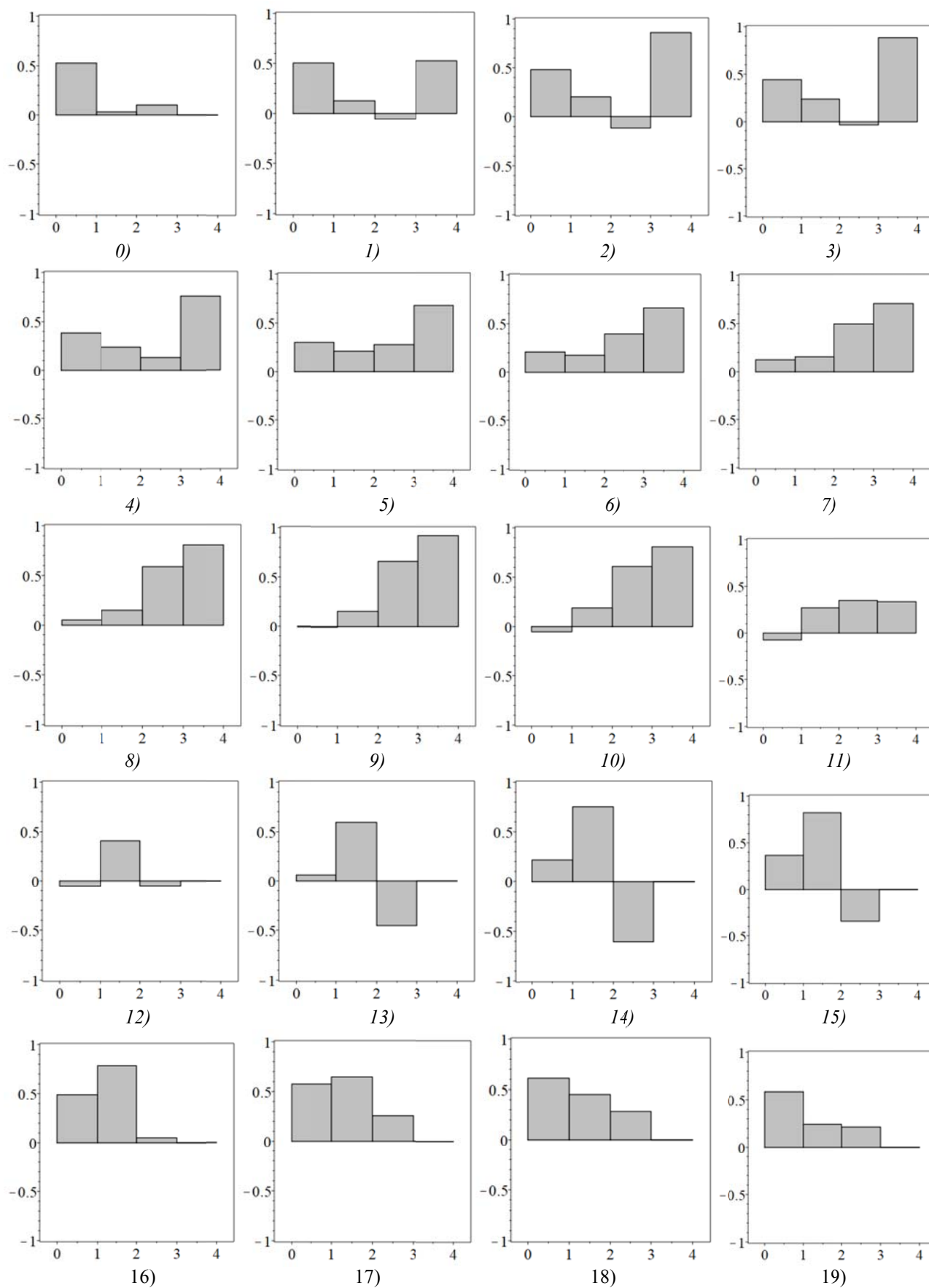


Рисунок 2 – Образ режима активности «нормальная ходьба по горизонтальной поверхности»

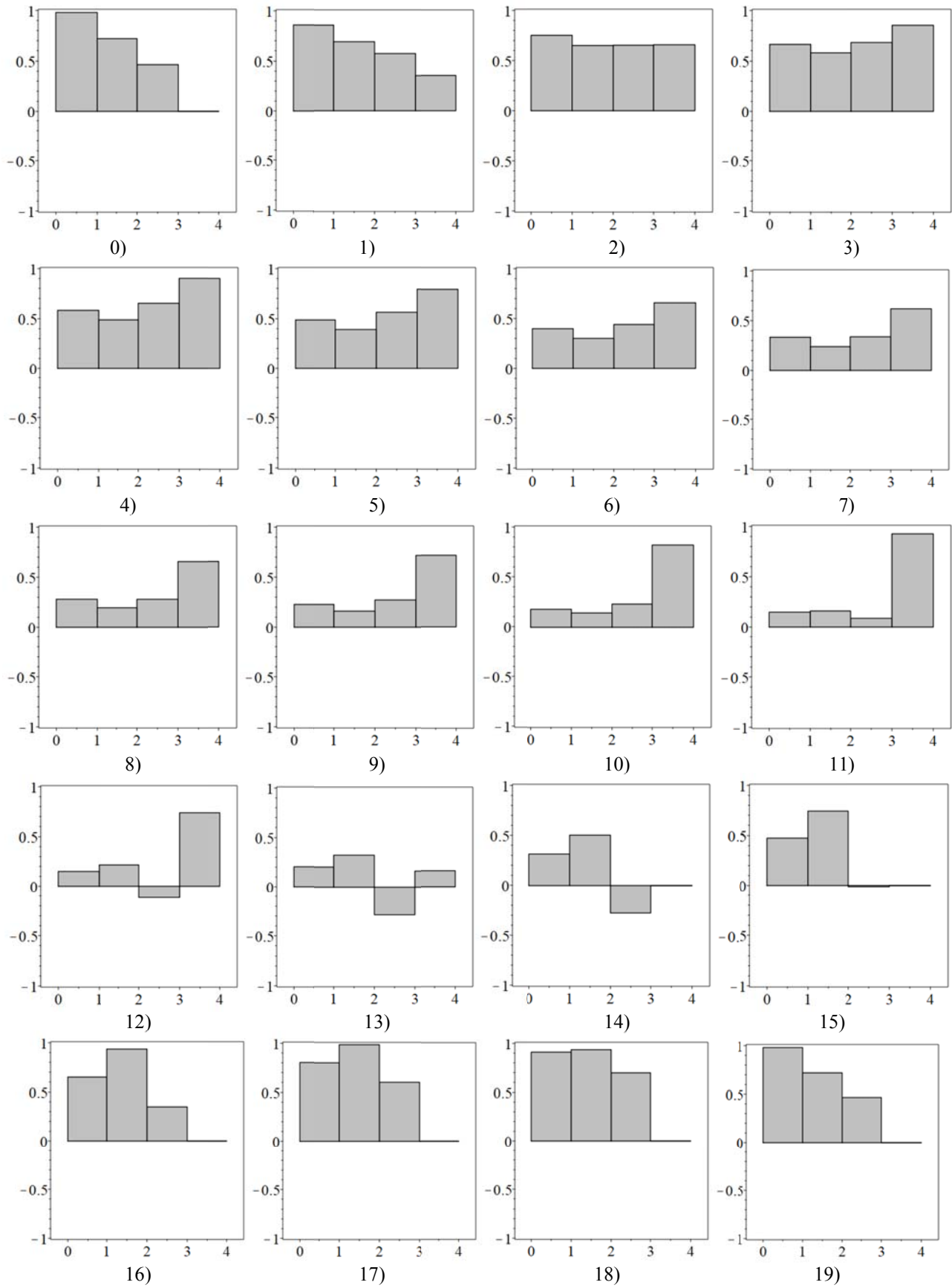


Рисунок 3 – Образ режима активности «подъем по ступенькам»

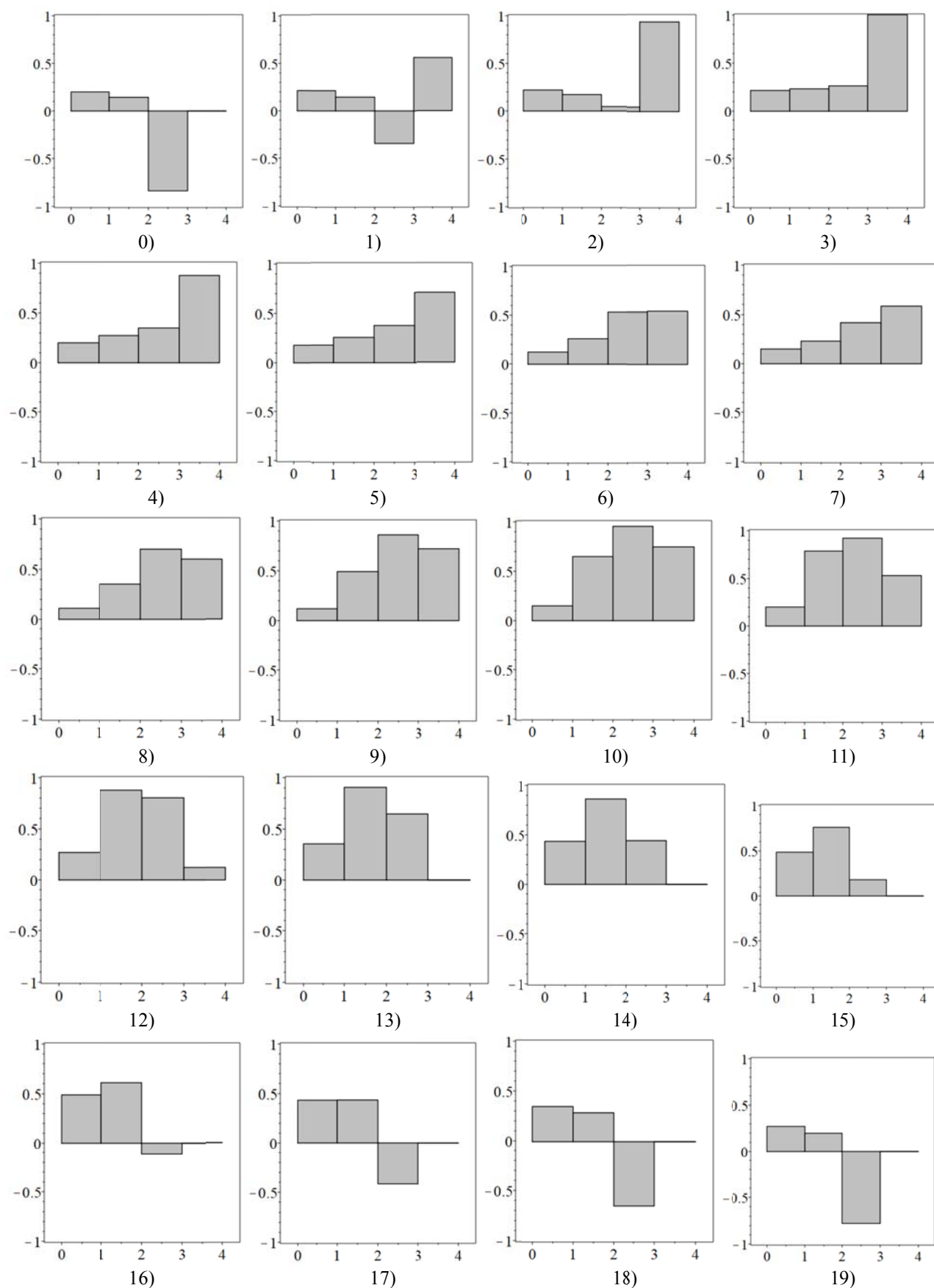


Рисунок 4 – Образ режима активности «опускание по ступенькам»

В рассматриваемой задаче распознавания фазы активности пользователя ТФП, инвариант I можно рассматривать как функционал, определенный в пространстве

активности Ω на множестве допустимых образов фаз Ω_{ij} , который не изменяет своего значения под действием оператора деградации D , т. е. удовлетворяет условию

$$I(f) = I[D(f)]. \quad (1)$$

Учитывая изложенные выше несоответствия и ограничения, на практике условие (1) можно считать выполненным, если $I(f)$ не будет существенно отличаться от $I[D(f)]$ и каждый из этих инвариантов будет принадлежать к одному классу. При этом для успешного решения задачи распознавания необходимо, чтобы значения I для образов фаз, принадлежащих разным классам, отличались друг от друга значительно. Как правило, такую дискриминацию классов с помощью одного инварианта выполнить не удастся. Для выполнения этого условия приходится использовать множество инвариантов I_l , $l = 1, 2, \dots$, которые удастся получить в условиях рассматриваемой задачи.

Так, например, для каждого образа фазы ω_{ij} , могут быть вычислены семь моментов X_u , инвариантных к полной группе аффинных преобразований [8]:

$$I_1 = r \cdot h, \quad I_2 = \frac{M_2}{r^4}, \quad I_3 = \frac{M_3}{r^6}, \quad I_4 = \frac{M_4}{r^6}, \quad I_5 = \frac{M_5}{r^{12}}, \quad I_6 = \frac{M_6}{r^8}, \quad I_7 = \frac{M_7}{r^{12}}, \quad (2)$$

где h – некоторая константа (в данной задаче может быть выбрана произвольно, например, $h=1$);

$\bar{x} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{Bi}$ и $\bar{y} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_{Bi}$ – средние значения координат точек контура образа;

$\mu_{pq} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{Bi} - \bar{x})^p (y_{Bi} - \bar{y})^q$ – центральные моменты порядка $p+q \leq 3$;

$r = \sqrt{\mu_{20} + \mu_{02}}$; M_s , $s = 1, \dots, 7$ – моменты, инвариантные к операциям поворота, переноса и зеркального отображения, определяемые выражениями:

$$\begin{aligned} M_1 &= \mu_{20} + \mu_{02}, \quad M_2 = (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2, \\ M_3 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2, \quad M_4 = (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2, \\ M_5 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] + \\ &\quad + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03})[3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2], \\ M_6 &= (\mu_{20} - \mu_{02})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}), \\ M_7 &= (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] - \\ &\quad - (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})[(3\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2]. \end{aligned}$$

В качестве примера в таблице 1 приведена матрица моментных инвариантов X_u (2), вычисленных для режима активности «нормальная ходьба по горизонтальной поверхности». Аналогичным образом могут быть представлены и матрицы, характеризующие другие режимы активности. Объединение таких матриц дает еще один способ представления образа ограниченного пространства потенциальной активности пользователя ТФП. Это пространство может быть получено в результате экспериментальных исследований двигательной активности здоровых людей, поэтому его, в определенном смысле, можно считать эталонным. Но в процессе обучения пользователя ходьбе с ТФП, пространство активности может быть модифицировано с учетом его индивидуальных особенностей.

С целью обеспечения безопасности и получения исходных данных для планирования оптимальных движений элементов управляемого ТФП, достаточно с высокой степенью надежности сопоставить текущее состояние пользователя определенному дискретному образу фазы ω_{ij} в пространстве режима активности Ω_j , такой, что $\omega_{i-1j} < \omega_{ij} < \omega_{i+1j}$, учитывая возможные ошибки оценки состояния с помощью сенсорной системы.

Предположим, что каждый из сенсоров, используемых для идентификации информативных параметров состояния пользователя, дает приближенное значение параметра для текущего состояния: $p_{csk}^{min} \leq p_{csk} \leq p_{csk}^{max}$. Кроме этого, принимая во внимание тот факт, что типовые режимы активности Ω_j разных пользователей подобны, будем считать, что нормирование информативных параметров, позволяет оценивать их значения независимо от антропометрических данных и физических состояний пользователя. Это позволяет вычислить векторы моментных инвариантов X_u для возможных средних и граничных значений параметров, т.е. для p_{ijk}^{mid} , p_{ijk}^{min} и p_{ijk}^{max} , которые определяются в результате экспериментов. Компоненты таких векторов представляют собой обобщенные координаты пространства инвариантов H_{ij} , определяющие в нем некоторую точку $H_{ij} = \{I_{ijs}, s = 1, \dots, 7\}$.

Таблица 1. Моментные инварианты H_u для 20 фаз режима активности «нормальная ходьба по горизонтальной поверхности»

№ фазы	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
0	4.519	0.929	0.782e-2	0.101e-2	-1.396e-6	-0.739e-3	2.609e-6
1	4.543	0.882	0.373e-2	0.495e-3	-6.637e-7	-0.457e-3	1.105e-7
2	4.611	0.776	0.169e-2	0.340e-3	8.553e-8	-0.207e-3	-2.914e-7
3	4.598	0.794	0.954e-3	0.182e-3	7.231e-8	-0.128e-4	-2.409e-8
4	4.548	0.871	0.944e-2	0.566e-4	-9.382e-9	0.529e-4	-4.076e-9
5	4.526	0.906	0.167e-2	0.152e-3	4.394e-9	-0.600e-4	8.116e-8
6	4.529	0.902	0.465e-2	0.463e-3	-2.843e-7	-0.372e-3	6.473e-7
7	4.548	0.871	0.944e-2	0.951e-3	-2.090e-6	-0.845e-3	1.974e-6
8	4.585	0.817	0.158e-1	0.157e-2	-6.600e-6	-0.140e-2	4.298e-7
9	4.627	0.758	0.224e-1	0.216e-2	-1.328e-5	-0.189e-2	7.082e-6
10	4.599	0.797	0.218e-1	0.226e-2	-1.532e-5	-0.203e-2	4.157e-6
11	4.508	0.937	0.102e-1	0.116e-2	-3.964e-6	-0.111e-2	-5.757e-7
12	4.506	0.941	0.105e-2	0.959e-4	-1.202e-8	-0.801e-4	-2.931e-8
13	4.594	0.806	0.125e-2	0.173e-3	4.013e-8	-0.622e-4	8.811e-8
14	4.682	0.691	0.510e-2	0.640e-3	2.039e-7	-0.239e-3	1.300e-6
15	4.645	0.748	0.383e-2	0.676e-3	2.501e-7	-0.239e-3	1.230e-6
16	4.586	0.841	0.146e-2	0.293e-3	4.517e-8	-0.107e-3	2.173e-7
17	4.559	0.884	0.135e-2	0.206e-3	-1.891e-8	-0.105e-3	1.161e-7
18	4.541	0.908	0.282e-2	0.376e-3	-1.564e-7	-0.233e-3	3.723e-7
19	4.526	0.925	0.508e-2	0.668e-3	-5.598e-7	-0.452e-3	1.146e-6

Точки H_{ij}^{mid} , H_{ij}^{min} , H_{ij}^{max} , порождаемые параметрами p_{ijk}^{mid} , p_{ijk}^{min} и p_{ijk}^{max} , соответственно, характеризуют один и тот же образ фазы активности ω_{ij} и их можно считать однородными элементами пространства J_7 , образующими кластер $Cl_{ij} \subseteq J_7$. Объем и расположение Cl_{ij} в J_7 неявно определяется граничными значениями информативных параметров образа фазы ω_{ij} . Поэтому будем считать, что все точки H_{ij} , порождаемые значениями информативных параметров $p_{ijk}^{min} \leq p_{ijk} \leq p_{ijk}^{max}$, принадлежат кластеру Cl_{ij} , центром которого является точка H_{ij}^{mid} .

Пространство инвариантов J_7 является метрическим, поэтому в нем может быть задана метрика

$$d(H^a, H^b) = \sqrt{\sum_s d(I_s)^2}, \quad (3)$$

где $d(I_s)$ - разность координат с номером s точек H^b и H^a .

Метрика (3) позволяет измерять расстояние $R_a^b: \forall (H^a, H^b) \in J_7$, в том числе и расстояние R_{cs}^{ij} между произвольной точкой H_{cs} , характеризующей текущее состояние пользователя и центром кластера $H_{ij}^{mid} \in Cl_{ij}$. Таким образом, это расстояние может служить мерой, позволяющей судить о принадлежности точки H_{cs} кластеру Cl_{ij} . Фактически это означает, что текущее состояние пользователя, описываемое точкой H_{cs} соответствует фазе активности ω_{ij} , определяемой кластером Cl_{ij} , если R_{cs}^{ij} имеет минимальное значение среди всех расстояний от этой точки до центров кластеров, включенных в J_7 . Если невозможно определить минимальное расстояние R_{cs}^{ij} , можно предполагать, что пользователь совершает движение, не представленное в ИПС в качестве типового режима активности Ω_j . В таком случае HLC переводит MLC в режим свободного управления.

Таким образом, для распознавания фазы активности пользователя ТФП, необходимо выполнить следующие шаги:

- сформировать базу данных эталонных образов i фаз для каждого из j возможных режимов активности в виде множества векторов $H_{ij} = \{I_{ijs}, s = 1, \dots, 7\}$, представляющих центры кластеров $Cl_{ij} \subseteq J_7$;

- определить вектор информативных параметров текущего состояния пользователя $P_{cs} = \{\varphi_{csH}, \varphi_{csK}, \varphi_{csA}, VGRF_{cs}\}$ и вычислить соответствующие ему значения обобщенных координат пространства инвариантов J_7 : $H_{cs} = \{I_{css}, s = 1, \dots, 7\}$;

- вычислить расстояния R_{cs}^{ij} между точками H_{cs} и H_{ij} : $\forall Cl_{ij} \subseteq J_7$ и определить наименьшее среди них;
- принять решение о принадлежности текущего состояния кластеру Cl_{ij} и сопоставить это состояние фазе активности ω_{ij} .

Однако при этом следует учитывать тот факт, что пространство J_7 крайне неоднородно и обобщенные координаты центров кластеров, характеризующих фазы активности значительно отличаются друг от друга (см. данные таблицы 1). Следовательно, обобщенные координаты векторов H_{ij} и H_{cs} , имеющие существенно меньшие значения по сравнению с другими, практически не будут оказывать влияния на величину расстояния R_{cs}^{ij} между точками в J_7 . В то же время такие обобщенные координаты очень чувствительны к возможным ошибкам сенсорной системы [11] и, следовательно, оказываются эффективными для уточнения принадлежности точки H_{cs} определенному кластеру Cl_{ij} .

Учитывая отмеченные выше особенности, для предварительной оценки принадлежности точки H_{cs} кластеру Cl_{ij} может быть выбрано пространство отображения J_4 , описываемое обобщенными координатами $\{I_1, I_2, I_3, I_4\}$. В случае получения явно выраженного минимального расстояния R_{cs}^{ij} в J_4 , уже на данном этапе можно принять решение о принадлежности точки H_{cs} кластеру Cl_{ij} и, следовательно, о соответствии текущего состояния пользователя фазе активности ω_{ij} . Если же при исследовании этого пространства будет получено несколько близких по величине малых расстояний: $R_{cs}^{ij}, R_{cs}^{(i+1)j}, \dots, R_{cs}^{i(j+1)}, \dots$, оценку принадлежности точки H_{cs} кластеру Cl_{ij} следует уточнить, выполнив анализ пространства отображения J_3 , описываемого с помощью обобщенных координат $\{I_5, I_6, I_7\}$. В случаях, когда невозможно определить явно выраженного минимального расстояния R_{cs}^{ij} , принимается решение о переходе MLC в режим свободного управления.

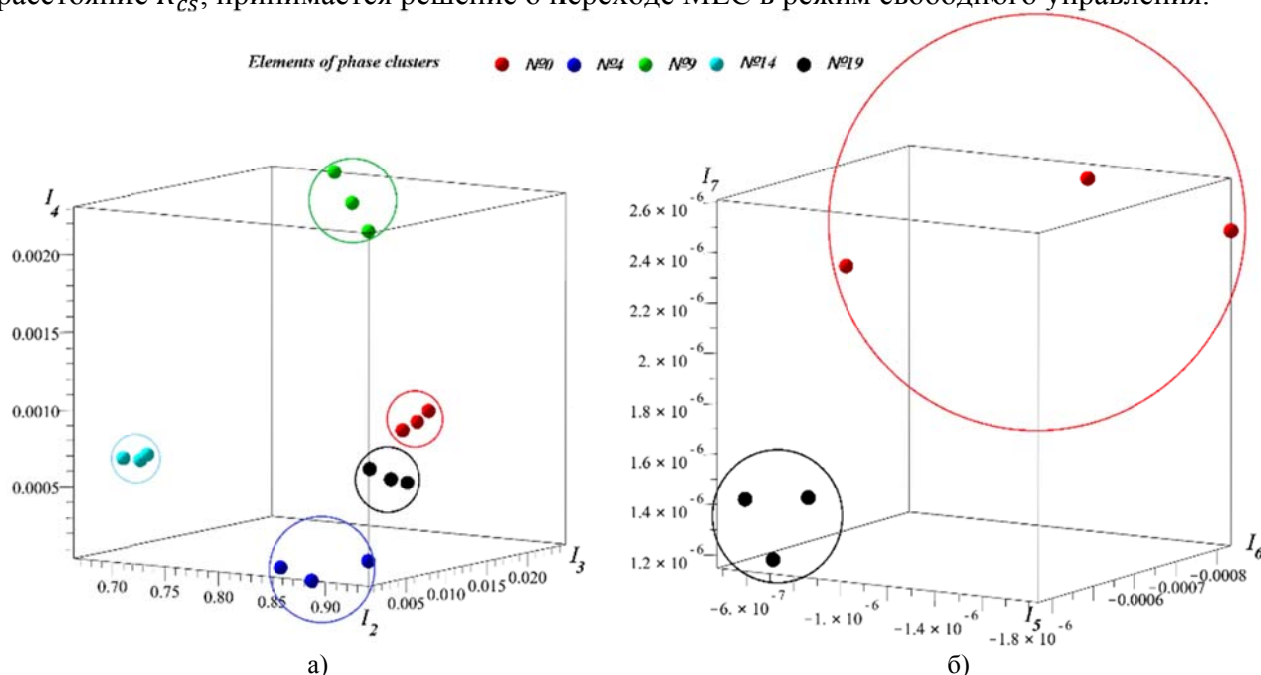


Рисунок 5 – Кластеры в режиме активности Ω_1 («нормальная ходьба по горизонтальной поверхности»):
 а) в гиперплоскости P_3 с обобщенными координатами $\{I_2, I_3, I_4\}$ на фазах активности 0, 4, 9, 14, 19; б) в пространстве J_3 с обобщенными координатами $\{I_5, I_6, I_7\}$ на фазах активности 0, 19

В качестве примера на рисунке 5 а показаны кластеры в гиперплоскости P_3 пространства инвариантов J_4 , которая описывается обобщенными координатами $\{I_2, I_3, I_4\}$. Каждый кластер в P_3 представлен тремя точками, координаты которых вычислены с использованием параметров p_{ijk} , p_{ijk}^{min} и p_{ijk}^{max} на фазах активности 0, 4, 9, 14, 19, соответствующих режиму активности Ω_1 («нормальная ходьба по горизонтальной поверхности»).

Визуальный анализ рисунка 5а показывает, что кластеры Cl_{01} и Cl_{191} расположены в гиперплоскости P_3 относительно близко по отношению друг к другу. Поэтому расстояния R_{cs}^{01} и R_{cs}^{191} , вычисляемые от центров этих кластеров до некоторой точки H_{cs} могут отличаться незначительно. В таких случаях решение о классификации точки H_{cs} и ее соответствии определенной фазе активности целесообразно уточнить по результатам анализа пространства отображения J_3 , описываемого обобщенными координатами $\{I_5, I_6, I_7\}$. Фрагмент этого пространства, включающего кластеры Cl_{01} и Cl_{191} , показан на рисунке 5 б.

Проиллюстрируем процесс распознавания фазы активности на простом примере. Предположим, что в результате экспериментов сформирована база данных эталонных образов режимов активности Ω_1 , Ω_2 и Ω_3 и измерено текущее состояние пользователя ТФП, характеризующееся следующими нормированными информативными параметрами: $\varphi_H = 0.0739557$, $\varphi_K = 0.106382$, $\varphi_A = 0.414937$, $VGRF = 0.623085$. Следовательно, образ текущей фазы активности ω_{cs} представляет собой вектор:

$$\omega_{cs} = \{0.0739557, 0.106382, 0.414937, 0.623085\},$$

которому соответствует точка H_{cs} в пространстве J_7 :

$$H_{cs} = \{I_{csk}, k = 1, 2, \dots, 7\} = \\ = \{4.534, 0.895, 0.772e - 2, 0.786e - 3, -0.162e - 6, -0.728e - 3, 0.108e - 7\}.$$

На рисунке 6 показаны диаграммы расстояний R_{cs}^{ij} от точки H_{cs} до центров кластеров Cl_{ij} ($i = 0, 2, \dots, 20; j = 1, 2, 3$) в гиперплоскости P_3 .

Элементарный анализ диаграмм позволяет предположить, что в рассматриваемом примере однозначно определить наименьшее расстояние R_{cs}^{ijmin} в гиперплоскости P_3 , не представляется возможным, если учесть, что:

- база эталонных образов режимов активности формируется на основе усредненных данных, полученных для дискретных фаз активности;
- текущая фаза активности пользователя ТФП может отличаться от дискретной фазы, представленной в базе эталонных образов режимов активности;
- сенсорная система приближенно оценивает текущее состояние пользователя ТФП.

Следовательно, для принятия окончательного решения о принадлежности текущей фазы активности к какому-либо кластеру, целесообразно выполнить анализ пространства J_3 , выбрав для этого ряд кластеров, расстояния от центров которых до точки H_{cs} в гиперплоскости P_3 относительно невелики.

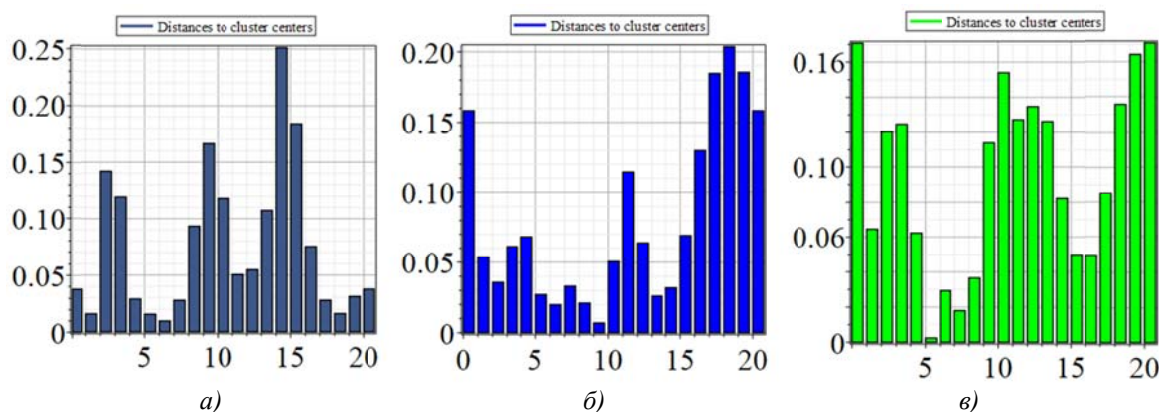


Рисунок 6 – Расстояния R_{cs}^{ij} от точки H_{cs} до центров кластеров Cl_{ij} в гиперплоскости P_3 для $i=0, 2, \dots, 20$:

а) R_{cs}^{i1} ; б) R_{cs}^{i2} ; в) R_{cs}^{i3}

В данном примере на каждом режиме активности было выбрано по 5 таких кластеров $Cl_{ij}; j = 1: i = 1, 5, 6, 7, 18; j = 2: i = 5, 6, 8, 9, 13; j = 3: i = 5, 6, 7, 8, 15$.

Диаграммы расстояний R_{cs}^{ij} от точки H_{cs} до центров Cl_{ij} в пространстве J_3 , показаны на рисунке 7. Их анализ позволяет сделать вывод о том, что вектор информативных параметров, используемый в данном примере, не позволяет однозначно сопоставить точку H_{cs} единственному кластеру, т.к. расстояния от этой точки до центров ближайших кластеров в пространстве J_3 практически равны друг другу: $R_{cs}^{71} \approx R_{cs}^{63}$. Такой результат может быть

получен только в случаях, когда образ текущей фазы активности и образы ближайших к ней фаз активности слабо отличаются друг от друга. Сопоставляя образы фаз активности $\omega_{cs}, \omega_{71}, \omega_{63}$, легко убедиться в том, что именно такой случай имеет место в условиях рассматриваемого примера (рисунок 8).

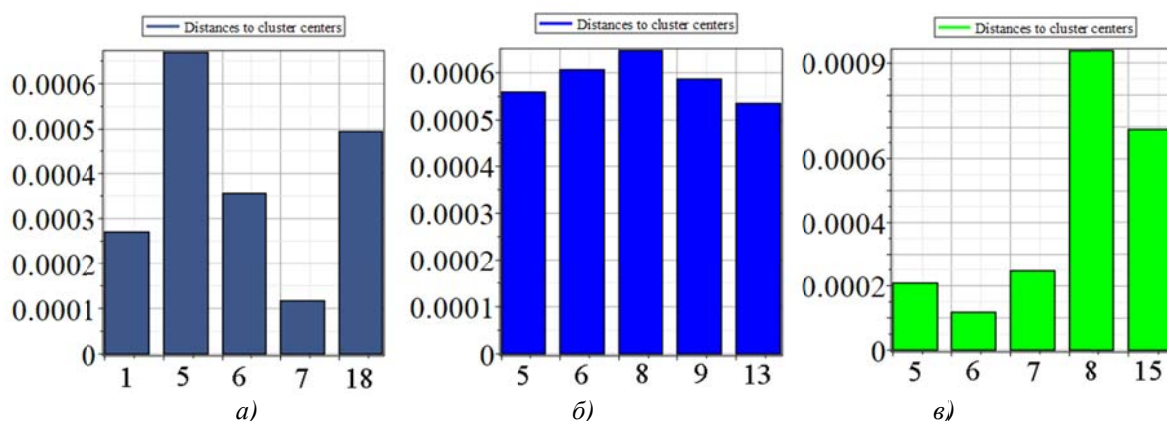


Рисунок 7 – Расстояния от точки H_{cs} до центров кластеров в пространстве J_3 :
а) $R_{cs}^{i1}, i = 1, 5, 6, 7, 18$; б) $R_{cs}^{i2}, i = 5, 6, 8, 9, 13$; в) $R_{cs}^{i3}, i = 5, 6, 7, 8, 15$

Обоснованный в данной работе метод распознавания основан на представлении фазы активности пользователя ТФП в виде искусственно создаваемого образа. Тем не менее такой искусственный образ приближенно характеризует некоторое состояние пользователя в пространстве всех возможных состояний и может быть использован для его сопоставления определенной фазе активности. При этом предполагается, что образ каждой фазы уникален и может быть представлен в пространстве J_7 в виде вектора, компонентами которого являются моментные инварианты X_u .

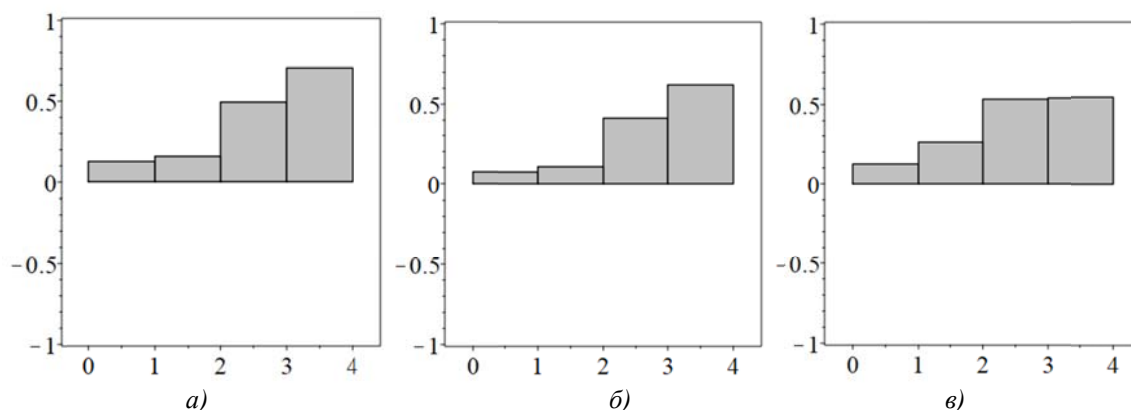


Рисунок 8 – Образы фаз активности пользователя ТФП: а) ω_{71} ; б) ω_{cs} ; в) ω_{63}

Если учесть, что искусственные образы фаз активности не подвержены перемещениям и поворотам в пространстве и изменяют свою форму только за счет изменения вертикальной составляющей изображения, то набор всех моментных инвариантов X_u оказывается избыточным для решения задачи их распознавания. Но это дает возможность выполнить расслоение пространства J_7 на два подпространства J_4 и J_3 , в каждом из которых распознавание образов фаз может быть выполнено независимо. При этом результаты распознавания в пространстве J_4 и, в частности, в его гиперплоскости P_3 , являются более значимыми, т.к. инварианты I_2, I_3, I_4 менее чувствительны к погрешностям измерений информативных параметров, чем инварианты I_5, I_6, I_7 [11]. В связи с этим подпространство J_3 в данном методе используется лишь в случае необходимости принятия уточненного решения о соответствии текущего состояния пользователя ТФП определенной фазе активности.

Наиболее важным преимуществом предложенного в данной работе алгоритма распознавания по сравнению с другими, является время его реализации, которое, вследствие

использования минимального числа арифметических и логических операций, оказывается существенно меньшим по сравнению с «критическим временем» распознавания. Это дает возможность увеличить время, необходимое для принятия в ИПС обоснованного решения о дальнейшем режиме движения, что, в свою очередь, повышает безопасность пользователя ТФП.

Необходимо также отметить, что по сравнению с нейросетевыми методами, успешно используемыми как в практике распознавания образов, так и в практике распознавания режимов активности, предложенный алгоритм распознавания не требует процедуры обучения. Для его практической реализации требуется только множество координат искусственно созданных образов, которые оказываются подобными для большинства здоровых людей, относящихся к определенной группе физической активности. При этом, даже если текущее состояние пользователя определяется сенсорной системой ТФП с некоторыми погрешностями, образ этого состояния оказывается близким по форме к эталонному образу. Фактически это дает возможность с высокой степенью надежности определить принадлежность текущего состояния к определенной области реализуемого пользователем режима активности и снижает вероятность генерирования в СПС движущих моментов в шарнирах ТФП, которые могут приводить к появлению «критических ошибок».

Метод был протестирован на множестве векторов $\omega = \{\omega_k, k = 1, \dots, 4\} = \{\varphi_P, \varphi_K, \varphi_A, GRF\}$, координаты которых случайным образом выбирались внутри отрезков $\omega_k^{min} \leq \omega_k^{mid} \leq \omega_k^{max}$ на заданной фазе определенного эталонного режима активности. При этом заданная фаза могла отличаться от дискретного перечня фаз в режиме активности, т.е.: $\omega_{ij} \leq \omega_{i+j} \leq \omega_{(i+1)j} : i \leq i^* \leq i + \delta, i = 0, 2, \dots, 20; 0 \leq \delta \leq 1.0$. В большинстве случаев классификация задаваемого таким образом «текущего состояния» при использовании данного метода была выполнена правильно. В некоторых тестовых примерах, один из которых был описан ранее, были получены неоднозначные решения задачи распознавания, которые не позволяли отнести «текущее состояние» к определенной фазе активности. Можно предполагать, что при некоторых значениях координат векторов состояния пользователя ω , даже при выполнении условий $\omega_k^{min} \leq \omega_k^{mid} \leq \omega_k^{max}$, возможна неправильная классификация «текущего состояния», но в выполненных нами тестовых исследованиях такие решения не были получены. При этом необходимо отметить, что во многих случаях, в которых в качестве координат векторов состояния выбирались граничные значения информативных параметров, принять однозначное решение о классификации «текущего состояния» было невозможно.

Результаты тестов показали, что по эффективности предлагаемый метод не уступает нейросетевым и нейронечетким методам, но требует существенно меньших затрат машинного времени для решения задач распознавания фаз активности. Его эффективность существенно увеличивается при распознавании фаз конкретных режимов активности, реализуемых пользователем ТФП в данный момент времени, т.к. различие образов фаз внутри конкретного режима более заметно, чем на всем пространстве активности, доступном пользователю.

Заключение.

В данной работе обоснован метод быстрого распознавания фазы активности пользователя ТФП, основанный на свойствах моментных инвариантов Ху. Его использование в ИСУ позволит существенно уменьшить время распознавания фазы и свести к минимуму критические ошибки, способствующие потере равновесия пользователя ТФП в различных режимах активности. Оценка вероятности успешного распознавания фазы на основе данного метода является предметом отдельного исследования, поэтому в данной работе не рассматривалась.

Метод может быть использован для распознавания фазы во всем пространстве активности, доступном конкретному пользователю. При этом одновременно распознается и режим активности, реализуемый пользователем в данный момент времени. Однако в таком варианте возможность ошибочной классификации текущего состояния оказывается наибольшей. Более эффективным этот метод оказывается при определении фазы на заданном режиме активности, т.к. образы фаз в этом случае в большей степени отличаются друг от друга. В связи с этим в алгоритмах ИСУ целесообразно использовать подсистемы

распознавания режимов активности, основанные, например, на longshort-term memory (LSTM) networks, позволяющих использовать временные зависимости потоков данных сенсоров [14]. Однако можно предполагать, что модификация использованного нами подхода к конструированию искусственных образов фаз, может привести к появлению у них более заметных различий, что, в свою очередь, позволит существенно увеличить надежность их распознавания, в том числе и во всем пространстве активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poliakov, A. Transfemoral prostheses control in a frame of intellectual-synergetic concept/A, Poliakov, V. Pakhaliuk, V.Kolesova, P.Shtanko, MOvchinnikova// Proc. of the 2017 2nd Int. Conf. on Autom., Mech. and Elect. Eng. (Ameec 2017). – 2017. – Vol. 87. – P. 245-253.
2. Varol, H.A. Multiclass real-time intent recognition of a powered lower limb prosthesis/ H.A. Varol, F. Sup, M. Goldfarb// IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 57, No3. – P.542–551.
3. Poliakov, A. Biosimilar artificial knee for transfemoral prostheses and exoskeletons/A. Poliakov, V. Pakhaliuk, N.Loizinskiy, M.Kolesova, P.Bugayov, P. Shtanko//FactaUnivesitatis. Series Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 14, No3. – P. 321-328.
4. Tucker, M.R. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review/ M.R.Tucker, J. Olivier, A.Pagel, H.Bleuler, M.Bouri, O.Lambercy, J.-R. Millan, R. Riener, H. Vallery, R.Gassert//Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2015. – Vol.12, No1. – P. 1-29.
5. Huang, H. Continuous locomotion-mode identification for prosthetic legs based on neuromuscular mechanical fusion/H.Huang, F. Zhang, L.J. Hargrove, Z. Dou, D.R. Rogers, K.B. Englehart//IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2011. – Vol. 58, No10. – P. 2867-2875.
6. Zhang, F. Preliminary study of the effect of user intent recognition errors on volitional control of powered lower limb prostheses/ F. Zhang, M. Liu, H. Huang// Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. -2012. – P. 2768-2771.
7. Zhang, F. Effects of locomotion mode recognition errors on volitional control of powered above-knee prostheses/F. Zhang, M. Liu, H. Huang// IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2014. – Vol. 23, No1. – P. 64-72.
8. Hu, M.K. Visual pattern recognition by moment invariants/M.K. Hu//IRE Transactions on Information Theory. – 1962. – Vol. 8, No2. – P. 179-187.
9. Бернштейн, Н.А. О ловкости и ее развитии/Н.А. Бернштейн. – М.: Физическое воспитание и спорт. – 287 с.
10. Flusser, J. Moments and moment invariants in pattern recognition/J. Flusser, T. Suk, B.Zitova. – Chichester: John Wiley and Sons Ltd Pub. – 294 p.
11. Абрамов, Н.С. Распознаваниеосновеинвариантныхмоментов/Н.С. Абрамов, Н.С. Хачумов//Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. – 2014. - №2. – С. 142-149.
- 12.Arafah, M. Efficient image recognition technique using invariant moments and principle component analysis/M.Arafah, Q.A. Moghli//Journal of Data Analysis and Information Processing. – 2017. – Vol. 5. – P. 1-10.
13. Al-Azzo, F.3D Human action recognition using Hu moment invariants and euclidean distance classifier/F. Al-Azzo, A.M. Taqi, M.Milanov//International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2017. – Vol. 8, No4. – P. 12-21.
14. Hochreiter, S. Long short-term memory/S.Hochreiter, J.Schmidhuber// Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, No. 8. – P. 1735-1780.

Поляков Александр Михайлович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»;
кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение и техническая механика»;
ул. А. Косарева, 14а, г. Севастополь, Россия;
Тел.: +7 978 703 88 26
E-mail: a.m.poliakov@sevsu.ru

A.M. POLIAKOV

RECOGNITION OF MOTOR ACTIVITY PHASE AT THE WALKING OF INVALIDE ON THE TRANSFEMORAL PROSTHESIS

Abstract. *Incorrect recognition of the phase of motor activity when walking on a controlled prosthesis can lead to loss of stability of the disabled person with a subsequent fall. The likelihood of a fall also increases in the case of exceeding the critical time or critical errors in the recognition of the activity phase and the associated incorrect commands generated by the prosthetic control system. In this connection, the quality of the algorithms for recognizing the phase of activity and the intentions of the disabled person to effect this or that motor action in the near future has a*

direct impact on the level of his safety during walking. In this paper, developed the method for the rapid recognition of the phase of the motor activity of a disabled person with walking on a controlled transfemoral prosthesis is based on the properties of the moment invariants H_u , the use of which in intelligent control systems will minimize critical errors, the time of recognition of the regime and the activity phase, and, consequently, improve the safety of the disabled in the process of walking.

Keywords: controlled transfemoral prosthesis, walking safety on the prosthesis, motor activity mode, motor activity phase, recognition, moment invariants H_u .

BIBLIOGRAPHY

1. Poliakov, A. Transfemoral prostheses in the frame of the intellectual-synergetic concept / A. Poliakov, V. Pakhaliuk, V. Kolesova, P. Shtanko, M. Ovchinnikova // Proc. of the 2017 2nd Int. Conf. on Autom., Mech. and Elect. Eng. (Amee 2017). - 2017. - Vol. 87. - P. 245-253.
2. Varol, H.A. Multiclass real-time intent recognition of a powered lower limb prosthesis / H.A. Varol, F. Sup, M. Goldfarb // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. - 2010. - Vol. 57, No. 3. - P. 542-551.
3. Poliakov, A. Biosimilar artificial knee for transfemoral prostheses and exoskeletons / A. Poliakov, V. Pakhaliuk, N. Lozinskiy, M. Kolesova, P. Bugayov, P. Shtanko // FactaUnivesitatis. Series Mechanical Engineering. - 2016. - Vol. 14, No. 3. - P. 321-328.
4. Tucker, M.R. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review / M.R. Tucker, J. Olivier, A. Pagel, H. Bleuler, M. Bouri, O. Lambercy, J.-R. Millan, R. Riener, H. Vallery, R. Gassert // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. - 2015. - Vol. 12, No. 1. - P. 1-29.
5. Huang, H. Continuous locomotion-mode identification for prosthetic legs based on neuromuscular mechanical fusion / H. Huang, F. Zhang, L.J. Hargrove, Z. Dou, D.R. Rogers, K.B. Englehart // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. - 2011. - Vol. 58, No. 10. - P. 2867-2875.
6. Zhang, F., Zhang, M. Liu, H. Huang, Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. - 2012. - P. 2768-2771.
7. Zhang, F. Effects of locomotion mode recognition errors on volitional control of powered above-knee prostheses / F. Zhang, M. Liu, H. Huang // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2014. Vol. 23, No. 1. - P. 64-72.
8. Hu, M.K. Visual pattern recognition by moment invariants / M.K. Hu // IRE Transactions on Information Theory. - 1962. - Vol. 8, No. 2. - P. 179-187.
9. Bernstein, N.A. Tendency of its development / N.A. Bernshteyn. - M.: Physical education is an import. - 287 sec.
10. Flusser, J. Moments and moment invariants in pattern recognition / J. Flusser, T. Suk, B. Zitova. - Chichester: John Wiley and Sons Ltd Pub. - 294 p.
11. Abramov, N.S. Recognition of the basis of invariant moments / N.S. Abramov, N.S. Khachumov // Bulletin of the Russian University of Peoples' Friendship. Series: Mathematics, computer science, physics. - 2014. - №2. - P. 142-149.
12. Arafah, M. Efficient image recognition technique using invariant moments and principle component analysis / M. Arafah, Q.A. Moghli // Journal of Data Analysis and Information Processing. - 2017. - Vol. 5. - P. 1-10.
13. Al-Azzo, F. 3D Human action recognition using H_u moment invariants and euclidean distance classifier / F. Al-Azzo, A.M. Taqi, M. Milanova // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. - 2017. - Vol. 8, No. 4. - P. 12-21.
14. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. - 1997. - Vol. 9, No. 8. - P. 1735-1780.

Poliakov Aleksandr Mihailovich

Sevastopol State University;

PhD, associate professor of the chair of Engineering Science and Technical Mechanics;

A. Kosareva str., 14a, Sevastopol, Russian Federation;

Phone: +7 978 703 88 26

E-mail: a.m.poliakov@sevsu.ru

ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 519.3:05.011.56:621.865.8

А.И. БОХОНСКИЙ, А.И. РЫЖКОВ

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ С УПРУГОЙ РУКОЙ

Аннотация. В цилиндрической системе координат исследовано оптимальное управление поступательным и вращательным движениями упругой руки манипулятора, найденное с привлечением реверсионного принципа оптимальности (РПО). С использованием моментных соотношений в относительном движении упругой руки (колебаний руки) определялось минимально возможное время для достижения абсолютного покоя центра масс схвата в конечном положении руки.

Ключевые слова: манипулятор, цилиндрические координаты, упругая рука, оптимальное управление, минимальное время движения, достижение абсолютного покоя.

Введение

Оптимальному управлению движением систем посвящены работы [1–6]. Синтез оптимальных управлений (конструирование) движением упругих систем с привлечением реверсионного принципа оптимальности (РПО) отражен в работах [7–12]; показано, что в отдельных случаях не исключается некоторая экономия энергии на реализацию управления (по сравнению с ранее известными управлениями).

Актуальной задачей проектирования манипуляторов продолжает оставаться задача повышения его производительности (сокращения времени транспортирования объектов) без потери точности позиционирования. Если звенья манипулятора обладают конечной жесткостью, то, как известно, их быстрые поступательные и вращательные движения порождают колебания, обусловленные деформированием упругих звеньев.

В [7] исследованы такие оптимальные движения упругих объектов, для которых исключаются их колебания при достижении конечной цели. В [10] исследована динамика манипулятора с конечным числом степеней свободы при использовании оптимальных управлений (ускорений) в виде:

$$U_e(t) = \frac{Lp^2}{2\pi} \sin(pt) \quad \text{— для поступательного движения; } U_\varphi(t) = \frac{\varphi_1 p^2}{2\pi} \sin(pt) \quad \text{— для}$$

вращательного звена.

Как показано в [8–12], существует достаточно широкий класс кососимметричных оптимальных управлений, позволяющих быстро перемещать упругие объекты (разгон, торможение, разгон–торможение) с достижением относительного либо абсолютного покоя.

Важным свойством проектируемого манипулятора должно быть обеспечение возможности совмещения движений звеньев – поступательных и вращательных.

Основная часть

Цель исследований – анализ оптимальных отдельных и совмещенных движений упругой руки манипулятора с использованием управления, сконструированного согласно РПО.

Реализация управлений манипулятором с упругой рукой иллюстрируется на примере модели, которая исследовалась в работе [13].

Для манипулятора с тремя степенями свободы (рисунок 1) движение описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}
 (m_1 + m_2 + m_3) \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} &= F_1(t), \\
 \frac{d}{dt} [I_1 + I_2 + m_2 x^2 + m_3 (x + l_0)^2] \dot{\varphi} &= M(t), \\
 (m_2 + m_3) \frac{d^2 x}{dt^2} - \dot{\varphi}^2 [x(m_2 + m_3) + m_2 l_0] &= F_2(t),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

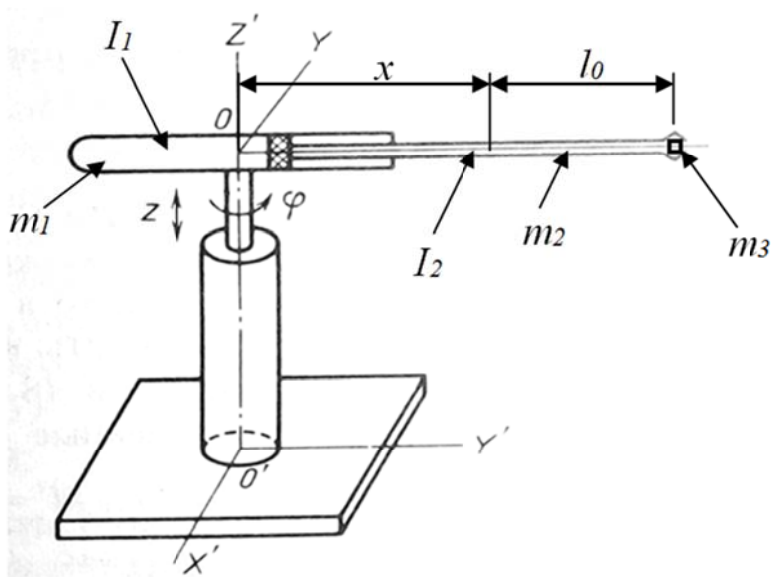


Рисунок 1 – Манипулятор с тремя степенями свободы

где m_1 – суммарная масса вала и направляющей, кг;
 m_2 – масса выдвигающейся части руки, обладающей конечной жесткостью, кг;
 m_3 – масса перемещаемого груза, кг;
 I_1 – суммарный момент инерции вала и направляющей относительно оси вращения, кг·м²;
 I_2 – момент инерции выдвигающейся части руки относительно собственной оси, проходящей через ее центр масс, кг·м²;
 x – расстояние от оси вращения руки до центра масс выдвигающейся телескопической части, м;
 z – высота подъема руки, м;
 l_0 – расстояние от оси вращения до центра масс схвата с грузом, м.

Управления (ускорения) поступательного и вращательного движений конструировались согласно алгоритму РПО: задание линейных (либо угловых) функций перемещений в виде полиномов (с учетом косо́й симметрии управлений, краевых условий и цели движения); факторизация полинома, восстановление уравнения Эйлера–Пуассона и функционала–критерия, который принимает стационарное значение.

Для упругой системы выбор времени движения осуществляется из множества общих корней системы трансцендентных управлений, в которые превращаются моментные соотношения ($x_r(T) = 0, \dot{x}_r(T) = 0$).

Ускорение (управление) при оптимальном поступательном переносном движении задается полиномом

$$U_e(t) = \sum_{i=1}^5 C_i t^{i-1} \tag{2}$$

с условиями: при $t = 0, U_e(0) = a$; $t = T, U_e(T) = -a, S_e(T) = L$,

$$\int_0^{T/2} U_e(t)dt + \int_{T/2}^T U_e(t)dt = 0; \quad (3)$$

$$\text{при } t = T/2, \quad U_e(T/2) = 0, \quad \dot{U}_e(T/2) = 0.$$

После факторизации полином (2) принимает вид

$$U_e(t) = \frac{a(T-2t)^3}{T^5}, \quad (4)$$

где $a = \frac{10L}{T^2}$. Интегрируя выражения (4) с учетом начальных условий ($S_e(0) = 0$, $V_e(0) = 0$

– движение из состояния покоя), получим:

$$S_e(t) = \frac{at^2}{10T^3}(-4t^3 + 10t^2T - 10Tt^2 + 5T^3), \quad (5)$$

$$V_e(t) = \frac{at}{T^3}(T-t)(2t^2 - 2tT + T^2),$$

где L – максимальное перемещение руки (по оси z).

При оптимальном вращении руки принято управление (угловое ускорение)

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\varepsilon_0(T-2t)^3}{T^3}, \quad (6)$$

где угловое ускорение $\varepsilon_0 = \frac{10\varphi_1}{T^2}$.

В обоих случаях при раздельном либо совмещенном движениях дифференциальное уравнение изгибных колебаний руки (как упругой системы с сосредоточенной массой) относительного движения

$$\frac{d^2x_r}{dt^2} + k^2x_r = -U_e, \quad (7)$$

где k – частота собственных колебаний.

При использовании моментных соотношений ($x_r(T) = 0, \dot{x}_r(T) = 0$), после ряда преобразований в случае вращательного и поступательного движений получена система трансцендентных уравнений, которая инвариантна к рассмотренным видам движения.

Принято $T = \frac{2\pi n}{k}$,

где n – подлежащая определению константа. Моментные соотношения образуют систему трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned} 3(2 - \pi^2 n^2) \cdot \sin(2\pi n) + \pi n(\pi^2 n^2 - 6) \cdot \cos(2\pi n) + \pi^3 n^3 - 6\pi n &= 0, \\ 3(2 - \pi^2 n^2) \cdot \cos(2\pi n) + \pi n(6 - \pi^2 n^2) + 3\pi^2 n^2 - 6 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

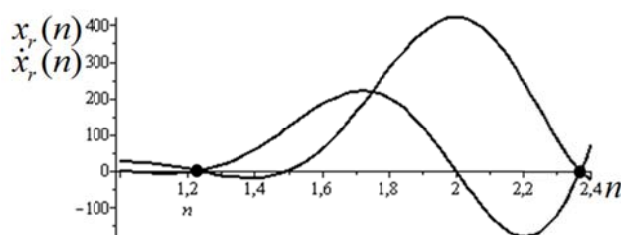


Рисунок 2 – Графики $x_r(n)$, $\dot{x}_r(n)$ (два общих корня)

Два общих корня видны на графике, рисунок 2. Наименьший корень $n=1.231935$ найден (рисунок 3) в интервале $1.23192 < n < 1.23196$. При $k=4\pi \text{ с}^{-1}$ общее время движения $T=0,616 \text{ с}$.

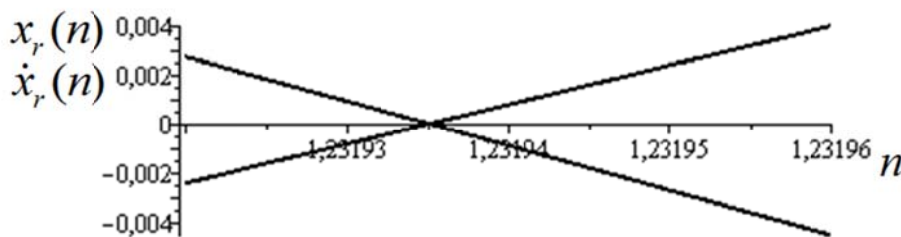


Рисунок 3 – Графическое уточнение общего корня

Графики переносного движения $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$ изображены на рисунках 4, а относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$ – на рисунке 5.

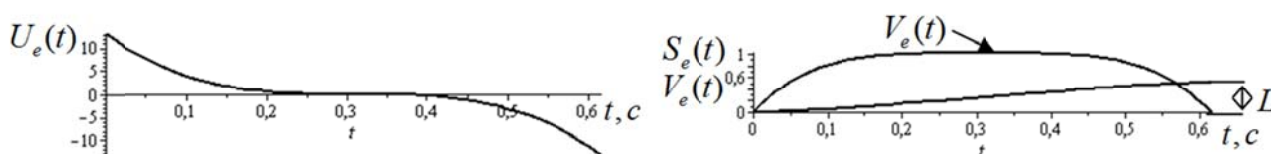


Рисунок 4 – Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$

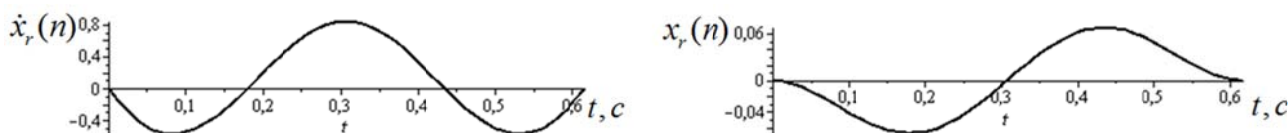


Рисунок 5 – Графики относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$

Из графиков следует, что при перемещении на $L=0,5 \text{ м}$ наступает абсолютный покой как суперпозиция переносного и относительного покоя. Изгибные колебания данной упрощенной модели руки при переносном поступательном и вращательном движениях практически не отличаются.

При известных законах оптимального управления из системы дифференциальных уравнений (1) находятся усилия в приводах, которые обеспечивают реализацию таких движений.

Преимущество реверсионно сконструированного управления (4) видно в сравнении с известным управлением, полученным традиционным вариационным методом теории оптимального управления. В [1] для критерия $\int_0^T U^2 dt$, дифференциального уравнения

управляемого движения $\frac{d^2 S}{dt^2} = U(t)$ найдены ускорения (управление), скорость и перемещение:

$$\begin{aligned} U_e(t) &= \frac{6L}{T^3}(T-2t), & V_e(t) &= \frac{6Lt}{T^3}(T-t), \\ S_e(t) &= \frac{Lt^2}{T^3} \left(3 - \frac{2t}{T} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Два типа управления далее сравниваются по критериям: норма мощности, энергия, затраченная на управление, принцип действия в форме Лагранжа (для $m=1 \text{ кг}$).

В случае управления (4) получено:

$$\int_0^T U_e^2 dt = 14,286 \frac{L^2}{T^3}; \quad 2 \int_0^T U_e V_e dt = 1,56 \frac{L^2}{T^2}; \quad \int_0^T V_e^2 dt = 1,111 \frac{L^2}{T}.$$

Для управления (9) значения этих критериев:

$$\int_0^T U^2 dt = 12 \frac{L^2}{T^3}; \quad 2 \int_0^T U V dt = 2,25 \frac{L^2}{T^2}; \quad \int_0^T V^2 dt = 1,2 \frac{L^2}{T}.$$

Несовершенство критерия нормы мощности $\int_0^T U^2 dt$ подтверждается снижением

энергозатрат на реализацию управления, полученного с использованием РПО (более чем на 30%). Интересно, что в этом случае значение критерия действия (по Лагранжу) уменьшаются. Итак, при практической реализации движения типа «разгон–торможение» следует предпочтение отдавать управлению, полученному на основании РПО.

Учет линейно–вязкого сопротивления приводит к некоторым погрешностям в достижении абсолютного покоя при оптимальном транспортировании объектов манипуляторами с упругими звеньями.

В случае совмещения вращательного и поступательного движений с выдвиганием руки не исключается возможность использования приемов стабилизации жесткости для обеспечения постоянства частоты первого тона изгибных колебаний.

Заключение

1. Сконструированные согласно РПО управление перемещением упругих звеньев манипулятора позволяет за минимально возможное время достичь в конце движения состояния абсолютного покоя центра масс схвата с грузом при снижении энергоемкости оптимального управления; таким образом, открывается возможность повышения производительности производственного процесса с участием манипуляторов минимальной массы (со звеньями конечной жесткости).

2. После определения кинематических условий оптимальных движений руки управления в приводах находятся согласно алгоритму обратных задач динамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем регулирования. /В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
2. Троицкий, А.И. Оптимальные процессы колебаний механических систем. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248с.
3. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями. /Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
4. Крутко, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. / П.Д. Крутко. – М.: Наука, 1988. – 326 с.
5. Красовский, Н.Н. Теория оптимального управления. – М.: Наука, 1968.– 476с.
6. Карновский, И.А., Почтман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем – К. «Высш. школа», 1982. –416 с.
7. Бохонский, А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. /Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, изд–во Сев ГТУ, 2007. – 296 с.
8. Бохонский, А.И., Варминская Н.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике./ Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, изд–во СевНТУ, 2012. –212 с.
9. Бохонский, А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления. Монография, Pabmarium Academic Publishing. Deutschland / Германия, 2013. – 77 p.
10. Бохонский, А.И. Реверсионный принцип оптимальности: монография / Под общ.ред. А.И. Бохонского.– М.: Вузовский учебник: ИНФРА, 2016. – 174 с.
11. Bokhonsky, A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice.: Wydawnictwo Politechniki, 2011.– 171 p.
12. Bokhonsky, A.I. Modelling and investigation of discrete–continuous vibrating mechatronic systems with damping monografia. / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel – Wydawnictwo Politechniki, Gliwice, 2013. – 207 p.

Бохонский Александр Иванович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и машиноведение»
299053, г. Севастополь г, ул. Университетская 33
Тел. 8 (978) 7393968
E-mail: bohon.alex@mail.ru

Рыжков Александр Игоревич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Ассистент кафедры «Техническая механика и машиноведение»
299053, г. Севастополь г, ул. Университетская 33
Тел. 8 (978) 847-37-49
E-mail: ryzhkov2206@gmail.com

A.I. BOKHONSKY, A.I. RYZHKOV

OPTIMAL CONTROL OF MANIPULATOR WITH ELASTIC HAND

Abstract. *In the cylindrical coordinate system the optimal control of the translational and rotational motions (which were found using the reversion principle of optimality (RPO)) of the elastic arm of the manipulator were investigated. Using the moment relationships in the relative motion of the elastic hand (arm vibrations), the minimum possible time was determined to achieve absolute rest of the center of mass of manipulator clamp in the final position of the hand.*

Keywords: *manipulator, cylindrical coordinates, elastic hand, optimal control, minimum time of motion, achievement of absolute rest.*

BIBLIOGRAPHY

1. Solodovnikov, V.V. Fundamentals of the theory and elements of regulatory systems. / B.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – 536 p.
2. Troitsky, A.I. Optimal processes of oscillations of mechanical systems. – L.: Mechanical Engineering, 1976. – 248 p.
3. Chernousko F.L. Control of oscillations. / F.L. Chernoushko, P.D. Akulenko, BN Sokolov. – Moscow: Nauka, 1980. – 384 p.
4. Krutko, P.D. Inverse problems of the dynamics of controllable systems: linear models. / P.D. Krutko. – Moscow: Nauka, 1988. – 326 p.
5. Krasovsky, N.N. Theory of optimal control. – Moscow: Nauka, 1968. – 476 p.
6. Karnovsky, IA, Pochtman Yu.M. Methods of optimal control of oscillations of deformable systems – K. «Superior. school», 1982. – 416 p.
7. Bokhonsky, AI, Warminskaya NI, Mozolevsky M.I. Optimum control of portable motion of deformable objects: theory and technical applications. Under the Society. Ed. A.I. Bokhonsky. – Sevastopol, publishing house SevGU, 2007. – 296 p.
8. Bokhonsky, AI, Warminskaya N.I. Variational and reversion calculus in mechanics. / A.I. Bokhonsky. – Sevastopol, publishing house SevNTU, 2012. – 212 p.
9. Bokhonsky, A.I. Actual problems of calculus of variations. Monograph, Pabmarium Academic Publishing. Deutschland / Germany, 2013. – 77 p.
10. Bokhonsky, A.I. Reversion principle of optimality: monograph / A.I. Bokhonsky. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA, 2016. – 174 p.
11. Bokhonsky, A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice.: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
12. Bokhonsky, A.I. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping monografia. / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel – Wydawnictwo Politechniki, Gliwice, 2013. – 207 p.

Bokhonsky Alexander Ivanovich

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Профессор, Доктор технических наук, Профессор кафедры «Техническая механика и машиноведение»
299053, г. Севастополь, ст. Университетская 33
Тел. 8 (978) 7393968
E-mail: bohon.alex@mail.ru

Ryzhkov Alexander Igorevich

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Ассистент кафедры «Техническая механика и машиноведение»
299053, г. Севастополь, ст. Университетская 33
Тел. 8 (978) 847-37-49
E-mail: ryzhkov2206@gmail.com

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОЙ ФАЗЫ ВСПЛЫТИЯ МОРСКИХ НЫРЯЮЩИХ БУЕВ

Аннотация. Разработаны упрощенные уравнения движения дрифтера для первой фазы всплытия, пренебрегающие изменением плотности вдоль координаты. Используя полученные решения, произведены оценки погрешностей и исследовано влияние геометрических и физических параметров дрифтера на его скорость.

Ключевые слова: дрифтер, уравнение движения, подводный аппарат.

Введение.

Скорость погружения/всплытия дрифтера имеет большое значение для качества результатов профильных измерений [1, 2, 3, 4]. Скорость дрифтера определяется его геометрическими (объем, соотношение общей длины и диаметра) и физическими (масса, коэффициент сопротивления) параметрами [5].

Процесс погружения / всплытия делится на две фазы [6]:

- 1) фаза движения в процессе опорожнения / наполнения внешнего ресивера;
- 2) фаза дрейфа в вертикальной плоскости.

Именно первая фаза, как показано в работе [6], определяет максимальную возможную скорость, которая, в свою очередь, – среднюю скорость движения дрифтера.

Целью данной работы является поиск приближенного решения построенной в [6] математической модели и его последующий анализ с целью выявления влияния геометрических и физических параметров дрифтера на его скорость.

Приближенная математическая модель первой фазы процесса всплытия.

В работе [6] была разработана математическая модель динамики подводного аппарата, которая позволяет определять скорость и глубину погружения/всплытия, а также применять для расчетов уравнения только для одного из процессов, при условии равенства коэффициентов в уравнениях обоих процессов и использовать их результаты для другого. Также было установлено, что расстояние, пройденное подводным аппаратом (ПА) в первой фазе невелико – порядка 10...100 м в зависимости от производительности насоса системы изменения плавучести. Поэтому плотность при столь малых расстояниях меняется незначительно, следовательно, зависимостью плотности от координаты можно пренебречь и математическая модель может быть упрощена.

Тогда, с учетом вышесказанного, для случая разгона ПА с постепенным заполнением наружного ресивера можно записать следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{du(\tau)}{d\tau} + \frac{C_f \rho_f S_a}{2m} u(\tau)^2 - \frac{\rho_f g v_f}{k_c m} \tau = 0;$$

$$u(\tau_s) = u_s,$$

где u – текущая скорость ПА, м/с;

τ – текущее время, с;

m – масса ПА, кг;

C_f – коэффициент гидравлического сопротивления ПА;

ρ_f – плотность жидкости, кг/м³;

S_a – характерная площадь поперечного сечения, м²;

v_f – скорость заполнения объема камеры всплытия, м³/с;

k_c – коэффициент усиления гидроцилиндра (для систем не имеющих усилителей $k_c = 1$);

τ_s – начальное время, с;

u_s – начальная скорость в момент времени τ_s , м/с.

Введем обозначения

$$k = \frac{C_f \rho_f S_a}{2m}; \quad q = \frac{\rho_f g v_f}{k_c m}.$$

Если рассматривать некое и относительное время $\tau = \tau - \tau_s$, то приведенное выше дифференциальное уравнение и его начальное условие, учитывая введенные обозначения, можно переписать в виде

$$\frac{du(\tau)}{d\tau} + k u(\tau)^2 - q \tau = 0 \quad (1)$$

$$u(0) = u_s, \quad (2)$$

Введем замену переменной

$$\frac{1}{k \varphi(\tau)} \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = u(\tau). \quad (3)$$

Подставим (3) в (1), и после преобразований получим

$$\frac{d^2 \varphi(\tau)}{d\tau^2} = k \varphi(\tau) q \tau. \quad (4)$$

Уравнение (4) является уравнением Эйри, общее решение которого имеет вид [7]:

$$\varphi(\tau) = C_1 Ai(\sqrt[3]{k q \tau}) + C_2 Bi(\sqrt[3]{k q \tau}), \quad (5)$$

где $Ai(x)$ – специальная функция Эйри первого рода,

$Bi(x)$ – специальная функция Эйри второго рода.

Из уравнения (3) следует, что

$$\frac{d\varphi(0)}{d\tau} = u_s k \varphi(0). \quad (6)$$

Проведя обратные преобразования (5) и учитывая начальные условия (2), получим решение уравнения (1)

$$u(\tau) = \frac{\sqrt[3]{k q}}{k} \frac{p Ai'(\sqrt[3]{k q \tau}) + Bi'(\sqrt[3]{k q \tau})}{p Ai(\sqrt[3]{k q \tau}) + Bi(\sqrt[3]{k q \tau})}, \quad (7)$$

где $Ai'(x)$ – первая производная специальной функции Эйри первого рода;

$Bi'(x)$ – первая производная специальной функции Эйри второго рода;

$$p = \sqrt{3} \frac{\sqrt[3]{k q} Ai'(0) + u_s k Ai(0)}{\sqrt[3]{k q} Ai'(0) - u_s k Ai(0)}.$$

Определим расстояние $z(\tau)$, пройденное ПА.

Поскольку

$$z(\tau) = \int_0^\tau u(\tau) d\tau, \quad (8)$$

то с учетом (7) выражение (8) примет вид

$$z(\tau) = \int_0^\tau \frac{\sqrt[3]{k q}}{k} \frac{p Ai'(\sqrt[3]{k q \tau}) + Bi'(\sqrt[3]{k q \tau})}{p Ai(\sqrt[3]{k q \tau}) + Bi(\sqrt[3]{k q \tau})} d\tau. \quad (9)$$

Введем обозначение

$$y(\tau) = p Ai(\sqrt[3]{k q \tau}) + Bi(\sqrt[3]{k q \tau}), \quad (10)$$

тогда с учетом (10) интеграл (9) можно переписать в виде

$$z(\tau) = \frac{1}{k} \int_{y(0)}^{y(\tau)} \frac{d[y(\tau)]}{y(\tau)} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{y(\tau)}{y(0)} \right]. \quad (11)$$

Подставляя в формулу (11) выражение (10), а также учитывая некоторые свойства функций Эйри, получим зависимость пройденного ПА расстояния от времени

$$z(\tau) = \frac{1}{k} \ln \left[3^{\frac{2}{3}} \Gamma \left(\frac{2}{3} \right) \frac{p Ai(\sqrt[3]{kq\tau}) + Bi(\sqrt[3]{kq\tau})}{p + \sqrt{3}} \right]. \quad (12)$$

Специальные функции Эйри первого и второго рода, а также их первые производные широко применяются в пакетах компьютерной алгебры, например Wolfram Mathematica и т.п., наравне с другими специальными функциями математической физики поэтому проведение расчетов по формулам (7) и (12) затруднений не вызывает.

На практике чаще всего наполнение внешнего ресивера начинается при нулевой или близкой к ней скорости [6], т.е. $u \approx 0$, а следовательно и параметр $p \approx \sqrt{3}$. Тогда формулы (7) и (12) упростятся и будут выглядеть следующим образом

$$u(\tau) = \frac{\sqrt[3]{kq}}{k} \frac{\sqrt{3} Ai'(\sqrt[3]{kq\tau}) + Bi'(\sqrt[3]{kq\tau})}{\sqrt{3} Ai(\sqrt[3]{kq\tau}) + Bi(\sqrt[3]{kq\tau})}; \quad (13)$$

$$z(\tau) = \frac{1}{k} \ln \left[3^{\frac{2}{3}} \Gamma \left(\frac{2}{3} \right) \frac{p Ai(\sqrt[3]{kq\tau}) + Bi(\sqrt[3]{kq\tau})}{2\sqrt{3}} \right]. \quad (14)$$

Моделирование первой фазы процессов всплытия дрифтера.

При моделировании погружения дрифтера были приняты следующие численные значения параметров модели (таблица 1).

Таблица 1 – Численные значения параметров модели

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Объем аппарата при нулевой плавучести при средней плотности ρ_{fm} [8]	V_a	0,0382	м ³
Коэффициент гидродинамического сопротивления	C_f	1	—
Масса дрифтера	m	38	кг
Характерная площадь поперечного сечения	S_a	0,0254	м ²
Коэффициент усиления гидроцилиндра	k_c	4	—
Максимальное линейное перемещение штока	l_f	0,3	м
Диаметр поршня	D_1	0,13	м
Диаметр штока	D_2	0,065	м

Результаты моделирования первой фазы процесса всплытия на основе уравнений (13) и (14) представлены на рисунке 1.

Анализ рисунка 1 показывает погрешности, связанные с допущением о независимости плотности от координаты, находятся в допустимых пределах. Возрастание погрешности при уменьшении скорости наполнения камеры всплытия, очевидно, связано с увеличением расстояния, пройденного ПА в первой фазе и, как следствие, возрастания влияния переменной плотности морской воды, что и отражено на рисунке 2.

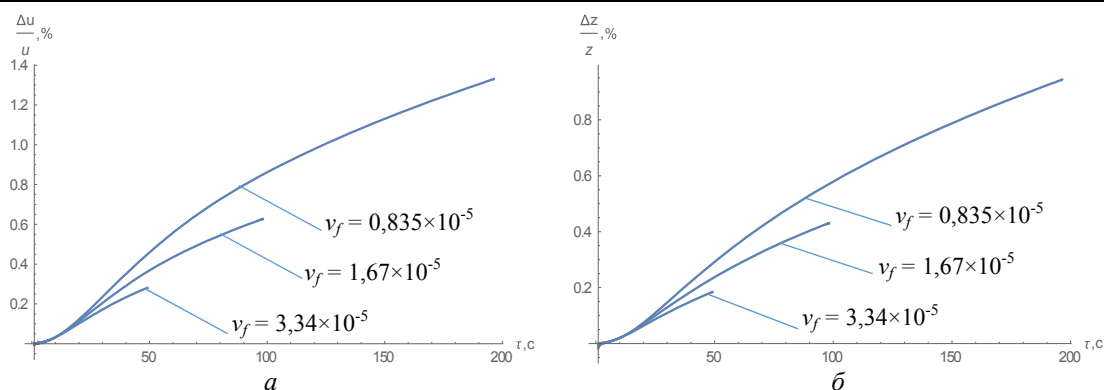


Рисунок 1 – Зависимость погрешности определения параметров первой фазы всплытия от времени и скорости наполнения камеры всплытия ($\text{м}^3/\text{с}$): а) скорость (7); б) глубина (12)

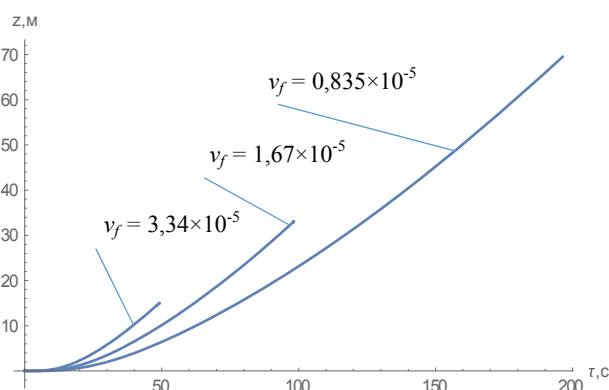


Рисунок 2 – Зависимость координаты первой фазы всплытия от времени для различных скоростей наполнения камеры всплытия ($\text{м}^3/\text{с}$)

Учитывая введенные ранее обозначения величину $\frac{\sqrt[3]{kq}}{k}$ из формулы (13) после преобразований можно представить в виде

$$u(\tau) \square \frac{\sqrt[3]{kq}}{k} = \sqrt[3]{\frac{L_a}{S_a} \left(\frac{2}{C_f} \right)^{\frac{2}{3}} g \frac{v_f}{k_c}}, \quad (15)$$

где L_a – длина ПА, м.

Максимальная скорость ПА практически не зависит от скорости наполнения камеры всплытия, что хорошо видно на рисунке 3.

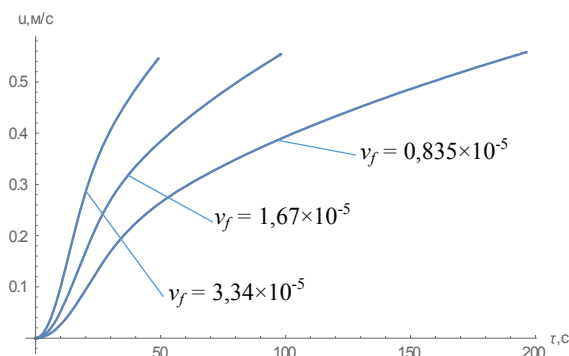


Рисунок 3 – Зависимость скорости ПА первой фазы всплытия от времени для различных скоростей наполнения камеры всплытия ($\text{м}^3/\text{с}$)

Согласно (15) максимальная скорость должна возрасти с уменьшением

коэффициента гидравлического сопротивления увеличением относительной длины (L_a/D_a) ПА (здесь D_a – характерный диаметр ПА, м) при постоянном объеме. Это хорошо подтверждается графиками, изображенными на рисунке 4.

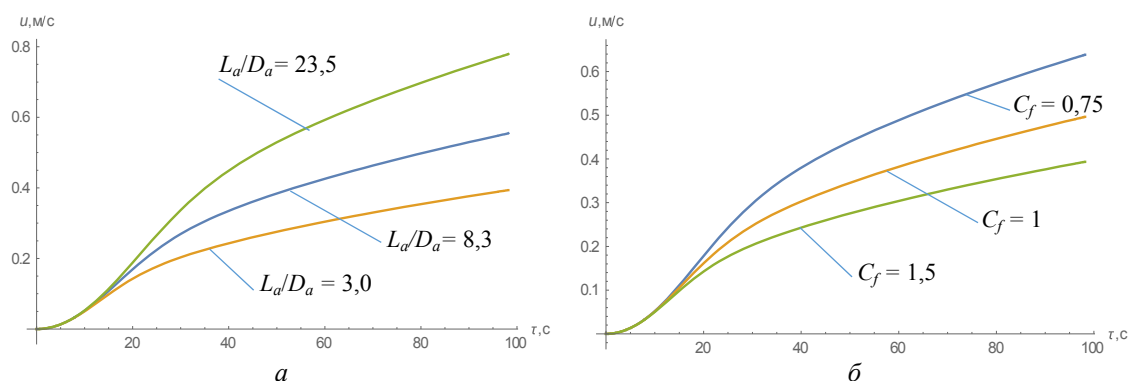


Рисунок 4– Зависимость скорости первой фазы всплытия от времени:
 а) при различных относительных длинах ПА времени и постоянном объеме;
 б) при различных коэффициентах гидравлического сопротивления

Закключение.

Предложенная в работе приближенная математическая модель движения ПА и ее решение, описывающее первую фазу всплытия, имеет допустимую погрешность при изменении координаты не более 100 м, и может использоваться в практических расчетах существенно сократить время их выполнения.

Расчеты, проведенные по формулам (13) и (14), показали, что с увеличением относительной дины и уменьшением коэффициента гидравлического сопротивления можно достичь максимальных скоростей всплытия/погружения ПА, что хорошо соотносится с физическими представлениями о движении твердого тела в жидкости [9, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями–профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. №4. С.69–79.
2. Davis, R.E., Sherman, J.T. and Dufour, J. Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18:982–993. Dell, R.M. (2001).
3. Смирнов Г.В. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев, Г.К. Коротаев, В.С. Ястребов, С.В. Мотыжев. – М.: Наука, 2005. – 795 с.
4. Лазарюк А.Ю. Устранение динамических погрешностей данных СТД измерения в океане / А.Ю. Лазарюк, В.И. Пономарев // Вестник ДВО РАН. 2006. №4 – С. 106–111.
5. DASaro, E.A., 2003. Performance of autonomous Lagrangian floats. J. Atmos. Ocean. Tech., 20,896–911.
6. Дологлонян А.В. Сухов А.К. Энергосберегающие режимы всплытия и погружения морских дрейфтеров // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ИПТС, 2017. – Вып. 10 (30). – С. 16–23.
7. Никифоров А.Ф., Уваров В.Б. Специальные функции математической физики. М.: Наука, 1984. – 344 с.
8. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

Дологлонян Андрей Вартазарович

ФГБНУ Институт природно–технических систем
 Российской Федерации, г. Севастополь
 Кандидат технических наук, старший научный
 сотрудник
 E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Сухов Андрей Константинович

ФГБНУ Институт природно–технических систем
 Российской Федерации, г. Севастополь
 Доктор технических наук, главный научный
 сотрудник
 E-mail: dologlonyan@hotmail.com

A.V. DOLOGLONYAN, A.K. SUKHOV

RESEARCH OF GEOMETRICAL AND PHYSICAL PARAMETERS INFLUENCE OF THE DRIFT BOAT ON ITS SPEED

Abstract. *The simplified equations of the drift boat movement for the first phase of emersion neglecting of density change along coordinate are developed. Using the received decisions, estimates of errors are made and influence of geometrical and physical parameters of the drift boat on its speed is investigated.*

Keywords: *drift boat, equation of the movement, undersea vehicle.*

BIBLIOGRAPHY

1. Krasnodubec L.A., Zaburdaev V.I., Alchakov V.V. Upravleniemorskimibuyami–profilemeramikametodpovysheniya reprezentativnostitermohalinnyhizmerenij. Mo–deli dvizheniya // Morskogidrofizicheskijzhurnal. 2012. №4. S.69–79.
2. Davis, R.E., Sherman, J.T. and Dufour, J. Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18:982–993. Dell, R.M. (2001).
3. Smirnov G.V. Okeanologiya: sredstva i metodyokeanologicheskikhissledovanij / G.V. Smirnov, V.N. Ereemeev, M.D. Ageev, G.K. Korotaev, V.S. YAstrebov, S.V. Motyzhev. – M.: Nauka, 2005. – 795 s.
4. Lazaryuk A.YU. Ustraneniedinamicheskikh pogreshnostejdannyh STD izmereniya v okeane / A.YU. Lazaryuk, V.I. Ponomarev // Vestnik DVO RAN. 2006. №4 – С. 106–111.
5. DAsaro, E.A., 2003. Performance of autonomous Lagrangian floats. J. Atmos. Ocean. Tech., 20,896–911.
6. Dologlonyan A.V. Suhov A.K. EHnergosberegayushchierzhimivsplytiya i pogruzheniyamorskikhdrifterov // Sistemykontrolyaokruzhayushchejsredy. – Sevastopol: IPTS, 2017. – Vyp. 10 (30). – S. 16–23.
7. Nikiforov A.F., Uvarov V.B. Specialnyefunkciimatematicheskofiziki. M.: Nauka, 1984. – 344 s.
8. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).
9. Lojcyanskij L.G. Mekhanikazhidkosti i gaza. – M.: Nauka, 1987. – 840 s.
10. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaya fizika. T. 6. Gidrodinamika. – M.: Nauka, 1988. – 736 s.

Dologlonyan Andrey Vartazarovich

FSBSI Institute of nature and technical systems of
Russian Federation, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Suhov Andrey Konstantinovich

FSBSI Institute of nature and technical systems of
Russian Federation, Sevastopol
Doctor of Technical Sciences, ChiefResearcher
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

А.А. МУРАВЬЕВ, Н.С. МАРКОВА, А.С. ТАРАПАНОВ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация. В статье рассмотрены наиболее распространенные аддитивные технологии, которые могут применяться в наукоемких отраслях: машиностроении, приборостроении, аэрокосмической отрасли. Определены направления развития и совершенствования установок трёхмерной печати. Даны эксплуатационные свойства изделий полученных по наиболее распространённым технологиям, таких как SLM и FDM. Установлено, аддитивные технологии могут составить серьёзную конкуренцию традиционным методам серийного производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, технологии 3D-печати, 3D-принтеры.

Введение.

Коммерческое аддитивное производство вступает в третье десятилетие своего развития. За это время был накоплен значительный опыт превращения виртуальных моделей прототипов в физические объекты. Как и в любом другом, в свое время новейшем направлении формообразования, этот опыт наталкивался не только на перспективные, но и на тупиковые направления. Вместе с тем, такие объективные преимущества аддитивного формообразования как возможность прогнозирования механических свойств за счет оптимального подбора широкого диапазона компонентов материала изделий, их непревзойдённая сложнейшая конфигурация, позволяющая существенно экономить исходный материал, одновременно снижая вес деталей, получение за одну операцию узлов реальных конструкций, позволяющей избегать и экономить на операции сборки деталей аддитивное формообразование незаменимым.

Основная часть.

На рисунке 1 показана классификация аддитивных технологий и применяемые в них материалы.

Среди технологии аддитивного формообразования применительно к машиностроительной отрасли, можно выделить наиболее распространённых технологий: FDM или FFF (метод послойного наплавления), MJP (метод многоструйного моделирования), PolyJet, SLA (стереолитография), SLS (селективное лазерное спекание), SLM (селективное лазерное плавление), DMLS (прямое лазерное спекание), DMD или DMT (прямое нанесение металла), рисунок 2.

Технология FDM или FFF основана на методе экструзии. Термины FDM и FFF эквивалентны по смыслу и назначению [1]. На рисунке 2 (а) показано её схематическое представление.

Через головку для экструзии подается материал, который подогревается до температуры плавления, каждый слой накладывается на предыдущий. Головка перемещается над платформой построения, накладывая последовательно слой за слоем, затем платформа опускается на толщину одного слоя и так происходит до образования конечного изделия. Точность печати слоя до 50 мкм. Здесь, как и во многих других технологиях, используются поддержки. Поддержки позволяют: стабилизировать выступы, консоли на краях модели, предотвращать расслаивание в сложных участках модели; корректировать возможное искривление слоев на платформе; легко отделять синтезированную модель от основания–платформы для построения; облегчать синтез сложных моделей, создавая их из нескольких частей [2].

Достоинствами данной технологии является: доступность и компактность установки, минимальное обслуживание и контроль процесса печати, быстрая смена материала, достаточно высокая производительность, относительно недорогие материалы.

Недостатками: расслоение слоев из-за колебаний температуры (лучше использовать установки с закрытой камерой), экструзионная головка должна постоянно работать, так как материал может в ней застыть и привести к засорению сопла.

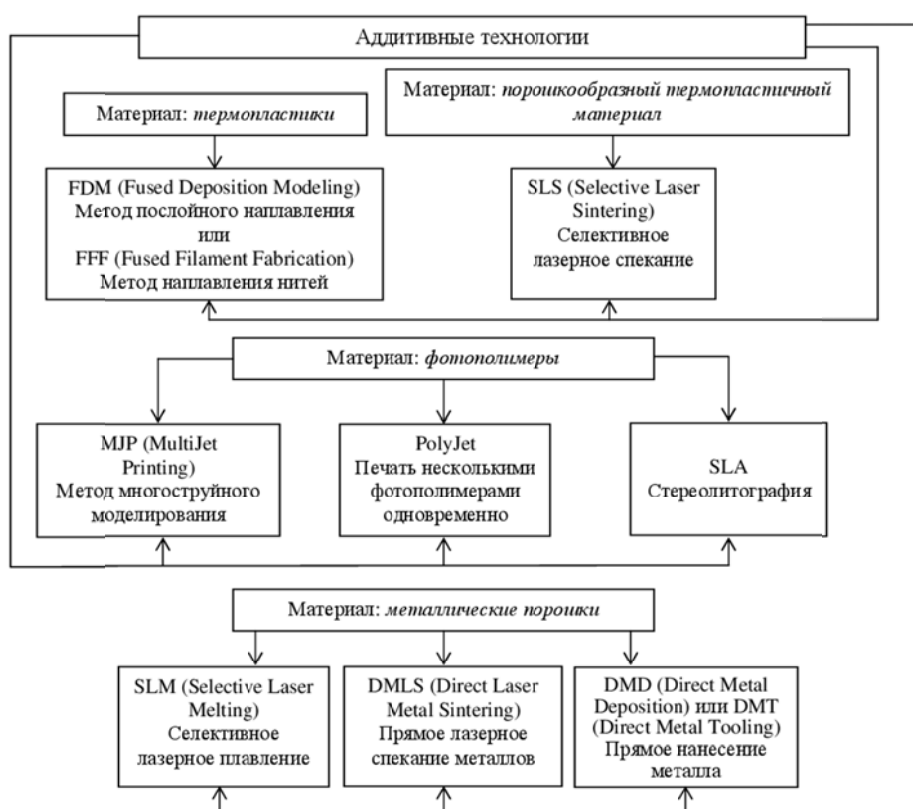


Рисунок 1 – Технологии аддитивного формообразования

Производством установок FDM (FFF) занимаются большое количество фирм. Они являются самыми доступными и поэтому технология получила большую популярность.

На рисунке 2 (б) показано схематическое представление технологий SLS/DMLS/SLM. Технология SLS – селективное лазерное спекание заключается в частичной лазерной плавке частиц полиамидного, полистирольного порошка, порошкообразного воска и подготовленного песка (со связующим веществом). Высокоэнергетическое воздействие лазера спекает шарообразные гранулы порошка последовательно слой, за слоем образуя конечное изделие. Элементы поддержки при использовании данной технологии не требуются, поскольку в качестве поддержек выступает не спеченный порошок. Лазеры в промышленных установках имеют мощность от 30–200 Вт.

Производители установок: 3D Systems, Shining 3D, 3Geometry Manufacturing Systems Pvt Ltd, Electro Optical Systems.

Появляются SLS установки для персонального пользования, они отличаются мощностью и размером от промышленных, имеют меньшую камеру для печати, лазеры в таких установках менее мощные, например, установка Sintratec S1 [3], SLS 3D–Принтер Red Rock (ООО «Русский инженер») [4]. Рабочая камера установки подогревается, и лазеру необходимо лишь подогреть материал примерно на 10 °С, чтобы достичь температуры плавления порошка. Данная технология позволяет создавать модели–прототипы, легковесные конструкции, детали со сложнейшей геометрической формой, литейные формы, выжигаемых моделей. Из недостатков можно отметить: высокая стоимость материалов и оборудования, нельзя спекать металлические порошки.

Технология DMLS – прямое лазерное спекание, позволяет печатать изделия слоями толщиной около 20 микрон. Достоинством является высокая прочность и точность напечатанных изделий. Лазеры в данных технологиях используются от 50–1000 Вт. Производители установок: 3D Systems, EOS GmbH.

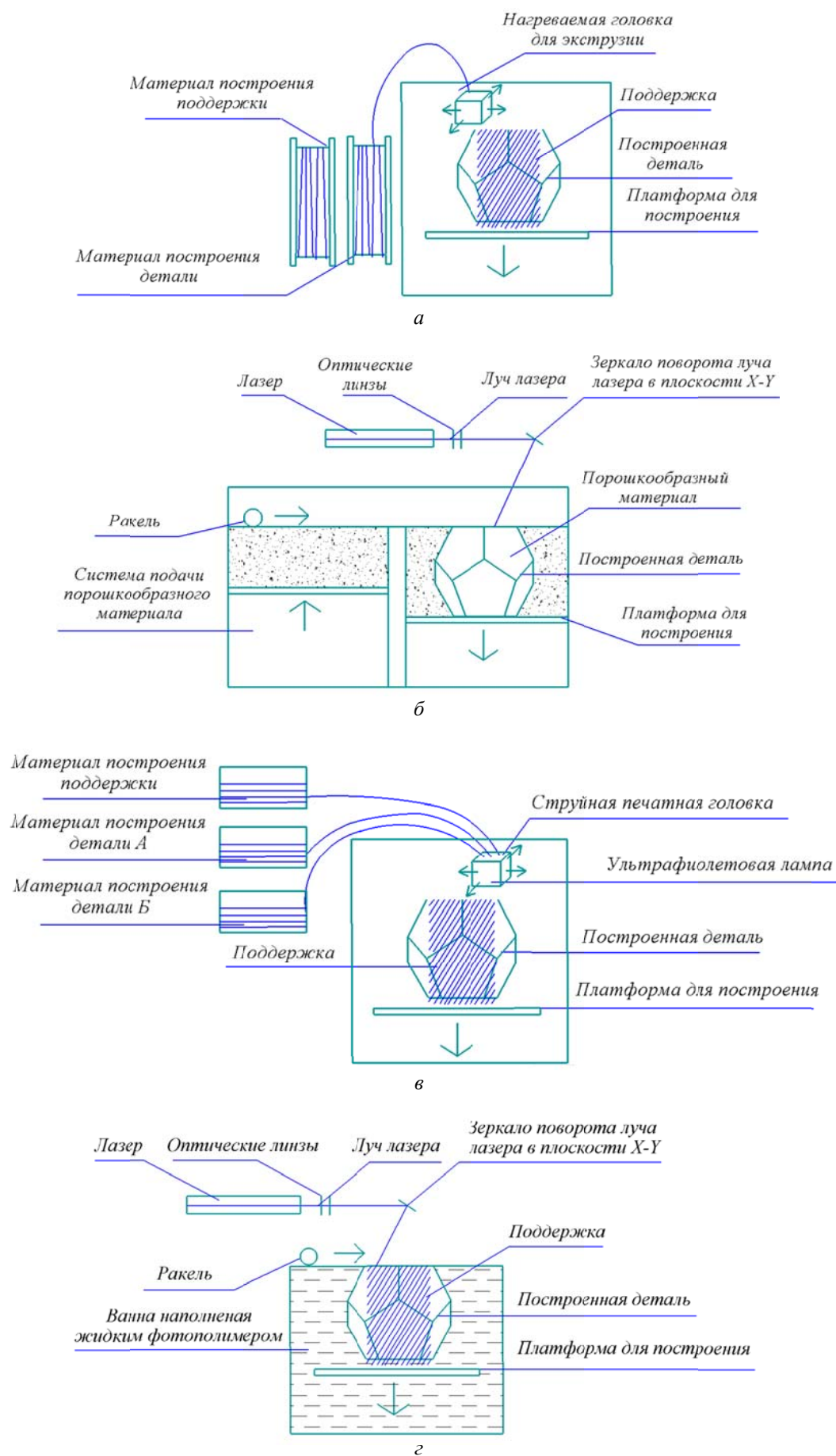


Рисунок 2 – Схематическое представление аддитивных процессов:
а) FDM (FFF); б) SLS/DMLS/SLM; в) MJP и PolyJet; г) SLA

Технология SLM – селективное лазерное плавление заключается в полной плавке металлического порошка под воздействием сверхмощного лазерного луча. Изготовленные по данной технологии детали имеют однородную структуру и более высокую прочность. Камера печати в технологии SLM и DMLS наполняется инертным газом аргоном или азотом, кислород удаляется из неё. Инертный газ предотвращает возможность окисления металлического порошка. Лазеры в данной технологии используются от 20–1000 Вт.

Производители установок: 3D Systems, Renishaw, SLM Solutions, ReaLizer GmbH, Shining 3D, 3DSLA.RU.

На рисунке 2 (в) показано схематическое представление технологий MJP и PolyJet. В печатной головке находятся от 96 до 448 сопел [5], через сопла на платформу для построения изделий наносится печатный материал (жидкий фотополимер, воск). Затвердевание происходит за счет облучения ультрафиолетовой лампой или охлаждения. Материалом поддержки служит воск, который легко вымывается водой. Полученные изделия не требуют сложной последующей. Данные технологии являются схожими, изделия получаются сопоставимыми по своим качественным характеристикам, для технологии PolyJet материалы доступнее. Из преимуществ технологий можно отметить: простое обслуживание установки, высокое разрешение печати до 16 мкм слой, большой выбор материалов. Из недостатков: дороговизна фотополимера и его хрупкость. С помощью технологий возможно изготовление выжигаемых моделей, прототипов для функционального тестирования, мастер-моделей для создания литейных форм или вакуумной формовки. Технология PolyJet используется в медицине, например для создания хирургических имплантов, зубных имплантов. Производители установок технологии PolyJet: Stratasys; технологии MJP: 3D Systems.

Технология SLA (стереолитография) представлена на рисунке 2 (г). SLA является самой первой технологией в синтезе объемных изделий, предложена в 1986 году. Процесс основан на фотополимеризация жидкого полимера лазерным лучом, которым заполнена ванна. Построение изделия происходит на платформе, слой за слоем. Единичный слой облучается лазером и это приводит к застыванию (полимеризации) жидкого фотополимера. Используются в технологии лазеры, работающие в области ультрафиолетового излучения, мощность составляет от 10 мВт до 1500 мВт для промышленных принтеров. Преимуществами данной технологии является высокая точность изделий с толщиной слоя до 25 мкм, быстрая скорость печати, разнообразие фотополимеров. Из недостатков можно выделить: необходимость создания поддержек и дороговизна фотополимеров и его хрупкость. С помощью данной технологий возможно создание прототипов с высокой степенью детализации, изготовление выжигаемых моделей для литья. Установки данной технологии бывают промышленные и персональные.

Производители установок: 3D Systems, Shining 3D, DWS Systems, 3DSLA.RU, XYZprinting, CMET Inc., DWS s.r.l., Shaanxi Hengtong Intelligent Machine Co., Fochif Mechatronics Technology Co., UnionTech.

Технология DMD (прямое нанесение металла) или DMT (лазерная порошковая наплавка), на рисунке 3 показано схематическое представление.

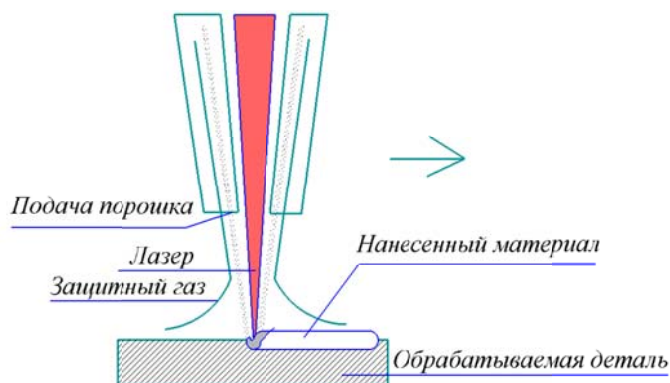


Рисунок 3 – Схематическое представление DMD (DMT) технологии

На обрабатываемую деталь наносится послойно металлический порошок при помощи сопла. Под действием лазерного луча он сплавляется с обрабатываемой деталью, образуя сварочное соединение. Защитный газ помогает предотвратить окисления во время процесса сплавления. Мощность лазера в таких системах очень мощная, в современных промышленных установках есть модели 5 кВт.

Технология Direct Metal Deposition (прямое нанесение металла) используется для восстановления изношенных поверхностей, в основном пресс-форм, нанесения покрытий из инструментальной стали, создание целостных изделий с различными свойствами в разных частях (стальная вставка в форму для литья под давлением), создание деталей с встроенными объектами (датчиками или магнитами) [6].

Производители установок: Instrument Tech Co, InssTek, DM3D Technology.

На рисунке 4 показаны предполагаемые направления развития аддитивных технологий.



Рисунок 4 – Направления применения и развития аддитивных технологий

Функционирование напечатанных изделий ограничено прочностными свойствами деталей, по прочностным свойствам напечатанные изделия могут заметить в настоящее время изделия, созданные по технологии литья, это касается и металлов и пластмасс. Для примера рассмотрим сравнение прочностных свойств образцов полученных по технологиям SLM и FDM (FFF) с традиционной литейной технологией.

Для создания образцов стали 316L по технологии послойного лазерного сплавления в работе использовалась установка SLM Phenix Systems PM100 (производство Phenix Systems, Франция). Источником лазерного излучения в данной машине является иттербиевый волоконный лазер с непрерывным излучением на длине волны 1075 нм и максимальной мощностью излучения $P = 50$ Вт. Размер лазерного пятна на поверхности порошкового слоя

составлял около 70 мкм. Селективное лазерное плавление осуществлялось в закрытой камере, заполненной азотом, для предотвращения окисления. Рабочая температура в камере поддерживалась на уровне 80 °С [7].

Прочностные свойства образцов, полученные по технологии селективного лазерного плавления соизмеримы с заготовками полученными литьем. Образцы созданы из порошка нержавеющей стали 316L (% вес.: Cr 16–18; Ni 13–15; Mo 2,5–3,1; Mn 1–2; Si до 0,4; C до 0,03; S до 0,02; P до 0,035; остальное Fe). Российским аналогом стали 316L является нержавеющая сталь марки 03X17H14M3 (таблица 1).

Таблица 1. Механические свойства образцов полученных по технологии селективного лазерного плавления [7]

Свойства образца	Материал и способ получения образца	
	SS 316L	
	SLM	Литье
Предел прочности при растяжении, МПа	436 ± 60	480 – 560
Предел текучести (0,2%), МПа	366 ± 50	170 – 290
Относительное удлинение, %	9 ± 2	40
Модуль Юнга, ГПа	179 ± 3	190 – 210
Коэффициент Пуассона	0,30	0,27 – 0,30

Технологии послойного лазерного спекания и плавления позволяют создавать детали по механическим свойствам сравнимые с литьём с наименьшими затратами, за счет уменьшения количества технологических операций и снижения затрат на оснастку. Возможна печать нескольких деталей одновременно, это зависит от размеров печатной камеры, что повышает эффективность технологии. Из недостатков можно выделить большую стоимость установок и материалов.

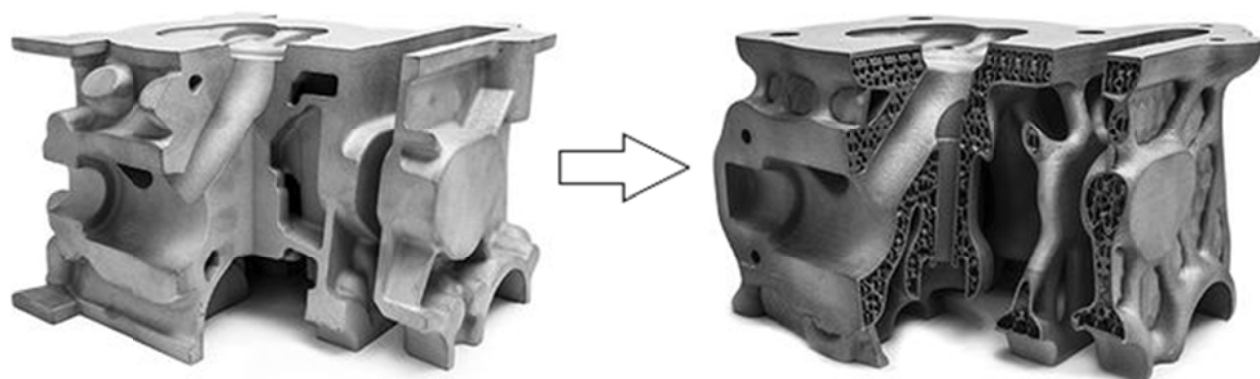
В Центре испытаний, сертификации и стандартизации Функциональных материалов и технологий (ЦИСС ФМТ) при МГУ им. М. В. Ломоносова на универсальной испытательной установке Tinius Olsen 300ST проводились испытания моделей напечатанных по FDM технологии из ABS пластика с литьевыми моделями из ABS. Условия в помещении испытательной лаборатории – температура 24°С, относительная влажность – 50 % [8]. В таблице 2 показаны механические свойства полученных образцов.

Таблица 2. Механические свойства образцов полученных по технологии FDM и литья [8]

Свойства образца	Материал и способ получения образца	
	ABS пластик	
	Литье	FDM
Прочность при сжатии, МПа	46–80	49,3
Прочность при растяжении, МПа	35–50	29,6
Прочность при изгибе, МПа	50–87	65,4
Модуль упругости при растяжении	1700–2930	1270

Образцы, напечатанные из ABS пластика имеют одинаковую прочность при сжатии, растяжении и изгибе с изделиями изготовленные по технологии литья, но по модулю упругости показатель находится на уровне 75% от литья (таблица 2). [8].

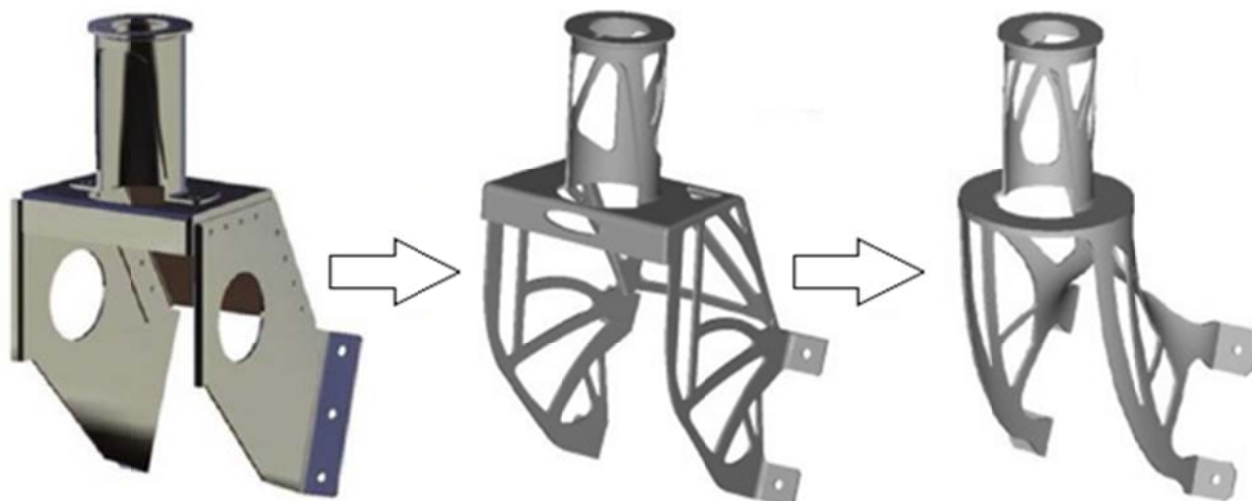
Детали, изготовленные с помощью аддитивных технологий, рассмотрим далее более подробно преимущества данной технологии, представлены на рисунке 5.



масса: 5,1 кг
функциональный объем: 823 см³

1,9 кг
10 223 см³

а

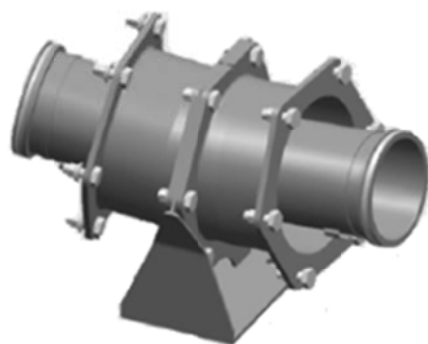


Оригинальный кронштейн
материал: Al 7075-T7351
масса: 0,453 кг
уменьшение массы:

1 вариант оптимизации
AlSi10Mg
0,197 кг
– 0,256 кг (56,5%)

2 вариант оптимизации
AlSi10Mg
0,168 кг
– 0,285 кг (62,9%)

б



Сборка из 14 узлов



Единая деталь

в

Рисунок 5 – Примеры деталей изготовленных по аддитивным технологиям:

- а) Деталь с внутренними каналами и полостями;
- б) Оптимизация топологии крепления для летательных аппаратов;
- в) Топливный разъем самолета Airbus A380.

Создание деталей с внутренними каналами и полостями способствует снижению массы детали и функционального объема, на рисунке 5 (а) показан пример изделия.

Оптимизация топологии деталей позволяет снизить массу, без потерь прочностных характеристик, рисунок 5 (б). Крепление для спутника ESA было оптимизировано для Airbus Defence & Space испанским инженеринговым центром CATEC, для печати использовалась установка Renishaw AM250 работающая по технологии SLM [9].

Создание единой целостной детали вместо сборки означает, что благодаря использованию 3D-печати возможно изготовление единой детали сложной формы, которая будет легче и прочнее сборки, сократится количество технологических операций и затрат на производство. На рисунке 5 (в) изображен топливный разъем самолета Airbus A380, который соединяет топливные баки друг другом и передает топливо из одного места в другое [10].

Изготовление топливного разъема с помощью 3D-печати из металла позволило создать единую деталь вместо сборки из 14 узлов, сократить количество технологических операций с 31 до 5, снизить стоимость производства на 50 %.

Рассмотрим направления развития, а именно совершенствования аддитивных установок и процессов производства.

Области печати большинства 3D-принтеров лежит в пределах 200 x 200 x 200 мм. Бывают установки с областью печати 1050 x 1050 x 1050 мм – 3D-принтер Bigrep One v3 и даже более 2000 x 1200 x 1200 мм – 3D-принтер Magnum RX-2.2H работают эти установки по технологии FDM (FFF). Для принтеров с большей областью печати работающих с пластиком характерно увеличение толщины слоя 200–900 микрон для увеличения скорости печати. Установки работающие с металлами имеют область печати меньше, чем принтеры, работающие с пластиком, например 3D-принтер по металлу SLM Solutions SLM 500 имеет размеры рабочей камеры 500 x 280 x 365 мм.

Разрешение 3D-принтеров можно разделить на 2 направления: в координатах X–Y и по высоте Z слоя. Под увеличением максимального разрешением понимается минимальная высота формируемого слоя, т.е. чем тоньше слой, тем выше разрешение и лучше качество деталей, но время печати значительно увеличивается. Например, минимальная толщина слоя Z у FDM 0,05 мм, не позволяет осуществлять печать миниатюрных объектов. В технологиях SLA, DLMS разрешение может достигать 0,005 мм, и такие принтеры могут печатать ювелирные украшения и детализованные объекты [11].

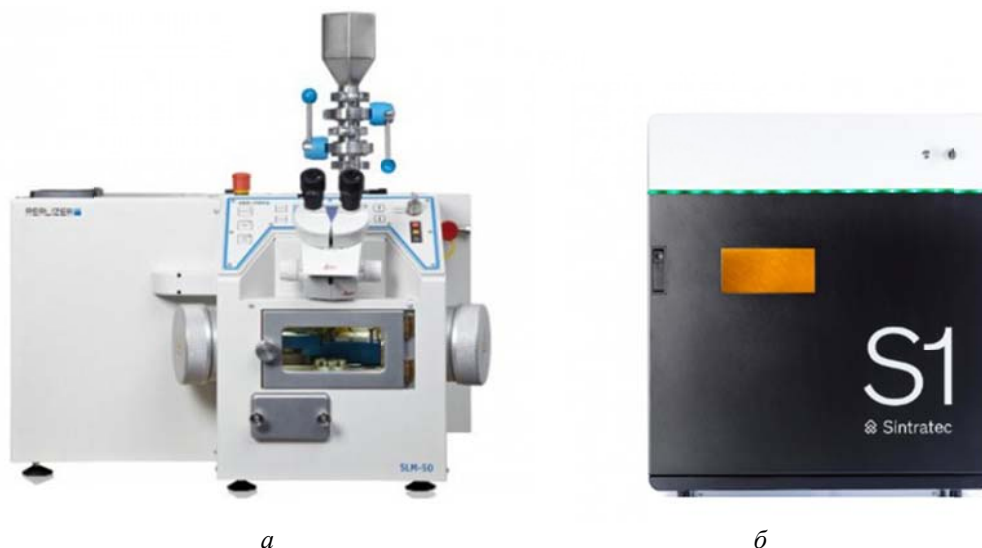


Рисунок 6 – Установки, работающие с порошковыми материалами:
а) SLM 50; б) Sintratec S1.

Производители оборудования для трехмерной печати стремятся уменьшить габариты 3D-принтеров. Это касается и сложных установок работающих с порошковыми материалами (рисунок 6), например, установка SLM 50 немецкой компании ReaLizer GmbH, работающая

по технологии SLM имеет размеры всего 80х70х50 см, вес 80 кг. Еще одним примером может служить 3D-принтер Sintratec S1 (технология SLS), работает с порошками нейлона и термопластичного полиуретана, обладая размерами 75,7х67х36,5 см, вес 67 кг.

В настоящее время перспективны установки (рисунок 7), объединяющие в себе несколько аддитивных технологий. Примером может служить 3D-принтер S-Titanium Pro австралийской фирмы Aurora Labs (рисунок 7а). В установке совмещается сразу три технологии: SLS, SLM, DMD. Габаритные размеры 60х70х235 см, вес 170 кг. Так же создаются оригинальные гибридные решения: аддитивное производство по технологии DMD и фрезерный станок в одной установке Lasertec 65 3D Hybrid компании DMG MORI (рисунок 7, б).



Рисунок 7 – Гибридные установки:
а) S-Titanium Pro; б) Lasertec 65 3D Hybrid.

Актуальным стоит вопрос о создании линий серийного производства по аддитивным технологиям. Различные компании предлагают свои производственные решения. Компания Stratasys представила стеллажную и конвейерную линию печати по FDM технологии (рисунок 8). В стеллажной линии 3D-принтеры объединенные в единую рабочую сеть, где поступающие заказы обрабатываются автоматически. В конвейерной системе функцию рабочего стола выполняет конвейерная лента. Они позволяют не только печатать несколько изделий без участия человека, заменяя рабочую область продвижением ленты, но и печатать изделия увеличенной длины [12].

Компания Voodoo Manufacturing (США, г. Бруклин) организовала автоматизированную производственную линии 3D-печати, рисунок 9.

Роботизированная рука-манипулятор занимается сбором готовых объектов из камер печати девяти FDM 3D-принтеров и устанавливает изделия на конвейерную ленту. Оборудование работает 24/7, участие оператора минимальное в обслуживании линии. Всего в компании задействовано около 160 штук 3D-принтеров. Основная целью проекта – конкуренция традиционным методам серийного производства [13].

Заключение. Таким образом, основные направления дальнейшего развития аддитивных технологий в машиностроении заключаются в следующем:

- снижение габаритных размеров оборудования;
- создание установок, объединяющих в себе несколько аддитивных технологий;
- создание гибридных установок, объединяющих аддитивное формообразование и обработку резанием;

– применение конвейерного и стеллажного размещения аддитивных установок в целях значительного повышения серийности производства изделий.



а

б

Рисунок 8 – Линии производства компании Stratasys:

а) стеллажная линия; б) конвейерная линия.



Рисунок 9 – Автоматизированная производственная линия 3D-печати

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) | Энциклопедия 3D-печати [Электронный ресурс] URL: http://3dtoday.ru/wiki/FDM_print/ (дата обращения 21.05.2018).

2. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально–градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.
3. Sintratec S1 – Sintratec [Электронный ресурс] URL: <https://sintratec.com/products/s1> (дата обращения 21.05.2018).
4. SLS 3D Принтер Red Rock [Электронный ресурс] URL: <http://www.rengineer.ru/projects/90/> (дата обращения 21.05.2018).
5. Технология многоструйного моделирования (MJM) | Энциклопедия 3D–печати [Электронный ресурс] URL: http://3dtoday.ru/wiki/MJM_print/ (дата обращения 21.05.2018).
6. Технология DMD – прямое нанесение металла [Электронный ресурс] URL: http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/dmd_tech/ (дата обращения 21.05.2018).
7. Смуров И.Ю. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ / Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А., Окунькова А.А., Черкасова Н.Ю., Антоненкова Г.В. // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 1. С. 36–38.
8. REC. Испытание прочности 3D–печати Москва // ООО «ПРОМЕДИА», «Аддитивные технологии» №1, 2017. – 40 с. (16–19 с.)
9. ESA tests 3D printing for space: redesign Tropomi mirror using AM | 3D Printer News & 3D Printing News [Электронный ресурс] URL: <https://www.3ders.org/articles/20141008-esa-tests-3d-printing-for-space-redesign-tropomi-mirror-using-am.html> (дата обращения 21.05.2018).
10. Launch to the Future by Integrated Efficiency 13 steps less – 1 step ahead [Электронный ресурс] URL: http://www.lzn-hamburg.de/fileadmin/user_upload/PDF_s/Flyer/LZN-branchenflyer-aerospace.pdf (дата обращения 21.05.2018).
11. Разрешение 3d принтера, описание, понятие и сущность данного параметра 3d печати [Электронный ресурс] URL: <http://getfab.ru/post/621/> (дата обращения 21.05.2018).
12. Top 3D Expo 2018: Профессиональная FDM–печать. Новые материалы. Новые горизонты применения / Блог компании Top 3D Shop / Хабр [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/company/top3dshop/blog/371517/> (дата обращения 21.05.2018).
13. Voodoo Manufacturing aim for a 24/7 3D printing factory with robot–arm powered Project Skywalker – 3D Printing Industry [Электронный ресурс] URL: <https://3dprintingindustry.com/news/voodoo-manufacturing-aim-247-3d-printing-factory-robot-arm-powered-project-skywalker-108157/> (дата обращения 21.05.2018).
14. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.

Муравьев Андрей Александрович
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
Аспирант кафедры машиностроения
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
E-mail: andrei-20101@yandex.ru

Маркова Наталья Сергеевна
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
Студент кафедры электроники, радиотехники и
систем связи
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
E-mail: maggotps@gmail.com

Тарапанов Александр Сергеевич
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
кафедры машиностроения
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
E-mail: tarapanov@rambler.ru

A.A. MURAVEV, N.S. MARKOVA, A.S. TARAPANOV

PERSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Abstract. *The article considers the most common additive technologies that can be used in science-intensive industries: mechanical engineering, instrument making, aerospace. Directions for the development and improvement of 3D printing installations have been determined. The operational properties of products obtained using the most common technologies, such as SLM and FDM, are given. It has been established that additive technologies can seriously compete with traditional methods of mass production.*

Keywords: *additive technologies, 3D printing, 3D printing technologies, 3D printers.*

BIBLIOGRAPHY

1. Modeling by the method of layer-by-layer fusing (FDM) | Encyclopedia of 3D printing [Electronic resource] URL: http://3dtoday.ru/wiki/FDM_print/ (circulation date 21.05.2018).
2. Shishkovsky I.V. Laser synthesis of functional gradient mesostructures and volumetric products. – Moscow: Fizmatlit, 2009. – 424 p.
3. Sintratec S1 – Sintratec [Electronic resource] URL: <https://sintratec.com/products/s1> (circulation date 21.05.2018).
4. SLS 3D Printer Red Rock [Electronic resource] URL: <http://www.rengineer.ru/projects/90/> (circulation date 21.05.2018).
5. Multi-jet simulation technology (MJM) | Encyclopedia of 3D printing [Electronic resource] URL: http://3dtoday.ru/wiki/MJM_print/ (circulation date 21.05.2018).
6. DMD technology – direct metal deposition [Electronic resource] URL: http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/dmd_tech/ (circulation date 21.05.2018).
7. Smurov I.Yu. Additive production using a laser. Conducting experimental works / Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadrojtsev I.A., Okunkova A.A., Cherkasova N.Yu., Antonenkova G.V. // Bulletin of MSTU «Stankin». 2012. № 1. P. 36–38.
8. REC. Test of the strength of 3D printing Moscow // ООО «PROMEDIA», «Additive Technologies» № 1, 2017. – 40 p. (16–19 p.)
9. ESA tests 3D printing for space: redesign Tropomi mirror using AM | 3D Printer News & 3D Printing News [Electronic resource] URL: <https://www.3ders.org/articles/20141008-esa-tests-3d-printing-for-space-redesign-tropomi-mirror-using-am.html> (circulation date 21.05.2018).
10. Steps to the Future by Integrated Efficiency 13 steps less – 1 step ahead [Electronic resource] URL: http://www.lzn-hamburg.de/fileadmin/user_upload/PDF_s/Flyer/LZN-branchenflyer-aerospace.pdf (date of circulation on 21.05.2018).
11. The resolution of the 3d printer, the description, concept and essence of this parameter of 3d printing [Electronic resource] URL: <http://getfab.ru/post/621/> (circulation date 21.05.2018).
12. Top 3D Expo 2018: Professional FDM–printing. New materials. New horizons of application / Blog of the company Top 3D Shop / Habr [Electronic resource] URL: <https://habr.com/company/top3dshop/blog/371517/> (circulation date 21.05.2018).
13. Voodoo Manufacturing aiming for a 24/7 3D printing factory with a robot–arm powered Project Skywalker – 3D Printing Industry [Electronic resource] URL: <https://3dprintingindustry.com/news/voodoo-manufacturing-aim-247-3d-printing-factory-robot-arm-powered-project-skywalker-108157/> (circulation date 21.05.2018).
14. Gibson J., Rosen D., Staker B. Additive Production Technologies. Three–dimensional printing, rapid prototyping and direct digital production. M.: TECHNOSPHERE, 2016. – 656 p.

Muravev Andrei Aleksandrovich

OSU named I.S. Turgenev, Orel
Post–graduate student of the
Machine Building Department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E–mail: andrei–20101@yandex.ru

Markova Natalia Sergeevna

OSU named I.S. Turgenev, Orel
Student
Department of Electronics, Radio Engineering and
Communication Systems
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E–mail: maggotps@gmail.com

Tarapanov Aleksander Sergeevich

OSU named I.S. Turgenev, Orel
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Machine Building Department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E–mail: tarapanov@rambler.ru

К.Ю. ФЕДОРОВСКИЙ

ОПТИМАЛЬНЫЙ РАЗМЕР КАНАЛА СУДОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Аннотация. В отечественном и зарубежном судостроении все чаще используются замкнутые системы охлаждения энергетических установок. Для отвода теплоты могут быть использованы теплообменники лабиринтного типа. Приведены зависимости, описывающие теплоотдачу в таких каналах. С их использованием определены оптимальные размеры поперечного сечения лабиринтного канала. Это позволяет достичь максимальных значений коэффициентов теплопередачи и снизить массогабаритные показатели таких систем охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения, теплообменный аппарат, лабиринтный канал, оптимальный размер.

Введение.

В настоящее время при создании различных технических средств освоения морского шельфа все больше используется замкнутой системы охлаждения (ЗСО) энергоустановок, исключая прием забортной охлаждающей воды [1–3]. Данные системы в эксплуатации отличаются высокими экологическими показателями и надежностью. Наглядным подтверждением этому является тот факт, что по данным [4] среди проектов судов, представляемых для рассмотрения в главное управление Российского морского регистра судоходства, приблизительно в 30% случаев используются ЗСО.

Важнейшим элементом таких систем является конечное устройство теплоотвода (КУТ), обеспечивающее отвод теплоты от циркулирующей по замкнутому контуру пресной воды в окружающую морскую акваторию. Размеры этого устройства в значительной степени определяют массогабаритные показатели всей системы охлаждения и, как следствие, возможности её внедрения в практику. Отсюда следует, что необходимо назначить такие конструктивные параметры устройств, которые обеспечили бы достижение максимальных значений коэффициента теплопередачи.

В качестве КУТ широко используются аппараты лабиринтного типа, в которых охлаждаемая пресная вода движется в лабиринтном канале. Такие устройства могут быть применены как для судов, так и для разнообразных морских платформ.

Рассмотрим первый случай, связанный с использованием обшивки судов (рисунок 1). Передача теплоты осуществляется через судовую обшивку 1, поэтому такие аппараты называются обшивочными теплообменными аппаратами (ОТОА). Между элементами набора 2 установлены дополнительные листы 3, в результате чего образуется лабиринтный канал 4. Подвод и отвод охлаждаемого теплоносителя (пресной воды) осуществляется через патрубки 5.

Аппараты конструктивно довольно просты, при изготовлении не требуют специального технологического оборудования, легко очищаются и окрашиваются при доковании судна. При этом обводы корпуса полностью сохраняются. Успешным примером применения указанных устройств теплоотвода является серия отечественных плавкранов проекта 15201 грузоподъемностью 500т., построенных на Севастопольском морском заводе.

ОТОА лабиринтного типа используют имеющиеся элементы набора корпуса судна. Расстояние между этими элементами регламентируется Российским морским Регистром судоходства, что фиксирует ширину b и длину l_n канала. Рассмотрим влияние на теплоотдачу высоты h канала. Обычно при проектировочном расчете считаются заданными: вид и расход W охлаждаемого теплоносителя, температуры его входа t'_x и выхода t''_x .

В результате специально проведенных экспериментальных исследований определено, что теплоотдача в канале описывается уравнением подобия

$$\overline{Nu}_1 = 46 Re^{0,4} Pr_{ж}^{0,4} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{cl}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{d_{эк}}{l_{п}} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\bar{t}_{ж}}{\bar{t}_{cl}} \right)^{-3,0} \quad (1)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$ – число Нуссельта;

$Re = \frac{vd}{\nu}$ – Число Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – Число Прандтля;

$d_{эк}$ – эквивалентный диаметр канала;

$l_{п}$ – длина прямого участка между поворотами канала;

индексы: *ж* и *с* – соответственно жидкость и стенка.

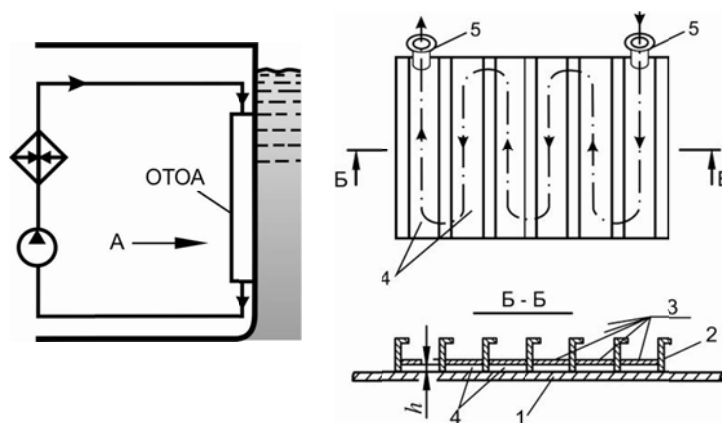


Рисунок 1 – Обшивочный теплообменный аппарат лабиринтного типа:

1 – судовая обшивка; 2 – элементы набора корпуса судна; 3 – дополнительные листы;

4 – лабиринтный канал; 5 – парубки подвода и отвода охлаждаемого теплоносителя

Зависимость справедлива при $8000 < Re < 330000$; $2,1 < Pr_{ж} < 3,9$; $1,9 \cdot 10^{-2} < d_{эк}/l_{п} < 7,8 \cdot 10^{-2}$; $0,8 < Pr_{ж}/Pr_{cl} < 0,94$; $1,0 < \bar{t}_{ж}/\bar{t}_{cl} < 1,2$.

При заданном расходе W скорость движения воды в канале

$$v = \frac{W}{b \cdot h},$$

а эквивалентный диаметр

$$d_{эк} = \frac{2b \cdot h}{b + h}.$$

Пренебрегая влиянием $(Pr/Pr_c)^{0,25}$, что часто делается в инженерной практике, выражение (1) может быть преобразовано к виду

$$\alpha_1 \approx \frac{C}{h^{0,1} (b+h)^{0,3}},$$

где

$$C = 56 \frac{Pr^{0,4} \cdot W^{0,4}}{\nu^{0,4} \cdot \lambda \cdot l_{п}^{0,9} \cdot b^{0,1}} \left(\frac{\bar{t}_1}{\bar{t}_c} \right)^{-0,3}.$$

Отсюда видно, что уменьшение высоты канала h ведет к улучшению теплоотдачи. Обычно по технологическим причинам h не выполняют менее 8...10 мм. Для охлаждаемого теплоносителя достаточным является $Re = (3...4) \cdot 10^4$. При охлаждении пресной воды рекомендуемая скорость в канале лежит в пределах 0,7...1,1 м/с. Причем, в случае работы такого аппарата при движении судна, задаваемые скорости пресной воды должны быть смещены в сторону больших значений из указанного диапазона.

Другой разновидностью лабиринтных КУТ являются погружные теплообменные аппараты (ПТОА), которые размещаются на судах либо за пределами обшивки корпуса,

либо, для малоподвижных объектов (например, морские платформы), – на некоторой глубину в море (рисунок 2). Для конкретных объектов предусматривают те или иные возможности относительно возможной конструкции аппаратов. В частности это могут быть одиночные пластины или их набор. Внутри пластин сформирован лабиринтный канал, по которому движется охлаждаемая пресная вода (рисунок 3).

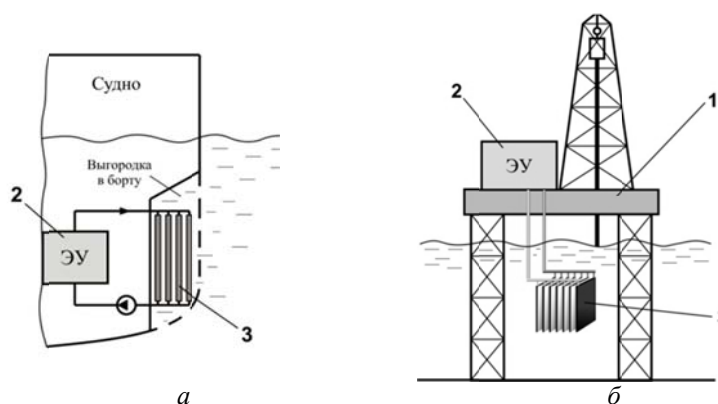


Рисунок 2 – Схема размещения ПТОА на судне (а) и морской буровой платформе (б):
1 – морская буровая платформа; 2 – энергетическая установка; 3 – ПТОА

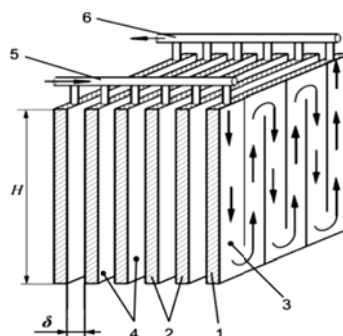


Рисунок 3 – Схема погружного теплообменного аппарата:

1 – ПТОА с одиночной пластиной; 2 – ПТОА с несколькими пластинами; 3 – лабиринтный канал внутри пластины; 4 – зазор между пластинами; 5 – трубопроводы подвода и отвода охлаждаемого теплоносителя

В ПТОА возможно изменение как ширины b , так и высоты h канала. Рассмотрим вопрос оптимального соотношения этих параметров. В случае нахождения ПТОА в неподвижной воде скорость пресной охлаждаемой воды рекомендуется задавать в пределах 0,5...0,8 м/с.

В результате специально проведенных экспериментальных исследований определено, что теплоотдача в таком канале описывается уравнением подобия

$$\overline{Nu}_1 = 31 Re^{0,4} Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr_{cl}} \right)^{0,25} \left(\frac{d_{\dot{y}\hat{e}}}{l_1} \right)^{0,9}, \quad (2)$$

Приведенная зависимость справедлива при $Re = (1,2...3,2) \cdot 10^4$; $Pr = 1,9...4,9$; $Pr/Pr_c = 0,95...0,99$. Пренебрегая в зависимости (2) влиянием $(Pr/Pr_c)^{0,25}$, можно записать

$$\overline{\alpha}_1 = C \cdot d_{\dot{y}\hat{e}}^{0,3}, \quad (3)$$

где

$$\tilde{N} = 31 \frac{\alpha \cdot v^{0,4}}{v^{0,4} \cdot l_1^{0,9}} Pr_x^{0,4}.$$

Выразим высоту канала h через расход W , скорость v и ширину канала b :

$$h = \frac{W}{v \cdot b}.$$

Тогда

$$d_{\text{гв}} = \frac{4f}{\bar{I}} = \frac{2W}{v \left(b + \frac{W}{v \cdot b} \right)}.$$

Выполнив соответствующую подстановку в зависимость (3), получаем:

$$\bar{\alpha}_1 \approx \tilde{N}_* \left(b + \frac{W}{v \cdot b} \right)^{-0,3},$$

где

$$C_* = C \left(\frac{2W}{v} \right)^{0,3}.$$

Предварительные расчеты показали, что данная функция имеет выраженный максимум (рисунок 3).

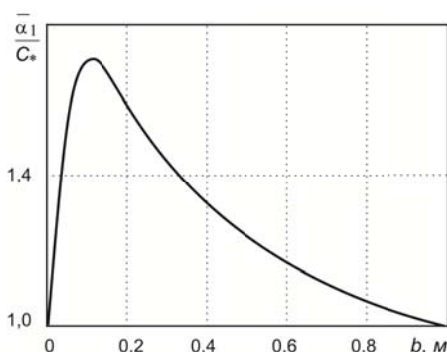


Рисунок 4 – Зависимость $\bar{\alpha}_1 / \tilde{N}_*$ от ширины канала b при $W=25 \text{ м}^3/\text{ч}$, $v=1 \text{ м/с}$

Он может быть найден из условия:

$$\frac{d}{db}(\bar{\alpha}_1) = 0.$$

После преобразования получим:

$$\left(1 - \frac{W}{v} \cdot \frac{1}{b^2} \right) = 0,$$

или

$$b = \sqrt{\frac{W}{v}} = \sqrt{f}.$$

Это означает, что в ПТОА оптимальной является квадратная форма поперечного сечения лабиринтного канала.

Таким образом, следование полученным рекомендациям в отношении размеров поперечного сечения лабиринтного канала позволяет минимизировать массогабаритные характеристики КУТ и создает условия для более широкого внедрения замкнутых систем охлаждения в практику судостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоровский К.Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 160с.
2. Федоровская Н.К. Экологически безопасная система охлаждения энергоустановок / Н.К. Федоровская // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-2 (324). – С. 127–133.
3. Федоровский К.Ю. Природоохранная технология обеспечения охлаждения судовой энергетической установки / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская // Сб. науч. трудов Гос. университета морского и речного флота им. С.О. Макарова. – С.Петербург, 2016. – С. 356–362.
4. Шурпяк В.К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов / В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2014. – №37. – С. 51–55.

Федоровский Константин Юрьевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений»,
299053, Севастополь, ул. Университетская 33.
тел. +79787096617,
E-mail: fedkonst@rambler.ru

K.Yu. FEDOROVSKY

**OPTIMAL SIZE CHANNEL OF SHIPS HEAT EXCHANGERS
OF LABYRINTH TYPE**

Abstract. *In domestic and foreign shipbuilding, closed systems for cooling power plants are increasingly being used. For heat removal heat exchangers of labyrinth type can be used. Dependences describing heat transfer in such channels are given. With their use, the optimal cross-sectional dimensions of the labyrinth channel have been determined. This allows you to achieve the maximum values of heat transfer coefficients and reduce the weight and dimensions of such systems cooling.*

Keywords: *cooling system, heat exchanger, labyrinth channel, optimal size.*

BIBLIOGRAPHY

1. Fedorovsky K.Yu. Closed cooling systems for ship power installations / K.Yu. Fedorovsky, N.K. Fedorovskaya. – M.: INFRA-M, 2017. – 160s.
2. Fedorovskaya N.K. Ecologically safe system for cooling power plants / N.K. Fedorovskaya // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.– 2017.– No. 4–2 (324). – P. 127–137.
3. Fedorovsky K.Yu. Environmental protection technology for cooling the ships power plant / K.Yu. Fedorovsky, N.K. Fedorovskaya // Sb. sci. works of the State. University of the Marine and River Fleet named after S.O. Makarova.–S.Peterburg, – 2016. – P. 356–362.7–133.
4. Shurpak V.K. Accounting for the features of cooling systems in assessing the energy efficiency of ships / V.K. Shurpyak // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. – 2014.– No. 37.– P. 51–55.

Fedorovskiy Konstantin Yuryevich

Sevastopol State University Sevastopol,
Doctor of Techn. Sciences, Professor,
Head of department Power plants marine vessels and structures,
299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33,
Tel. +79787096617,
E-mail: fedkonst@rambler.ru

А.О. ХАРЧЕНКО, С.М. БРАТАН, Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ, Д.О. ВЛАДЕЦКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТАНОК В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований подтверждена адекватность разработанных ранее теоретических моделей, предусматривающих наличие и необходимость фильтрации вибрационных воздействий от внешней среды (морского волнения) и соседнего работающего оборудования. Разработанные методики и конструкции экспериментальных стендов для исследования качества процессов шлифования дают возможность изучать закономерности возникновения вибраций и их параметров, воздействующих на станок при разных уровнях внешних факторов – от морского волнения до окружающего станок работающего оборудования в производственных условиях плавучей мастерской.

Ключевые слова: плавучая мастерская, шлифовальный станок, процесс шлифовальной обработки, виброизмерения, амплитуда виброперемещения, частота механических колебаний, морское волнение.

Введение.

Для практического использования разработанного формализованного описания динамической системы круглошлифовального станка с учетом вибрационных воздействий от внешней среды через плавучее основание мастерской необходимо проверить адекватность полученной математической модели реальному процессу и определить параметры качества обрабатываемых поверхностей, получаемых при различных уровнях внешних воздействий. Для проверки адекватности использовались материалы экспериментальных исследований в производственных условиях на ПМ–56 и ПМР–463, а также в лабораторных условиях кафедры «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» [1, 2, 3, 4, 5].

Основная часть.

Процессы шлифования исследовали в производственных условиях на станках моделей 3В12 и 3У12А (Россия), в лабораторных условиях – на экспериментальном стенде на базе универсального круглошлифовального станка ВUA 16 (Чешская Республика) (таблица 1).

Таблица 1– Технические характеристики технологического оборудования для испытаний

Параметры	3У12А	3В12	ВUA 16
Наибольший диаметр заготовки D , мм	200	200	160
Наибольшая длина заготовки L , мм	500	500	250
Пределы частоты вращения шпинделя n_{min} , об/мин	20	–	2420
Пределы частоты вращения шпинделя n_{max} , об/мин	1650	2240	3200
Класс точности станка по ГОСТ 8–82, (Н, П, В, А, С)	А	В	В
Частота вращения шпинделя бабки изделия n_d , об/мин	55...900	78...780	250, 355, 500, 710
Мощность двигателя N , кВт	2,2	3,0	2,5
Габариты станка (длина х ширина х высота), мм	2150х1500х1950	2600х1750х1750	2740х1100х1500
Масса, кг	3800	3000	1400

Станки практически не отличаются по своим технологическим возможностям, близки по габаритам и точности, по массе относятся к средним станкам. Исследования проводили при условиях обработки, отраженных в таблице 2.

Выбор таких материалов и характеристик шлифовальных кругов обусловлен их широким использованием на машиностроительных и судостроительных предприятиях. Диапазон исследуемых режимов резания определялся по существующим рекомендациям [6, 7, 8]. Перед проведением экспериментов абразивные шлифовальные круги правили методом обтачивания алмазно–металлическим карандашом с продольной подачей $S_{xnp} = 0,007 \text{ м/с}$, поперечной подачей $S_{ynp} = 0,03 \text{ мм/дв.х}$, числом рабочих проходов – 4, проходов выхаживания – 4. При шлифовании в качестве СОТС использовали растворы, рекомендованные для обработки соответствующей категории материалов [7, 8]. Жидкость в зону резания подавали свободно падающей струей при расходе $0,2...0,25 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Перед выполнением экспериментов оборудование прогревали, контролировали настройку измерительной аппаратуры и режимы резания. Съём материала Δr определяли с помощью микрометра, как среднее значение разности диаметров заготовки до и после обработки, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Параметры режимов резания (частота вращения инструмента и заготовки, радиальная подача) контролировали при проведении экспериментальных исследований с помощью секундомера, стрелочного тахометра и стробоскопического тахометра модели 2ТСт 32–456. Показатели волнистости и шероховатости обработанной поверхности определяли по известным методикам [9] с использованием профилометров–профилографов моделей 201 и «Talisurf 5M–120». При построении волнограмм применяли механическую фильтрацию шероховатости.

Таблица 2 – Условия проведения исследований

Обраб. материалы	Габар.об раб. деталей ($D \times L$), мм	Треб. к точности обраб. поверхн., не более, мкм	Шлифовальный круг	Режимы обработки	СОТС
Сталь: – 45 – 40Х	30x200	1) постоянство диаметра в продольном сечении – 2 2) круглость – 0,06 3) волнистость $W_z = 5,0$ 4) шероховатость $R_a = 0,08$	ПП250x20x76 64C100 СТ13К5	$V_{kp} = 20...30 \text{ м/с}$ $V_d = 10...15 \text{ м/мин}$ $t = 0,005...0,015 \text{ мм}$ $S_{np} = 0,03...5,0 \text{ м/мин}$	Раствор эмульсо-ла EL и воды (1:40)

В ходе экспериментов оценивалось влияние на показатели процесса шлифования параметров вибрационных воздействий, в том числе от окружающей среды и внешнего оборудования. Для проведения экспериментальных исследований были задействованы круглошлифовальные станки 3У12А и 3В12 (рисунок 1, а), установленные на механообрабатывающих участках плавучих мастерских ПМ–56 и ПМ–875 наряду с другим основным оборудованием (рисунок 1, б–и). В частности, виброизмерения проводились на круглошлифовальном станке в зоне станина–фундамент в направлениях осей X и Y , а также в зоне направляющих стола в продольном (X) и вертикальном (Y) направлениях. Замеры осуществляли как при неработающем станке и полном отключении всего технологического и иного оборудования, так и при работающем круглошлифовальном станке, а затем и при работающем соседнем оборудовании – плоскошлифовальном станке СПС–20с (рисунок 1, б)

и включенной вытяжной вентиляции. Оборудование установлено на бетонное основание и жестко закреплено на палубе плавучей мастерской, в том числе с использованием специальных металлических растяжек (рисунок 1, а, б, г, д, е, з, и).

Стенд на базе станка модели BUA 16 (рисунок 2, а) был оснащен комплексом контрольно-измерительной аппаратуры. Установку дополнили устройством в виде поршневого компрессора FINI Tiger 245 (Италия) (рисунок 2,б), создающего вибрационные воздействия на технологическую систему станка, имитирующие внешние воздействия на станочное оборудование, размещенное на механообрабатывающем участке плавучей мастерской. Станок BUA 16 установили на фундамент идентично установке в плавучих мастерских. Поршневой компрессор (таблица 3) размещали на общей поверхности пола на разном удалении от станка, создавая на разных режимах работы компрессора различные по величине вибрационные воздействия, соответствующие воздействиям на станки в плавучей мастерской внешней среды (морского волнения) и работающего соседнего оборудования. Для определения параметров вибраций использовали виброметр «Вибротест–МГ4.01» (рисунок 2, в, г).



Рисунок 1 – Общий вид основного оборудования механообрабатывающего участка плавучей мастерской:

а – универсальный круглошлифовальный станок 3В12 (3В12А, SWA-25), б – плоскошлифовальный станок SPC –20с, в – радиально-сверлильный станок, г – горизонтально-расточный станок, д – поперечно-строгальный станок, е – долбежный станок, ж – токарно-винторезный станок, з – горизонтально-фрезерный станок, и – вертикально-фрезерный станок



а



б



в



г

Рисунок 2 – Общий вид экспериментального стенда на базе универсального круглошлифовального станка BUA 16 (а), поршневого компрессора FINI Tiger 245 (б), виброметра «Вибротест–МГ4.01» для определения параметров вибраций (в) и работы в режиме передачи данных в персональный компьютер (г)

Виброметр «Вибротест–МГ4.01» является современным отечественным прибором, предназначенным для измерений виброскорости, виброускорения, виброперемещения и частоты колебаний твердого тела как в научно–исследовательской и опытно–конструкторской деятельности, так и в различных отраслях промышленности, включая предприятия точного машиностроения. Функционал виброметра включает определение параметров вибрации частотой от 2 до 1000 Гц (амплитуды, виброскорости и виброускорения соответственно в следующих пределах: 0,01...20 мм, 3,3...9000 мм/с и 2...170 м/с²). Виброметр характеризуется достаточно высокой точностью: погрешность измерения частоты – до 1 Гц (в диапазоне 2...100 Гц – погрешность $\pm 0,2$ Гц), остальных параметров – не более 5%.

Таблица 3 – Технические характеристики компрессора

Производитель	FINI (Италия)
Напряжение питания, В	220
Давление, бар	8
Объем ресивера, л	24
Производительность, л/мин	245
Мощность двигателя, кВт	1,5
Масса, кг	25
Размеры, (LxBxh), мм	610 x 270 x 630

Полученные значения фиксируются в памяти объемом 500 ячеек с автоматическим обозначением даты и времени. Виброметр имеет 3 режима работы:

– «оперативный» – измерение по команде оператора;

- «ждущий» – определение и запоминание показателей частоты и амплитуды при выходе их за заданные предельные значения;
- «наблюдение» – периодический контроль параметров через промежутки времени, устанавливаемые пользователем.

Прибор может эксплуатироваться при температуре воздуха от -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ и влажности не более 95%. Габариты виброметра – 175 x 90 x 30 мм, вибропреобразователя – $\varnothing 24$ x 50 мм. Полная масса прибора – 0,35 кг. Прибор имеет возможность гибкой настройки с помощью специального программного обеспечения, прост в управлении и обслуживании, обладает высокой скоростью измерений (время отклика – не более 12 с) и возможностью синхронизации с персональным компьютером.

При исследовании процессов чистового шлифования использовали методы дисперсионного анализа [10, 11]. При расчете доверительных интервалов применяли распределение Стьюдента, величину доверительной вероятности принимали 0.95. Проверку адекватности теоретических регрессий экспериментальным данным осуществляли при помощи критерия F – распределения. Статистическую оценку экспериментов проводили на ЭВМ с использованием разработанных в СевГУ программ.

При проведении экспериментальных исследований в условиях плавучей мастерской необходимо оценить влияние на круглошлифовальный станок вибрационных воздействий, вызываемых различными условиями внешней среды (морского волнения) и расположенным на механообрабатывающем участке работающим технологическим оборудованием. На схеме (рисунок 3) показан пример формирования таких внешних воздействий. Через плавучее основание 1 вибрации от морского волнения с меняющейся высотой волны в зависимости от уровня (слабого, значительного или сильного) с высотой волны h_{Bi} , (определяемой через величину $h_{3\%}$ – высоту волны 3% –й обеспеченности соответственно для слабого – 0...0,75 м, значительного – 0,75...2,0 м или сильного – 2,0...6,0 м) уровней, передаются на поверхность палубы 2 с фундаментом, на котором установлен станок 3. В зависимости от направления и скорости ветра V_B (радиуса r_i и длины волны L_{Bi}) силы $F_{\tilde{X}}$, $F_{\tilde{Y}}$, $F_{\tilde{Z}}$, с которыми волны ударяются о плавучее основание, передают вибрационные воздействия соответственно через палубу и фундамент станине закрепленного на нем станка, вызывая вибрации и виброперемещения с амплитудами A_X , A_Y , A_Z соответственно в направлениях его осей координат – X (поперечное перемещение), Y (вертикальное перемещение), Z (продольное перемещение).

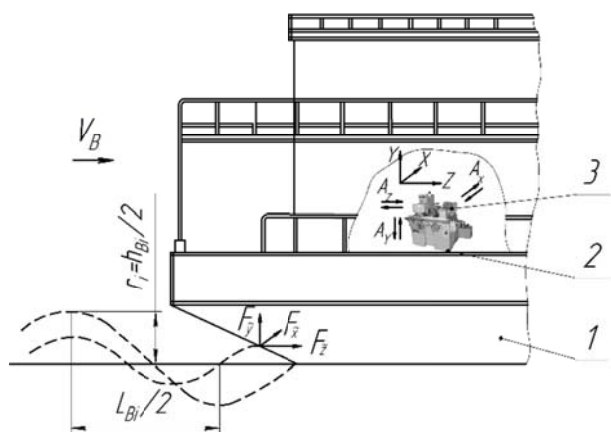


Рисунок 3 – Схема расположения круглошлифовального станка на участке плавучей мастерской:

- 1 – плавучее основание, 2 – поверхность палубы,
3 – станок 3В12

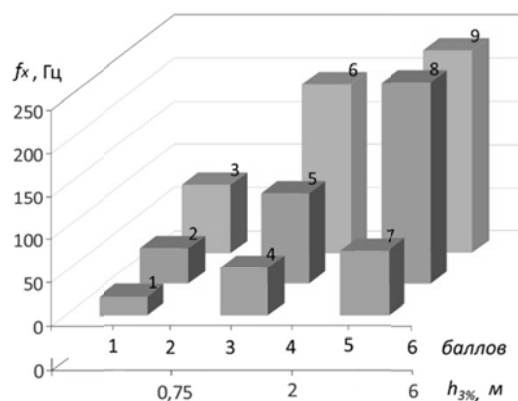
Поскольку на качество круглого шлифования главным образом влияют неучтенные дополнительные поперечные A_X и вертикальные A_Y перемещения узлов станка, вызывающие перемещения инструмента и заготовки, а дополнительные перемещения A_Z вдоль оси вращения детали и оси вращения шлифовального круга не оказывают существенного влияния на качество обработки (в частности, при врезном шлифовании), виброизмерения вдоль оси Z в рамках данной работы не производились.

Подвергались измерениям следующие состояния круглошлифовального станка:

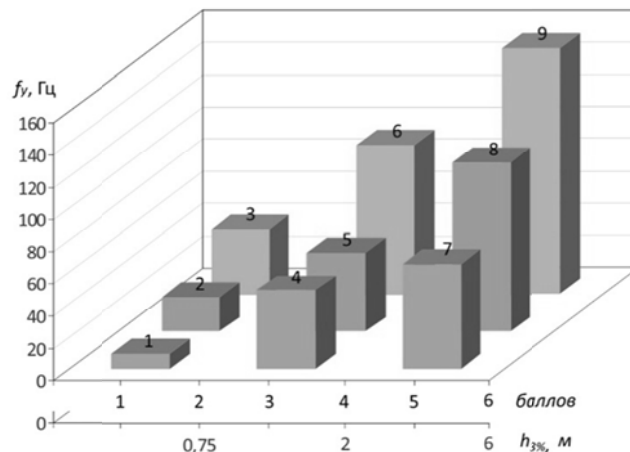
- станок отключен, не работает также внешнее технологическое и силовое оборудование плавучей мастерской, энергия подается с береговых центральных источников, вибрационные воздействия передаются только от внешней среды – морского волнения;

- станок работает, не работает внешнее технологическое и силовое оборудование плавучей мастерской, энергия подается с береговых центральных источников, вибрационные воздействия передаются от внешней среды – морского волнения и от колебаний динамической системы самого станка;

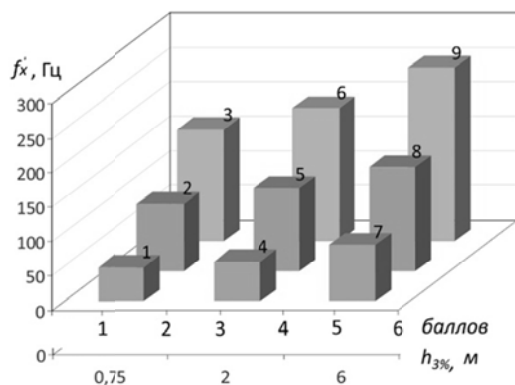
- станок работает, одновременно с ним работает расположенный рядом плоскошлифовальный станок и система вентиляции; не работает остальное технологическое оборудование участка: работает силовое и энергетическое оборудование плавучей мастерской: вибрационные воздействия передаются от внешней среды – морского волнения, от колебаний динамической системы самого станка, соседнего станка и системы вентиляции, а также от внешнего силового и энергетического оборудования.



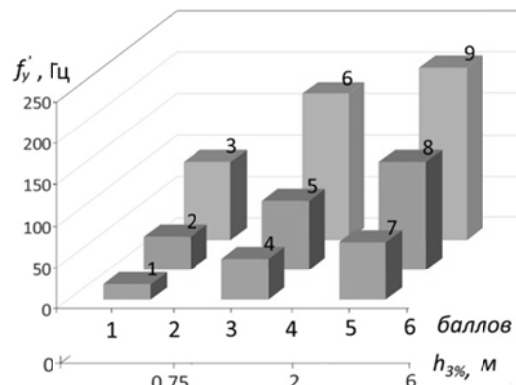
а



б



в



г

Рисунок 4 – Диаграммы зависимостей амплитуды виброперемещения (S_x , S_y , $S_{x'}$, $S_{y'}$) от состояний круглошлифовального станка (1, 4, 7 – отключен; 2, 5, 8 – работает; 3, 6, 9 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зонах измерения станина–фундамент $S_x=f(h_{3\%})$, (а); $S_y=f(h_{3\%})$, (б); а также на направляющих стола станка $S_{x'}=f(h_{3\%})$, (в); $S_{y'}=f(h_{3\%})$, (г)

Результаты измерений, проведенные в режиме «Наблюдение» через установленные интервалы времени (2 мин) в течение 1 часа для каждого из состояний станка, для каждой из зон измерения, в каждом из направлений, а также для трех уровней волнения автоматически заносятся в память прибора, после чего в режиме «Работа с ПК» осуществлялась передача данных, записанных в архиве прибора, на компьютер. Обработка полученных данных представлена в виде математических ожиданий соответствующих величин:

f_x , f_y – частот механических колебаний в зоне измерения станина–фундамент соответственно в поперечном и вертикальном направлениях, Гц; S_x , S_y – амплитуд виброперемещений в зоне измерения станина–фундамент соответственно в поперечном и вертикальном направлениях, мкм; $f_{x'}$, $f_{y'}$ – частот механических колебаний в зоне измерения

направляющих стола соответственно в поперечном и вертикальном направлениях, $\Gamma\text{ц}$; S_x , S_y – амплитуд виброперемещений в зоне измерения направляющих стола соответственно в поперечном и вертикальном направлениях, мкм .

Результаты исследований проиллюстрированы диаграммами зависимостей частоты механических колебаний (f_x , f_y , f_x , f_y) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения (рисунок 4), амплитуды виброперемещения (S_x , S_y , S_x , S_y) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения (рисунок 5). На диаграммах становятся очевидными основные особенности состояний динамической системы круглошлифовального станка при эксплуатации в условиях плавучей мастерской. Так, даже при слабом уровне волнения (1...2 балла) наблюдаются механические колебания при отключенном оборудовании (с частотами – $f_x=21,98 \text{ Гц}$, $f_y=9,778 \text{ Гц}$, $f_x=49,77 \text{ Гц}$, $f_y=19,45 \text{ Гц}$, и виброперемещениями – $S_x=64,86 \text{ мкм}$, $S_y=2,089 \text{ мкм}$, $S_x=4,736 \text{ мкм}$, $S_y=55,04 \text{ мкм}$), при включенном – с частотами – $f_x=56,02 \text{ Гц}$, $f_y=49,38 \text{ Гц}$, $f_x=58,46 \text{ Гц}$, $f_y=49,49 \text{ Гц}$, и виброперемещениями – $S_x=152,03 \text{ мкм}$, $S_y=48,36 \text{ мкм}$, $S_x=200,05 \text{ мкм}$, $S_y=135,3 \text{ мкм}$, а при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и включенной вентиляции – с частотами – $f_x=76,05 \text{ Гц}$, $f_y=65,32 \text{ Гц}$, $f_x=82,38 \text{ Гц}$, $f_y=69,52 \text{ Гц}$, и виброперемещениями – $S_x=362,08 \text{ мкм}$, $S_y=72,98 \text{ мкм}$, $S_x=429,38 \text{ мкм}$, $S_y=210,16 \text{ мкм}$.

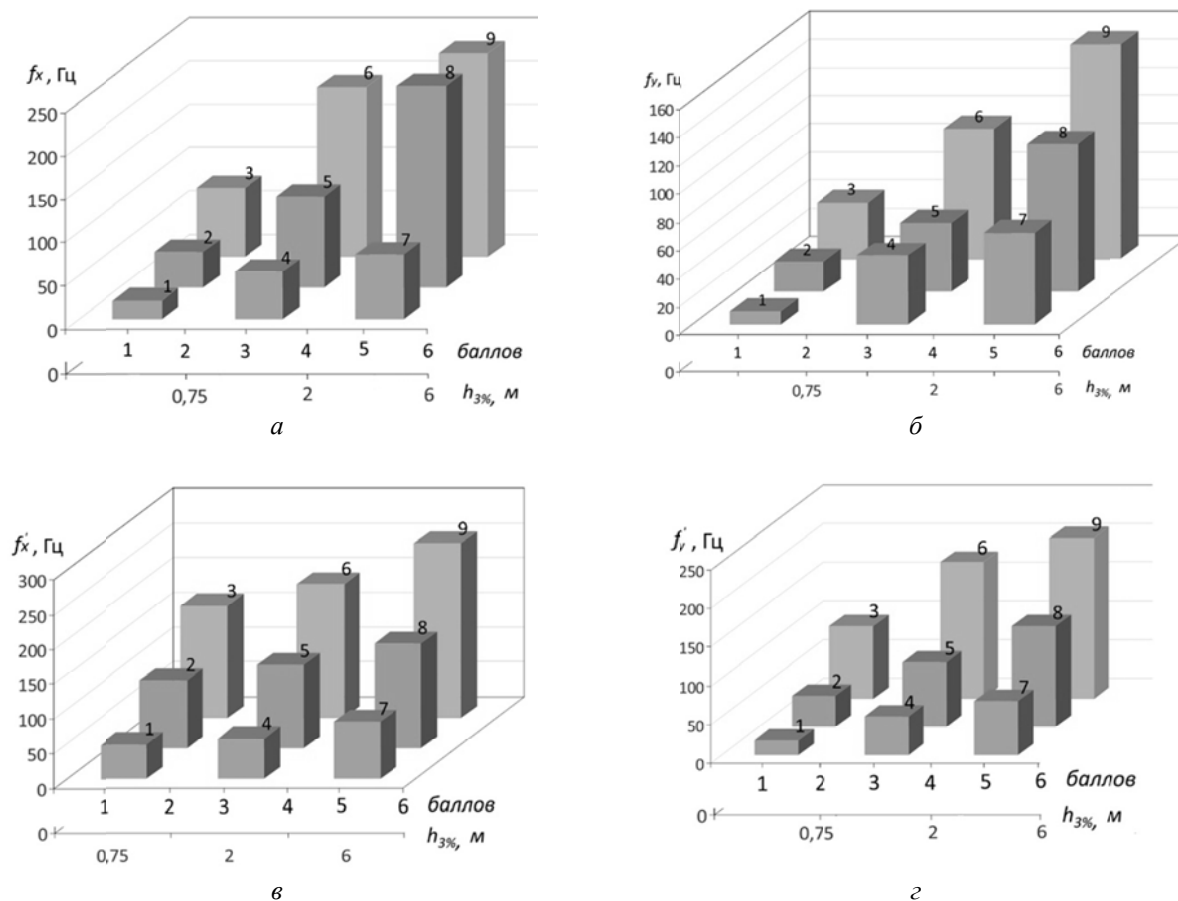


Рисунок 5 – Диаграммы зависимостей частоты механических колебаний (f_x , f_y , f_x , f_y) от состояний круглошлифовального станка (1, 4, 7 – отключен; 2, 5, 8 – работает; 3, 6, 9 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зонах измерения станина–фундамент $f_x=f(h_{3\%})$, (а); $f_y=f(h_{3\%})$, (б); а также на направляющих стола станка $f_x=f(h_{3\%})$, (в); $f_y=f(h_{3\%})$, (г)

При значительном уровне волнения (3...4 балла) механические колебания возрастают (по частоте – $f_x=42,16 \text{ Гц}$, $f_y=21,87 \text{ Гц}$, $f_x=98,19 \text{ Гц}$, $f_y=39,67 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=82,75 \text{ мкм}$, $S_y=32,48 \text{ мкм}$, $S_x=37,12 \text{ мкм}$, $S_y=62,58 \text{ мкм}$),

при включенном – по частоте – $f_x=105,41 \text{ Гц}$, $f_y=49,09 \text{ Гц}$, $f_x=120,14 \text{ Гц}$, $f_y=82,26 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=251,24 \text{ мкм}$, $S_y=65,12 \text{ мкм}$, $S_x=252,14 \text{ мкм}$, $S_y=327,7 \text{ мкм}$, а при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и включенной вентиляции – по частоте – $f_x=234,08 \text{ Гц}$, $f_y=105,19 \text{ Гц}$, $f_x=149,85 \text{ Гц}$, $f_y=129,32 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=532,86 \text{ мкм}$, $S_y=108,65 \text{ мкм}$, $S_x=639,18 \text{ мкм}$, $S_y=439,8 \text{ мкм}$. При сильном уровне волнения (5...6 баллов) механические колебания еще более возрастают (по частоте – $f_x=78,13 \text{ Гц}$, $f_y=40,16 \text{ Гц}$, $f_x=160,89 \text{ Гц}$, $f_y=92,54 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=121,93 \text{ мкм}$, $S_y=49,12 \text{ мкм}$, $S_x=156,32 \text{ мкм}$, $S_y=73,25 \text{ мкм}$), при включенном – по частоте – $f_x=195,72 \text{ Гц}$, $f_y=92,78 \text{ Гц}$, $f_x=192,18 \text{ Гц}$, $f_y=175,42 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=462,42 \text{ мкм}$, $S_y=76,69 \text{ мкм}$, $S_x=216,19 \text{ мкм}$, $S_y=478,4 \text{ мкм}$, а при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и включенной вентиляции – по частоте – $f_x=234,94 \text{ Гц}$, $f_y=152,45 \text{ Гц}$, $f_x=251,06 \text{ Гц}$, $f_y=206,58 \text{ Гц}$, и виброперемещениям – $S_x=916,52 \text{ мкм}$, $S_y=139,15 \text{ мкм}$, $S_x=445,38 \text{ мкм}$, $S_y=514,9 \text{ мкм}$.

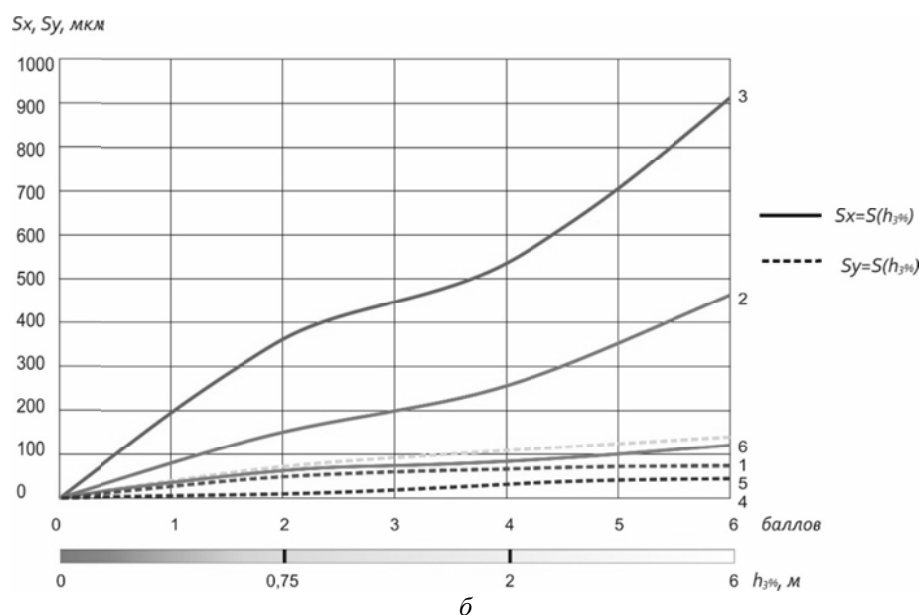
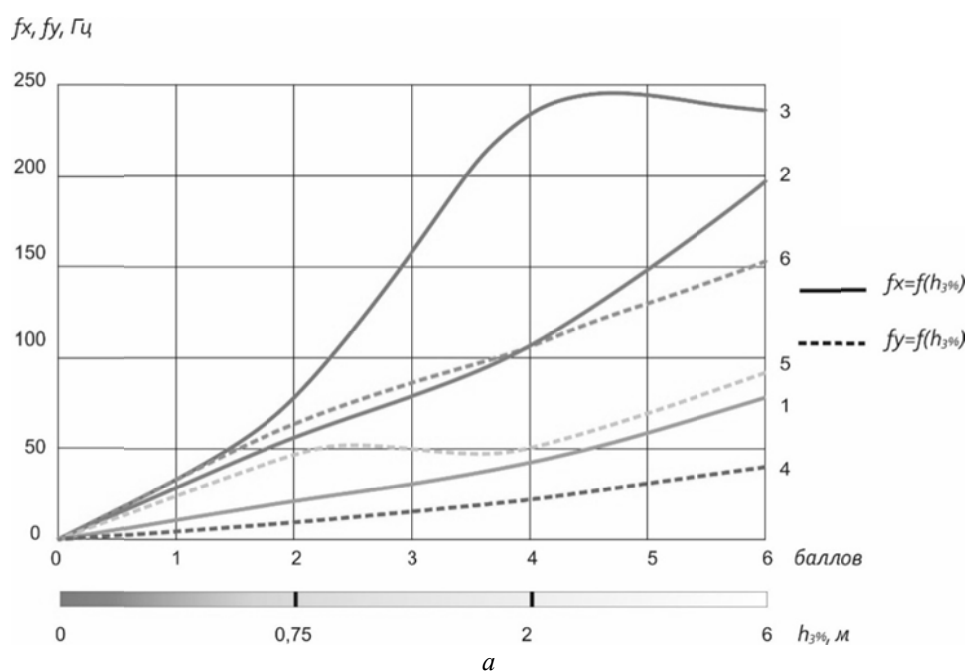


Рисунок 6 – Графики зависимостей частоты механических колебаний (f_x , f_y) (а) и амплитуды виброперемещения (S_x , S_y) (б) от состояний круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зонах измерения станина–фундамент

Графики зависимостей частоты механических колебаний (f_x , f_y , f_x , f_y) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения (рисунок 6, а) свидетельствуют о том, что как внешнее оборудование, так и окружающая среда (морское волнение) оказывают существенное влияние на параметры динамической системы круглошлифовального станка, увеличивая частоту колебаний в рабочей зоне в поперечном направлении от $f_x = 49,77 \text{ Гц}$ до $f_x = 251,06 \text{ Гц}$, в вертикальном направлении – от $f_y = 19,45 \text{ Гц}$ до $f_y = 206,58 \text{ Гц}$, т.е. соответственно от 5 до 10 раз.

Графики зависимостей амплитуды виброперемещения от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения (рисунок 6, б) также подтверждают факт того, что как внешнее оборудование, так и окружающая среда оказывают существенное влияние на увеличение виброперемещения (более чем в 9 раз) в рабочей зоне в поперечном и в вертикальном направлениях.

Указанные виброперемещения в несколько раз превышают допустимые предельные отклонения размеров обрабатываемых поверхностей при шлифовании, вследствие чего требуемое качество обработки в условиях плавучей мастерской не всегда может быть обеспечено, даже если класс точности станка и его технические характеристики позволяют теоретически это достичь.

Заключение.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований подтверждена адекватность теоретических моделей, разработанных ранее [12, 13], предусматривающих наличие и необходимость фильтрации вибрационных воздействий от внешней среды (морского волнения) и соседнего работающего оборудования.

Разработанные методики и конструкции экспериментальных стендов для исследования качества процессов шлифования дают возможность изучать закономерности возникновения вибраций и их параметров, воздействующих на станок при разных уровнях внешних факторов – от морского волнения до окружающего станок работающего оборудования в производственных условиях плавучей мастерской.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая // Вестник НТУ «ХПИ» – Технология в машиностроении: сб. науч. тр. – Харків: НТУ «ХПИ» – 2008. – №35. – С. 13–22.
2. Владецкая Е.А. Расчёт параметров качества обрабатываемой поверхности при шлифовании / Е.А. Владецкая // Наукові праці ДонНТУ – Серія «Машинобудування і машинознавство». – Вип. 6(154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 29–34.
3. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип. 150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36–40.
4. Владецкая Е.А. Уменьшение высоты волнистости поверхности при шлифовании в условиях плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // «Машиностроение – глазами молодых»: матер. междунар. научн.–техн. конф., г. Кременчуг, 30 октября–1 ноября 2013 г. – Кременчуг: КрНУ, 2013. – С. 143–145.
5. Владецкая Е.А. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Перспективы науки – 2016: Сборник докладов III Международного конкурса научно-исследовательских работ (29 апреля 2016 года). Том III (Естественные и технические науки). – Казань: ООО «Рёкета Союз», 2016. – С. 247–257.
6. Гавриш А.П. Алмазно-абразивная обработка / А.П. Гавриш, Н.Н. Хасан // Резание и инструмент в технологических системах: между. науч.–техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 1988. – Вып. 52. – С. 43–46.
7. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1978. – 124 с.

8. Маслов Е.Н. Абразивная обработка металлов / Е.Н. Маслов. – В кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 333–378.
9. Дунин–Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин–Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
10. Кузнецов Ю.Н. Теория технических систем: учебник / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – 252 с.
11. Новиков Ф.В. Условия формирования шероховатости поверхности при алмазно–абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.П. Ткаченко // Резание и инструмент в технологических системах: межд. науч.–техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 171–176.
12. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография/ С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА–М, 2018. – 154 с.
13. Sergey Bratan, Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, AleksanderKharchenko / MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017).

Харченко Александр Олегович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 54–05–57
E-mail: khao@list.ru

Братан Сергей Михайлович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 54–05–57
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Владецкая Екатерина Александровна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 54–05–57
E-mail: vladetska@rambler.ru

Владецкий Дмитрий Олегович

Филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет им. Адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры 299009, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп.8/22
E-mail: vladetski@gmail.com

A.O. KHARCHENKO, S.M. BRATAN, E.A. VLADETSKAYA, D.O. VLADETSKY

**INVESTIGATION OF THE GRINDING PROCESS
WITH THE ACCOUNT VIBRATION IMPACTS ON THE MACHINE
IN THE CONDITIONS OF A FLOATING WORKSHOP**

Abstract. *The article considers the results of experimental studies confirming the adequacy of the previously developed theoretical models that provide for the presence and necessity of filtering vibrational influences from the external environment (sea waves) and neighboring operating equipment. The developed techniques and designs of experimental stands for the study of the quality of grinding processes make it possible to study the regularities of the appearance of vibrations and their parameters that affect the machine at various levels of external factors – from sea waves to the surrounding machine tools of operating equipment in the production conditions of a floating workshop.*

Keywords: *floating workshop, grinding machine, grinding process, vibration measurement, amplitude of vibration displacement, frequency of mechanical vibrations, sea waves.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bratan S.M. Analiz vliyaniya kolebaniy, peredavayemykh cherez fundament stanka, na kachestvo protsessy shlifovaniya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya // Vestnik NTU «KHPI» – Tekhnologiya v mashinostroyenii: sb. nauch. tr. – Kharkiv: NTU «KHPI» – 2008. – №35. – С. 13–22.

2. Vladetskaya Ye.A. Raschot parametrov kachestva obrabatyvayemoy poverkhnosti pri shlifovanii / Ye.A. Vladetskaya // *NaukovipratiDonNTU – Seriya «Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo»*. – Vip. 6(154). – Donetsk: DonNTU, 2009. – S. 29–34.
3. Vladetskaya Ye.A. Razrabotka formiruyushchego filtra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoy masterskoy / Ye.A. Vladetskaya // *VisnikSevNTU*. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol: Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36–40.
4. Vladetskaya Ye.A. Umensheniye vysoty volnistosti poverkhnosti pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh remontnikh masterskikh / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan // «Mashinostroyeniye – glazami molodykh»: mater. mezhdunar. nauchn.–tekhn. konf., g. Kremenchug, 30 oktyabrya–Inoyabrya 2013 g. – Kremenchug: KrNU, 2013. – S. 143–145.
5. Vladetskaya Ye.A. Povysheniye kachestva shlifovalnoy obrabotki v usloviyakh plavuchey masterskoy / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan // *Perspektivy nauki – 2016: Sbornik dokladov III Mezhdunarodnogo konkursa nauchno–issledovatel'skikh rabot (29 aprelya 2016 goda). Tom III (Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki)*. – Kazan: OOO «Roketa Soyuz», 2016. – S.247–257.
6. Gavrish A.P. Almazno–abrazivnaya obrabotka / A.P. Gavrish, N.N. Khasan // *Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: mezhd. nauch.–tekhn. sb.*– Kharkov: KHGPU, 1988. – Vyp. 52. – S. 43–46.
7. Yevseyev D.G. Fizicheskiye osnovy protsessa shlifovaniya / D.G. Yevseyev, A.N. Salnikov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1978. – 124 s.
8. Maslov Ye.N. Abrasivnaya obrabotka metallov / Ye.N. Maslov. – V kn.: *Razvitiye nauki o rezanii metallov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – S. 333– 378.
9. Dunin–Barkovskiy I.V. Izmereniye i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti / I.V. Dunin–Barkovskiy, A.N. Kartashova. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 232 s.
10. Kuznetsov YU.N. Teoriya tekhnicheskikh sistem: uchebnik / YU.N. Kuznetsov, YU.K. Novoselov, I.V. Lutsiv. – Sevastopol: SevNTU, 2010. – 252 s.
11. Novikov F.V. Usloviya formirovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno–abrazivnoy obrabotke / F.V. Novikov, V.P. Tkachenko // *Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: mezhd. nauch.–tekhn. sb.* – Kharkov: KHGPU, 2001.– Vyp. 60. – S. 171–176.
12. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya/ S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA–M, 2018. – 154 s.
13. Sergey Bratan, Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // Sergey Bratan, Ekaterina Vladetskaya, AleksanderKharchenko / *MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)*.

Kharchenko Alexander Olegovich

«Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., professor of the department «Technology of mechanical engineering»
299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
Ph: 54–05–57
E–mail: khao@list.ru

Bratan Sergey Mikhaylovich

«Sevastopol State University», Sevastopol
Doctor of Engineering, professor, head of the department «Technology of mechanical engineering»
299053, Sevastopol,
Universitetskaya St., 33
Ph: 54–05–57
E–mail: serg.bratan@gmail.com

Vladetskaya Ekaterina Aleksandrovna

«SevastopolStateUniversity», Sevastopol
Ph.D., assistant professor of the department «Technology of mechanical engineering»
299053, Sevastopol,
Universitetskaya St., 33
Ph: 54–05–57
E–mail:vladetska@rambler.ru

Vladetsky Dmitriy Olegovich

Sevastopol branch of «AUMSU», Sevastopol
Ph.D., assistant professor
299009, Sevastopol, Geroev Sevastopolya St., 11, build. 8/22
Ph: 54–05–57
E–mail:vladetski@gmail.com

Т.Л. ЧЕМАКИНА

СИСТЕМА ПОДОГРЕВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА НАЛИВНЫХ СУДАХ

Аннотация. В данной статье анализируются различные системы и устройства для подогрева груза в танках нефтеналивных судов, их преимущества и недостатки. Представлена методика расчета системы подогрева груза.

Ключевые слова: трубчатая система подогрева, греющая среда, потребный поток теплоты.

Введение

Транспортировка нефти и нефтепродуктов осуществляется железнодорожным, водным, автомобильным транспортом и по трубопроводам. На долю водного транспорта приходится около 13 % от общего объема перевозок нефтегрузов. К преимуществам морского транспорта относятся низкая себестоимость перевозки нефти за счет использования судов большой грузоподъемности на дальние расстояния.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке месторождений на Крайнем севере, а именно в южном районе Карского и Баренцева морей[1]. Многие нефтепродукты, особенно темные сорта, отличаются большой вязкостью и высокой температурой застывания (некоторые + 40°C и выше). При понижении температуры некоторые из них застывают настолько, что перекачка их насосом становится затруднительной, а иногда даже невозможной. Для возможности их откачки танки нефтеналивных судов оборудуют специальной системой подогрева груза.

Анализ систем и устройств для подогрева груза в танках

В качестве греющей среды для подогрева груза в танках допускается применение пара, горячей воды и органических теплоносителей [2]. Основная часть системы – паровые змеевики, укладываемые по днищу танков на высоте 100–150 мм от обшивки. Перед каждым паровым змеевиком устанавливается невозвратно-запорный клапан, а перед запорной арматурой на выходе пробный кран для возможности проверки качества конденсата.

Система подогрева груза должна быть оборудована средствами регулирования температуры груза в танках. Должны обеспечиваться контроль температуры в танках, а также световая и звуковая сигнализация о превышении максимально допустимой температуры груза или падения скорости потока груза при прокачке через подогреватели. [2].

Для подвода к змеевикам пара и отвода от них конденсата по палубе танкера под переходным мостиком прокладывают две магистрали (рисунок 1)–паровую 2 и конденсатную 9. От обеих магистралей к каждой группе танков отходят отростки с клапанными коробками – распределительной 4 и сборной 6, к которым присоединяются змеевики обогрева 5. Входные и выходные отростки снабжены клапанами 3 и 8, которые позволяют отключать при необходимости данную секцию танков от системы.

Существуют различные системы и устройства для подогрева груза в танках:

- с чугунными ребристыми грелками, которые имеют хорошую устойчивость против коррозии, но значительно тяжелее стальных гладкотрубных змеевиков и разрушаются при ударах и имеют более сложную технологию производства;
- с вертикальными змеевиковыми грелками менее эффективны чем горизонтальные, для конвективного подогрева груза;
- с горячеструйным способом разогрева нефтепродуктов во внешнем подогревателе;

– с горизонтальными змеевиками, равномерно расположенных на высоте 0,1...0,15 м над днищем танкера из гладкотрубных толстостенных стальных бесшовных (срок службы 6 лет) или из более коррозионно-стойкой алюминиевой бронзы, латуни или алюминия.

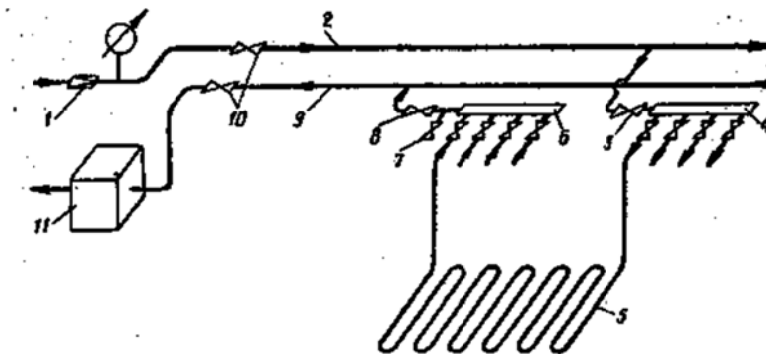


Рисунок 1 – Система подогрева груза:

1 – редукционный клапан; 2 – паровая магистраль; 3, 8, 10 – разобщительные клапаны; 4, 6 – клапанные коробки; 5 – змеевики обогрева; 7 – контрольный кран; 9 – магистраль отвода конденсата; 11 – контрольная цистерна

Наибольшее распространения получила змеевиковая трубчатая система подогрева с продольно или поперечно расположенными змеевиками (рисунок 2). Подогреватели подключаются параллельно, что дает возможность регулировать интенсивность подогрева по отдельным танкам. Конденсат отводится отдельно от каждого подогревателя через смотровые стекла в общий коллектор, откуда подается на общий смотровой бачок, расположенный у теплого ящика, отвод несконденсированного пара не допускается, поэтому на выходе из каждого подогревателя устанавливают конденсатоотводчики [3].

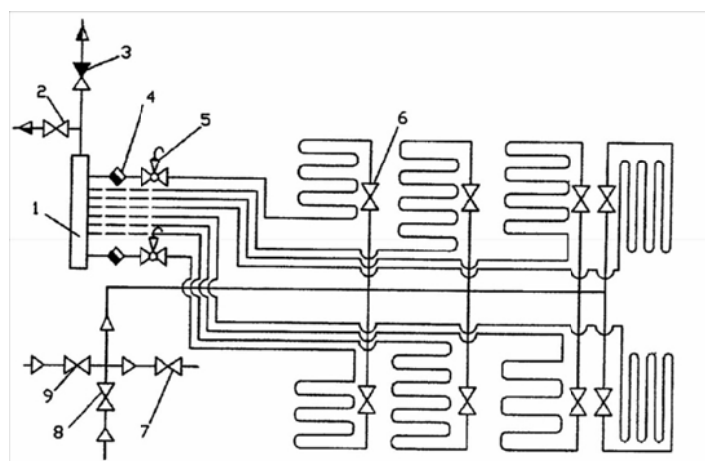


Рисунок 2– Принципиальная схема змеевиковой горизонтальной системы подогрева грузовых танков:

1 – коллектор конденсата; 2 – трубопровод к теплому ящику; 3 – клапан невозвратный (слив за борт); 4 – конденсатоотводчик; 5 – кран пробный тройниковый; 6 – клапан регулирующий; 7 – трубопровод на пропарку танков; 8 – трубопровод продувочного воздуха; 9 – паропровод от котла

Расчет системы подогрева груза

Подогрев во время выгрузки является необходимой и целесообразной с точки зрения экономики мерой. Температура нефтепродукта при выгрузке оказывает решающее влияние на режим работы насосных установок.

1. При равномерном подогреве всей массы груза среднеинтегральная температура ($^{\circ}\text{C}$) определяется по формуле[4]:

$$t_{ин} = \frac{\theta_2 \zeta_T \eta_T q_T + \sum k_i F_i (\theta_2 t_i + t_n)}{\sum k_i F_i (Q_1 + 1)} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{\sum k_i F_i}{c \rho Q_H} \quad (2)$$

Расход греющего пара D_n , кг/ч, определяется по эмпирической зависимости:

$$D_n = 200 + 0,36 G_T \quad (3)$$

где G_T – грузоподъемность танкера, т.

2. Длительность предварительного подогрева нефтепродукта $\tau_{n.n.}$ до температуры t_n [4]:

$$\tau_{n.n.} = \frac{cm_{гр.}}{3600 \sum k_i F_i} \ln \frac{\zeta_T \eta_T q_T - \sum k_i F_i (t_{n.n.} - t_i)}{\zeta_T \eta_T q_T - \sum k_i F_i (t_n - t_i)} \quad (4)$$

где $\zeta_T = 0,8$ – коэффициент, учитывающий расход энергии на собственные нужды;

η_T – КПД транспортировки теплоты, равный отношению количества теплоты, подведенной к нефтепродукту, к теплоте, израсходованной на эти цели:

$\eta_T = 0,75 \dots 0,82$ при паровом подогреве без возврата конденсата;

$\eta_T = 0,90 \dots 0,92$ – с возвратом конденсата;

$\eta_T = 0,95$ – для электроподогревателей.

q_T – мощность источника теплоты.

3. Площадь поверхности трубчатых подогревателей, m^2 .

$$F_n = (0,045 \div 0,08) * G_T \quad (5)$$

где G_T – грузоподъемность танкера, т.

Для подогрева нефтепродуктов в танках танкеров обычно применяют специальный паровой котел.

4. Потребный поток теплоты $Q_{пт}$ кВт, для подогрева высоковязких нефтепродуктов в танках определяется по выражению

$$Q_{пт} = Q_{гр} / \eta_T \quad (6)$$

где $Q_{гр}$ – поток теплоты при охлаждении нефтепродукта на судне во время рейса, кВт;

η_T – КПД транспортировки теплоты, равный отношению теплоты, подведенной к нефтепродукту, к теплоте, израсходованной на эти цели:

5. Поток теплоты $Q_{гр}$ определяется по формуле

$$Q_{гр.} = k_w F_w (t_H - t_w) + F_B (t_w - t_B) \quad (7)$$

где k_w, k_B – коэффициенты теплопередачи соответственно от нефтепродукта к воде и окружающему воздуху, кВт/($m^2 \cdot K$);

t_w, t_B – температуры окружающей среды (соответственно воды и воздуха), как и ранее, она принимается минимальной в условиях эксплуатации данного судна, $^{\circ}C$;

F_w, F_B – площади поверхностей охлаждения, граничащие соответственно с водой и воздухом, m^2 .

Рекомендуемые для расчета коэффициенты теплопередачи при охлаждении нефтепродукта в корпусе судна приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты k_w, k_B

Тип обшивки бортов и днища	k_w	k_B
	кВт/м ² К	кВт/м ² К
Одинарная	0,0062	0,0036
Двойная	0,0024	0,0035

6. площади поверхностей охлаждения в m^2 принимаются пропорционально грузоподъемности судна:

$$F_w = (0,30 \dots 0,35) G \quad (8)$$

$$F_B = (0,25 \dots 0,30) G, \quad (9)$$

где G – грузоподъемность танкера.

Заключение

Представленная методика может быть использована для определения необходимой температуры и времени подогрева груза, а также потребного потока теплоты при проведении разгрузочных работ на нефтетанкерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картамышева Н. С., Вахрушин И. А., Перевала М. Н., Трескова Ю. В. Проблемы добычи нефти и газа в условиях Крайнего Севера // Молодой ученый. — 2015. — №13. — С. 845–848.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VIII Системы и трубопроводы. Российский Морской Регистр Судоходства.—СП–б, 2018г. — 116 с.
3. Геец, В. М. Специальные системы наливных судов. Курс лекций учеб.пособие / В. М. Геец. — Владивосток: Мор.гос. ун–т, 2012. — 185 с.
4. Кутыркин В. А., Постников В. И. Специальные системы нефтеналивных судов (Справочник). — М.: Транспорт, 1983. — 192 с.

Чемакина Тамара Львовна

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Кандидат технических наук, доцент кафедры

«Кораблестроение и океанотехника»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +7(978)79–11–440

E–mail: chemakina1951@gmail.com

T.L. CHEMAKINA

HEATED OIL PRODUCTS FOR TANK VESSELS

Abstract. *This article examines the different systems and devices for heating of the cargo tanks of oil tankers, their advantages and disadvantages. the method of calculation of cargo heating system is presented.*

Keywords: *tubular heating system, heating medium, required heat flow.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kartamysheva NS, Vakhrushin IA, Perevala MN, Treskova Yu. V. Problems of oil and gas production in the Far North // Young Scientist. — 2015. — № 13. — P. 845–848.
2. Russian Maritime Register Of Shipping.— SP–b, 2018g. 116 p.
3. Geets, V. M. Special systems of loading vessels. A course of lectures textbook. the allowance / V. M. Geyets. — Vladivostok: More. state University, 2012. 185 p.
4. Kutyrkin V. A., Postnikov V. I. Special systems of oil–stormwater vessels (Reference book). — Moscow: Transport, 1983. — 192 p.

Chemakina Tamara Lvovna

Federal STATE Autonomous educational institution

«Sevastopol state University» Candidate of technical

Sciences, associate Professor «The naval architecture and marine engineering»

299053, the city of Sevastopol, st. University, 33

Tel. +7 (978) 79–11–440

E–mail: chemakina1951@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОТЯЖКИ ПОЛОСЫ БАБОЙ КОВОЧНОГО МОЛОТА С НАПОЛНИТЕЛЕМ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований процесса ударного деформирования при протяжке свинцовой полосы квадратного сечения на молоте, показывающие увеличение КПД удара и уменьшение количества ударов при использовании бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков.

Ключевые слова: протяжка, ударное деформирование, КПД удара, баба молота с наполнителем.

Введение

При ковке на молотах эффективность ударного деформирования при определяют коэффициентом полезного действия (КПД) удара, который равен отношению работы пластической деформации заготовки к энергии падающих частей молота. При этом основным недостаткомковки на молотах является низкий КПД удара вследствие кратковременности ударного деформирования заготовки, а также потерь энергии на упругую деформацию поковки и деталей молота, трение и смещение центра взаимодействующих масс, что снижает КПД всего молота и повышает расход энергии [1].

Основное формоизменение заготовки при ковке происходит за счет операции осадки и протяжки. Проведенные ранее экспериментально–теоретические исследования процесса ударного деформирования при осадке цилиндрических заготовок бабой молота с наполнителем в виде стальных шариков позволили установить, что применение бабы молота с наполнителем приводит к увеличению продолжительности удара (до 3 раз), увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (до 1,2 раза), снижению силы деформирования (до 1,3 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (до 1,12 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой [2, 3].

При протяжке происходит удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рисунок 1).

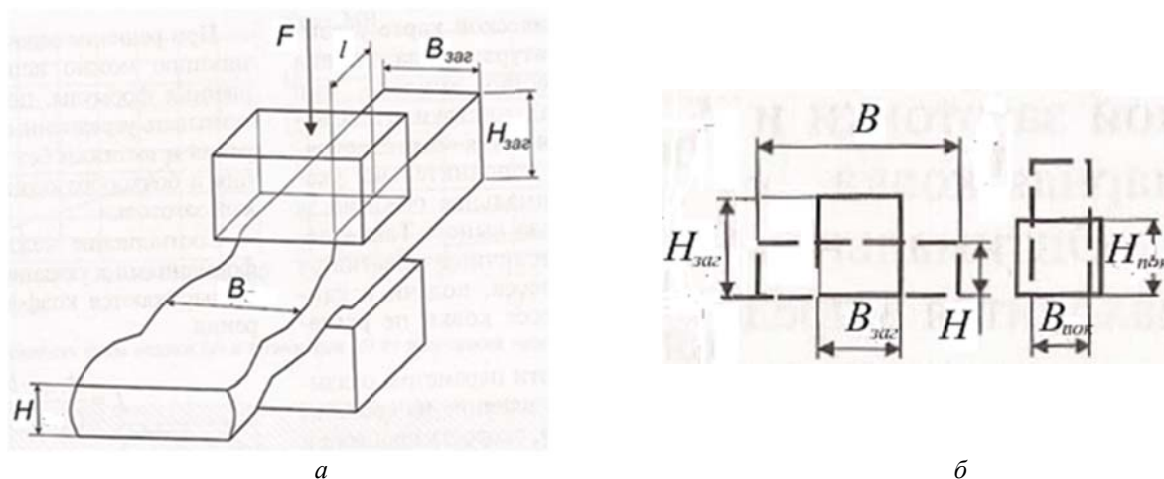


Рисунок 1 – Схема процесса протяжки (а); размеры исходной заготовки и поковки (б):

$H_{заг}$ и $B_{заг}$ – высота и ширина заготовки; $H_{пок}$ и $B_{пок}$ – высота и ширина поковки;
 H и B – размеры промежуточной пластины; L – подача

Процесс протяжки характеризуют [1]:

– величиной степени деформации $\mathcal{E}$ за один проход, определяемой по формуле;

$$\mathcal{E} = \frac{H_{заг} - H_{пок}}{H_{заг}} = \frac{\Delta H}{H_{заг}}, \quad (1)$$

Степень деформации за проход не должна превышать 0,5 во избежание зажимов;

– коэффициентом уширения

$$f = \frac{(B_{пок} - B_{заг}) \cdot H_{пок}}{(H_{заг} - H_{пок}) \cdot B_{заг}} \quad (2)$$

– величиной уковки, равной отношению площадей поперечного сечения

$$Y = \frac{F_{заг}}{F_{пок}} = \frac{H_{заг} \cdot B_{заг}}{H_{пок} \cdot B_{пок}} \quad \text{или} \quad Y = \frac{1}{1 - \varepsilon(1 - f)} \quad (3)$$

– величиной относительной подачи

$$\lambda = \frac{l}{H} \quad (4)$$

где H – размер сечения в направлении приложения силы, $0,5 < \lambda < 1$.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для исследования особенностей формоизменения заготовки при протяжке на молоте свинцовой заготовки (сечение 20,5 x 20,5 мм, длина 140 мм) для получения поковки сечением 15 x 15 мм была проведена серия экспериментов с использованием вертикального копра. Для деформирования заготовок на копке использовали стандартную бабу, а также бабу молота с наполнителем в виде стальных шариков из стали ШХ15 диаметром 12мм (рисунок 2).

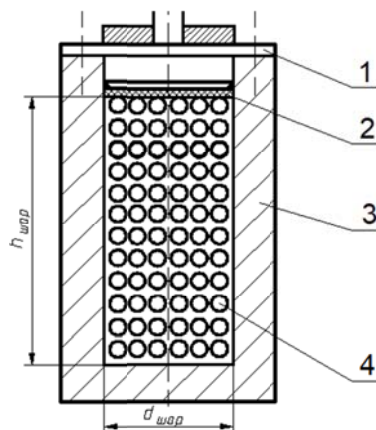


Рисунок 2 – Баба молота (копра) с наполнителем:
1 – крышка; 2 – упругая прокладка; 3 – корпус; 4 – наполнитель

Для обеспечения возможности сравнения результатов экспериментов по осадке со стандартной бабой и бабой с наполнителем их массы принимали одинаковыми и равными 22,4 кг. Для этого масса корпуса бабы с наполнителем составляла 14,49 кг, масса засыпаемых внутрь шариков составила 4,76 кг (величина отношения массы шариков к общей массе бабы 0,21), масса крышки – 3,15 кг.

Высота сбрасывания бабы молота (копра) составила 1,15 кг, что соответствовало теоретической энергии удара 329,3 Дж.

Протяжку заготовки стандартной бабой молота проводили по схеме квадрат – прямоугольная пластина – квадрат (рисунок 1,б). При этом по известным соотношениям, приведенным в работе [1] определяли:

– суммарную уковку по формуле (3)

$$Y_* = \frac{20,5 \cdot 20,5}{15 \cdot 15} = 1,87,$$

при этом уковку за каждый проход принимали одинаковой

$$Y_{*1} = Y_{*2} = \sqrt{Y_*} = 1,37$$

– высоту H и ширину B прямоугольного сечения при коэффициенте перехода $\varphi=2$

$$H = \sqrt{\frac{F_{n-2}}{\varphi \sqrt{y}}} = 12,38 \text{ мм}$$

$$B = \sqrt{\frac{F_{n-2} \cdot \varphi}{\sqrt{y}}} = 24,76 \text{ мм}$$

– степень деформации по высоте для первого прохода

$$\varepsilon_1 = \frac{H_{\text{заг}} - H}{H_{\text{заг}}} = 0,4$$

– относительную подачу

$$\psi_1 = 3 \left(\frac{\varphi - 1}{\varepsilon_1} - 2\varphi + \varepsilon_1 * \varphi + 0,965 \right) = 0,97$$

Для первого прохода величина шага подачи:

$$C_1 = \psi_1 * B_{\text{заг}} \approx 20 \text{ мм},$$

Соответственно, количество ударов на первом проходе было равным 7.

На втором этапе протяжки после кантовки исходные размеры прямоугольной пластины и окончательной заготовки квадратного сечения известны и расчет ψ_2 производили по формуле:

$$\psi_2 = 7.15 \left(\frac{\varphi - 1}{\varepsilon_2} - 2\varphi + \varepsilon_2 * \varphi + 0.82 \right) = 1.21$$

Для второго прохода величина шага подачи равна:

$$C_2 = \psi_2 * h_{\text{пр}} = 29.68 = 30 \text{ мм}$$

где $h_{\text{пр}} = B$.

При этом количество ударов на втором проходе составило 6.

На рисунке 3 представлены фотографии исходной заготовки сечением 20,5 x 20,5 мм и полученная поковка сечением 15 x 15 мм.



Рисунок 3 – Исходная заготовки сечением 20,5x20,5 мм (а) и полученная поковка сечением 15x15 мм (б)



а



б

Рисунок 4 – Поковки сечением 15x15 мм, полученных протяжкой с использованием стандартной бабой молота (а) и бабой молота с наполнителем (б)

При протяжке заготовки бабой молота с наполнителем было установлено, что степень деформации заготовки по высоте увеличилась по сравнению с использованием стандартной бабы молота и составила 0,5. Это соответствует полученным ранее данным по осадке цилиндрических заготовок, при которой имело место увеличение степени деформации заготовок до 1,2 раза при использовании бабы с наполнителем по сравнению со стандартной бабой [2].

Вследствие этого величина относительной подачи ψ_1 на первом проходе протяжки составила $\psi_1 = 1,13$ и, соответственно, величина шага подачи $C_1 = 23$ мм. Таким образом, количество ударов для протяжки заготовки длиной 140 мм на первом проходе составило 6.

После кантовки заготовки на втором проходе величина шага подачи составила $C_2 = 37$ мм, а количество ударов – 5.

На рисунке 4 показаны фотографии поковок сечением 15x15 мм, полученных протяжкой с использованием стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем.

Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных исследований процесса ударного деформирования при протяжке свинцовой полосы квадратного сечения на молоте (копре) было установлено увеличение степени деформации по высоте заготовки до 1,25 раза и уменьшение количества ударов при протяжки в 1,2 раза при использовании бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков по сравнению со стандартной бабой молота.

2. Для разработки рекомендаций по проведению протяжки на ковочных молотах при использовании бабы молота с наполнителем необходимы дальнейшие экспериментальные исследования особенностей деформирования заготовок из различных материалов при ковочных температурах.

3. Использование бабы молота с наполнителем при протяжке заготовок различного поперечного сечения позволит увеличить КПД удара и КПД работы молота, увеличить производительность работы оборудования, а также обеспечить существенную экономию энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и объемная штамповка: Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 1972. 352 с.
2. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 12–15.
3. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Построение математической модели процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №11. С.16–18.
4. Лавриненко В.Ю. Расчет технологических процессов осадки и протяжки бабой молота с наполнителем / Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 35–42.
5. Патент на изобретение РФ № 2438825. Баба молота / Лавриненко В.Ю. и др. опубл.10.01.2012. Бюл. № 1.

Лавриненко Владислав Юрьевич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-02-36
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

Гаврилов Никита Юрьевич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
магистрант 1-го курса, кафедра «Технология обработки материалов»
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1
Тел.: +7 (499) 267-02-36
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

V.Yu. LAVRINENKO, N. Yu. GAVRILOV

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BAR DRAWING BY HAMMER RAM WITH FILLETS

Abstract. Results of experimental research of drawing of lead bar blanks on hammer with standard ram and ram with fillets are presented. The increasing of deformation of blanks and decreasing of number of impacts by using of ram with fillets is obtained.

Keywords: drawing, impact deformation, impact efficiency, ram of hammer with fillets.

BIBLIOGRAPHY

1. Kovka i obemnaya shtampovka: Uchebnik dlya VUZov. M.: Vysshaya shkola, 1972. 352 s.
2. Feofanova A.E., Lavrinenko V.YU. Eksperimentalnye issledovaniya processa udara pri osadke cilindricheskikh zagotovok // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2012. № 2. S. 12–15.
3. Feofanova A.E., Lavrinenko V.YU. Postroenie matematicheskoy modeli processa udara pri osadke cilindricheskikh zagotovok // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2012. №11. S.16–18.
4. Lavrinenko V.YU. Raschet tekhnologicheskikh processov osadki i protyazhki baboj molota s napolnitelem / Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp.4. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. S. 35–42.
5. Patent na izobretenie RF № 2438825. Baba molota / Lavrinenko V.YU. i dr. opubl.10.01.2012. Byul. № 1.

Lavrinenko Vladislav Yurievich

Bauman Moscow State Technical University
Doctor of Tech. Science, Chief of Department
«Technology of material working»
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267-02-36
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

Gavrilov Nikita Yurievich

Bauman Moscow State Technical University
Student of Department «Technology of material working»
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5
Tel.: +7 (499) 267-02-36
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

В.И. ГОЛОВИН

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Цифровое производство диктует новые подходы к организации технологических процессов, в том числе развития киберфизических системы в рамках концепции Индустрия 4.0. Развитие этих систем предполагает использование не только классических методов, но и внедрение аддитивных технологий в производство. В статье рассмотрена концепция умной производственной системы для поиска оптимального технологического процесса, который базируется на ограничениях пользователя системы и экспертных данных облачной киберфизической системы.

Ключевые слова: киберфизические системы, умное производство, искусственный интеллект, задача удовлетворения ограничений.

Введение.

Сегодня, объединив такие достижения в цифровых технологиях как беспроводные сети, облачные вычисления, большие данные и искусственный интеллект с одной стороны, и достижения в области «умных» материалов, нанотехнологий и 3D-печати с другой стороны, мы находимся на пороге Четвертой промышленной революции. Повсеместный доступ к глобальной сети и огромное количество пользовательских данных, открывают безграничные возможности, о которых люди не могли себе представить несколько лет назад [1]. Однако, исследователи в научных кругах и в промышленности признали, что наступление четвертой промышленной революции преобразит практически все аспекты нашей современной жизни: способы производства продукции, бизнес-модели, методы управления производством и т.д. Необходимы новые компетенции и переподготовка трудовых ресурсов, с перспективой увеличения доли автоматизации и пересмотром будущего рабочих профессий [2].

Увеличение вычислительных мощностей, дополненная реальность и системы виртуальной реальности будут иметь решающее значение во многих стратегиях реализации умных производств. Интеграция этих технологий в умные фабрики необходима для быстрой адаптации внедряемых технологических инноваций с целью производства высококачественных продуктов и сервисов.

Реализация концепции «Индустрия 4.0» предусматривает формирование киберфизических систем (Cyber-Physical Systems — CPS). Такие системы объединяют аппаратную часть, технологическое оборудование и логистические системы [3].

Неотъемлемой частью CPS для производства станет автоматическое распределение системных ресурсов на основе входной информации. Входные данные включают информацию о геометрии детали (геометрические элементы и размеры детали) и ограничения (качество, механические и экономические). До сих пор исследовательские усилия по определению такого распределяющего элемента системы были нацелены на основные области производства, т. е. на субтрактивные и аддитивные технологии. Для субтрактивного производства выбор процесса может быть осуществлен с помощью геометрического анализа элементов и последующего сопоставления этих элементов с соответствующими процессами обработки [4]. Для аддитивного производства выбор процесса может быть сделан на основе выбора материала, размера детали и качества построения [5]. Такое различие в критериях выбора технологических процессов затрудняет создание и интеграцию универсального логического распределителя в динамическую и автономную CPS.

Основная часть.

Целью данной статьи является описание алгоритма поиска оптимального производственного процесса, который базируется на задаче удовлетворения ограничений (УО). В частности, задача выбора производственного процесса в CPS сводится к нахождению последовательности технологических процессов, удовлетворяющих заданным ограничениям, которые описывают стоимость и качество изделия (задаются пользователем), а также

базируются на возможностях самой CPS [6]. В виду того что количество процессов и комбинаций процессов в CPS ограничено, программирование в ограничениях идеально подойдет для решения поставленной задачи.

Реализация подобного «умного» селектора технологических процессов (УСТП) будет основана на тесном взаимодействии между пользователем и CPS. Предлагается следующий алгоритм: преобразование первичной информации (геометрия детали) в пространство решений возможных комбинаций производственных процессов; применение ограничений, определенных пользователем, для уменьшения созданного пространства решений на основе локальных вычетов.

Итак, пользователь определяет первичную информацию об изделии в виде его 3D-модели, а также допустимых диапазонов по качеству, механическим свойствам и стоимости. Затем эта информация передается в CPS, которая распознает элементы геометрии и создает список возможных вариантов технологических процессов, необходимых для производства детали. Наконец, для уменьшения числа вариантов в списке применяются экспертные знания оптимальных технологических процессов и предопределенные диапазоны ограничений с целью формирования финального списка, удовлетворяющего требованиям одновременно и пользователя, и CPS.

Задача УО состоит из множества переменных $V = \{x_1, \dots, x_n\}$, множества доменов значений D_i для каждой переменной x_i , и множества ограничений и отношений. Каждый домен значений является конечным множеством значений, которые может принимать соответствующая переменная. Состояние задачи определяется путем присваивания значений некоторым или всем этим переменным $\{X_i = V_i, X_j = V_j, \dots\}$. Присваивание, которое не нарушает никаких ограничений, является допустимым. Полным называется такое присваивание, в котором участвует каждая переменная, а решением задачи УО является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям.

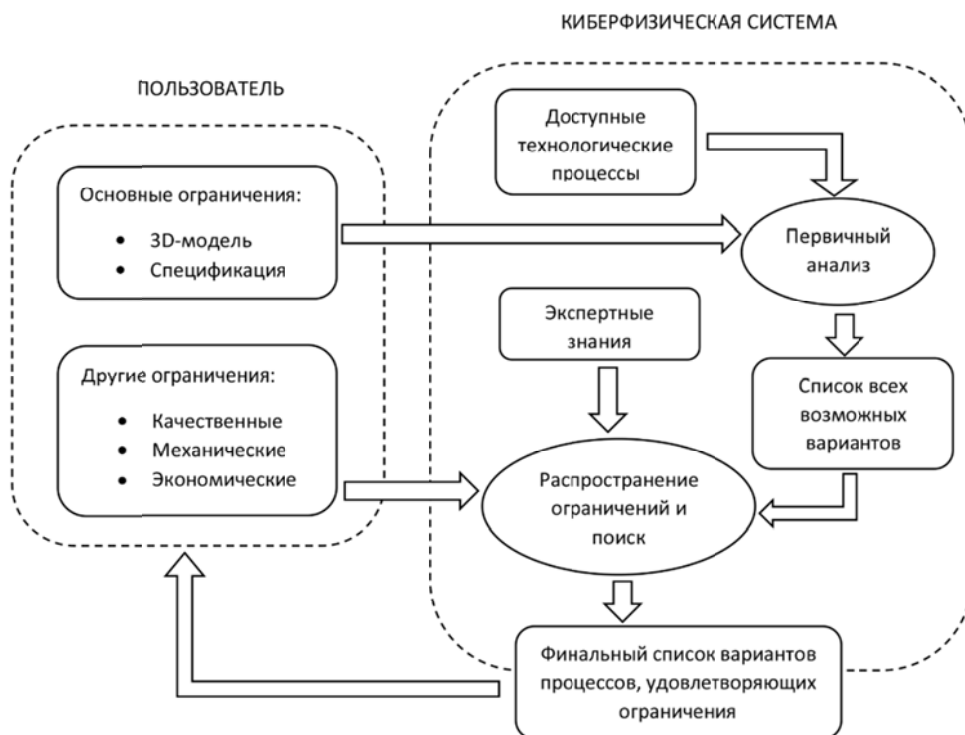


Рисунок 1 – Задача удовлетворения ограничений для производства

Применение задачи УО для реализации УСТП показано на рисунке 1. Сперва генерируется частичная информация в виде пространства возможных решений вариантов последовательностей технологических процессов, основываясь на входной геометрической информации. Затем, на это пространство решений накладываются пользовательские ограничения (материал, качество построения, стоимость и т.д.). И, в заключении,

производится поиск списка вариантов технологического процесса с использованием экспертных знаний о возможностях системы.

Перед тем как найти решения, удовлетворяющие ограничения необходимо определить исходную задачу и пространство поиска. Исходная задача определяется заданной пользователем геометрической информацией, в виде 3D модели, и полным списком всех производственных процессов, доступных в CPS, сгруппированных по классам (аддитивные, субтрактивные, деформационные и др.).

Уже существуют очень сложные методы анализа геометрии для выбора субтрактивных производственных процессов, и эти методы способны выполнять распознавание признаков, генерацию траектории перемещения инструмента на основе распознанных признаков [6], анализ размеров, анализ допусков и т.д. [4]. Аналогичные методы анализа существуют и для выбора аддитивных [5] и деформационных процессов. Список возможных последовательностей классов производственного процесса может быть сформирован на основе доступного оборудования в CPS.

В примере, показанном на рисунке 2, начальный анализ геометрии показывает наличие комбинации технологий выдавливания и механического снятия материала. Пространство поиска последовательности процессов генерируется путем выбора сырья (порошок, заготовка или листовый материал), а затем определения физических процессов, необходимых для производства геометрии с использованием выбранного сырья. После того, как эта последовательность процессов высокого уровня была определена, технологические процессы в рамках определенных категорий, выбираются из доступных в CPS.

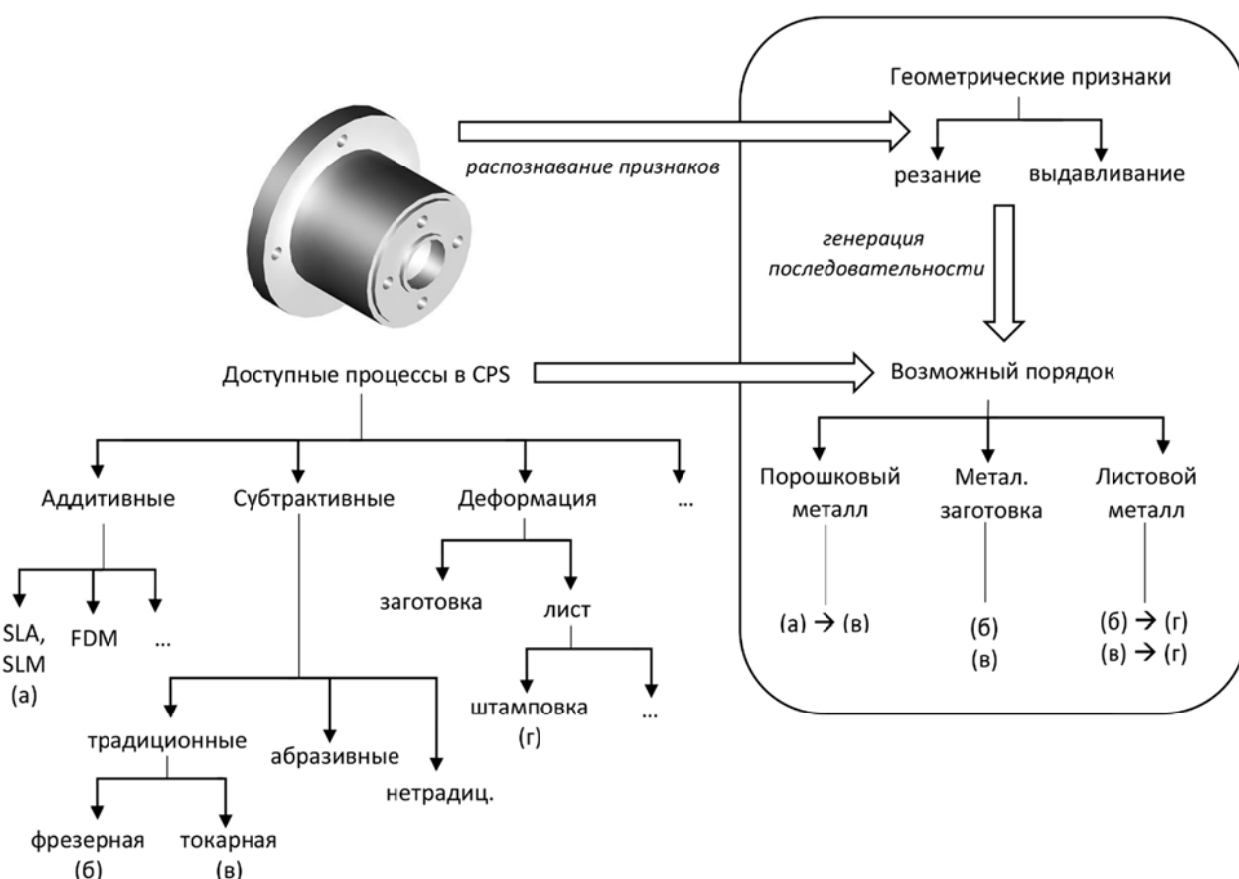


Рисунок 2 – Поиск пространства решений последовательности процессов в УСТП

Учитывая пространство поиска всех отдельных последовательностей процессов, которые попадают в каждую из вышеупомянутых групп процессов, пользовательские спецификации (качественные, механические или экономические) в дальнейшем могут использоваться в качестве распространителей для ограничения пространства поиска с помощью локальных вычетов. Для этого необходимо провести количественную оценку

каждого варианта, используя критерии указанные в таблице 1. После количественной оценки всех процессов, пользователь может указать диапазон с максимальным и минимальным значением для каждого из критериев.

Таблица 1 – Критерии оценки вариантов технологического процесса

Качественные	Шероховатость, допуски и т.д.
Механические	Прочность материала, остаточные напряжения и т.д.
Экономические	Производительность, процент использования материала, стоимость инструмента и т. д.

Таким образом, пространства поиска возможных процессов могут быть сужены путем устранения процессов, которые находятся вне предопределенного пользователем диапазона. В данном случае, пользовательские спецификации выступают в роли распространителей, которые ограничивают диапазон в пространстве решений локальными вычислениями, что является классической задачей логического программирования ограничений. Такая система распространения ограничений может быть реализована для производственных процессов путем использования аналогичных методов, основанных на искусственном интеллекте, которые уже существуют для параметрических фреймворков в CAD системах.

Завершающим этапом выбора технологического процесса является поиск пространства всех процессов, которые входят в преопределенные пользователем диапазоны критериев производительности для определения оптимального решения для CPS (рис. 3). На этом этапе экспертные знания о CPS, т. е. системная специфическая информация, полученная из анализа больших данных, анализа затрат и системных ограничений, которые находятся в облаке [7], могут быть использованы для составления окончательного списка последовательностей процессов. В CPS данные для аналитики могут быть получены с помощью инструментов сбора данных в производственных процессах или непосредственно из других систем CPS [3]. Данные о свойствах материала, таких как пористость, скорость охлаждения, остаточные напряжения и т. д., которые трудно непосредственно измерить, можно получить с помощью методов численного моделирования [6]. Используя эти данные, можно определить модели, способные обнаруживать закономерности в выборе процесса для аналогичных геометрий, которые необходимы для окончательного поиска оптимальной последовательности процесса. Экономическая информация о CPS (затраты на эксплуатацию, амортизацию, время технологического процесса и т.д.), также может быть использована для выбора оптимальной последовательности процессов. Детальное исследование повышения скорости изготовления для группы аддитивных, субтрактивных и деформационных процессов показало, что необходимо учитывать такие ограничения, как жесткость машины, ускорение привода, теплопередача и подача жидкостей [3]. Наконец, ограничения на сам CPS, такие как физическое расположение машин, ограничение веса и размера для каждого производственного процесса, возможности машины и т. д., должны также быть учтены при поиске оптимального технологического процесса.

В процессе развития киберфизических систем, в частности Индустрии 4.0, возникла растущая потребность в определении методологии для интеллектуального выбора технологического процесса для производственных систем. В этой статье представлена концепция реализации умного селектора технологических процессов, основанная на удовлетворении ограничений, заложенными на уровне пользователя и знаниях о самой системе. В дальнейшем, эта концепция поможет создать облачные интеллектуальные производственные системы с высокой добавленной стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwab K. The fourth industrial revolution: crown. Business 2017.
2. Добрынин А.П., Черных К.Ю., Куприяновский В.П., Куприяновский П.В., Синягов С.А. Цифровая экономика – различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т.4, №1. С.4–11.
3. Ингеманссон А.Р. Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0» в современное машиностроительное производство // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. Т. 1, №. 7. С. 45—48.

4. Han JH, Pratt M, Regli WC. Manufacturing feature recognition from solid models: A status report. IEEE Trans Robot Autom 2000;16:782–96. <https://doi.org/10.1109/70.897789>.
5. Mançanares CG, Zancul E de S, da Silva Cavalcante J, Cauchick Miguel PA. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. IntJ Adv Manuf Technol 015;80:1007–14. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7092-4>.
6. Левенцов В.А., А.Е. Радаев, Н.Н. Николаевский. Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов [Электронный ресурс] // Научнотехнические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер.: Экономические науки. 2017. Т. 10. № 1. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/j17-243.pdf> (дата обращения: 22.07.2018).
7. Colombo A., Bangemann Th., Karnouskos S., и др. Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. The IMC-AESOP Approach // Springer Science & Business Media, 2014

Головин Василий Игоревич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов»

299000, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. 55–00–77

E-mail: golovin@sevsu.ru

V.I. GOLOVIN

SMART SEARCH FOR OPTIMAL TECHNOLOGICAL PROCESS IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Abstract. *Digital production dictates new approaches to the organization of technological processes, including the development of cyberphysical systems within the framework of Industry 4.0. The development of these systems involves the use of not only classical methods, but also additive technologies in production. The article deals with the concept of a smart production system to find the optimal technological process, which is based on the user defined constraints and expert data of the cloud cyberphysical system.*

Keywords: *cyber-physical systems, smart production, artificial intelligence, constraints satisfaction problem.*

BIBLIOGRAPHY

1. Schwab K. The fourth industrial revolution: crown. Business 2017.
2. Dobrynin A.P., Chernyh K.YU., Kupriyanovskij V.P., Kupriyanovskij P.V., Sinyagov S.A. Cifrovaya ekonomika – razlichnye puti k ehffektivnomu primeneniyu tekhnologij (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA i drugie) // International Journal of Open Information Technologies. 2016. T.4, №1. S.4–11.
3. Ingemansson A.R. Aktual'nost' vnedreniya koncepcii «Industriya 4.0» v sovremennoe mashinostroitel'noe proizvodstvo // Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii. 2016. T. 1, №. 7. C. 45—48.
4. Han JH, Pratt M, Regli WC. Manufacturing feature recognition from solid models: A status report. IEEE Trans Robot Autom 2000;16:782–96. <https://doi.org/10.1109/70.897789>.
5. Mançanares CG, Zancul E de S, da Silva Cavalcante J, Cauchick Miguel PA. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. IntJ Adv Manuf Technol 015;80:1007–14. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7092-4>.
6. Levencov V.A., A.E. Radaev, N.N. Nikolaevskij. Aspekty koncepcii «Industriya 4.0» v chasti proektirovaniya proizvodstvennyh processov [EHlektronnyj resurs] // Nauchnotekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: EHkonomicheskie nauki. 2017. T. 10. № 1. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/j17-243.pdf> (access date: 22.07.2018).
7. A. Colombo, Bangemann-Go., Karnouskos S., etc. Industrial Cloud-based cyber-physical Systems. Approach IMC-AESOP // Springer Science & Business Media, 2014

Golovin Vasily Igorevich

FGAOU VO «Sevastopol State University», Sevastopol

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Instrument Systems and Automation of Technological Processes»

299000, Sevastopol, Universitetskaya str., 33

Tel. 55-00-77

E-mail: golovin@sevsu.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.9

Н.И. ПОМЯТИХИН, Т.Н. ШАБЛИНСКАЯ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВПАДИНЫ КРУГОВОГО ЗУБА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОЛЕСА

Аннотация. В статье приводится анализ предварительного формообразования впадины кругового зуба цилиндрического колеса. Предложена зависимость, позволяющая создать базовую основу оптимизации припуска на чистовую и черновую обработку, прогнозирование значения сил резания для любых начальных параметров. Установлено, что нарезание выпуклой и вогнутой стороны впадины необходимо осуществлять разными головками, а черновую обработку зуборезной головкой трапециевидальным профилем.

Ключевые слова: цилиндрические колеса с круговыми зубьями, формообразование, предварительная обработка, эвольвента, резцовая головка.

Введение

Эвольвентные колеса за период почти двухвековой эксплуатации доказали свое преимущество перед другими видами зубчатых зацеплений. Они технологичны, так как получить эвольвентный профиль можно движением обката, как инструментальной рейки, так и другого зубчатого колеса [1]. Эвольвентные зубчатые передачи терпимы к колебаниям межосевых расстояний, перекосам осей. Существенным недостатком, ограничивающим их несущую способность, является малая площадь контакта между зубьями, что побуждает к поиску путей решения этой проблемы.

Несмотря на выявленные преимущества и многочисленные исследования, цилиндрические колеса с круговым зубом до последнего времени в реальных конструкциях машин использовались ограничено. Это можно объяснить как ошибочностью некоторых подходов в создании конструкции колес с круговым зубом, так и отсутствием технологии, обеспечивающей высокую производительность изготовления и точность.

Анализ

Явно ошибочным является нарезание выпуклых и вогнутых сторон зуба одной инструментальной головкой. Выпуклые и вогнутые стороны зубьев приобретут разные радиусы, и попытка сопрягать в передаче такие колеса обречена на неудачу.

Большинство исследователей предлагают нарезать круговые зубья цилиндрических колес инструментами, имеющими в качестве исходного контура трапециевидальный профиль с углом, равным углу зацепления колеса [2, 3]. В этом случае эвольвента с заданным углом исходного контура образуется только в среднем сечении венца. Во всех прочих сечениях профиль будет отличаться от заданного в сторону уменьшения угла зацепления. Такая передача приобретает дополнительный недостаток: при осевом смещении одного колеса относительно другого не только уменьшается ее несущая способность, но и плавность работы, так как у колес начинают сопрягаться участки профилей с разными углами зацепления.

В работах [4, 5, 7] предложено нарезать рабочие поверхности зубьев и участки впадины между зубьями цилиндрической пальцевой фрезой малого диаметра на многокоординатных станках с ЧПУ. С использованием программного комплекса T-Flex созданы параметрические трехмерные модели расчета траектории движения центра сферического концевой участка фрезы. Были подготовлены управляющие программы для пятикоординатного станка с ЧПУ.

Основные недостатки использованной технологии – чрезвычайно низкая производительность, так как формирование впадины между зубьями производится движением подачи режущего инструмента, а не главным движением резания. Способ зубонарезания колес пальцевой фрезой небольшого диаметра в силу своей малой производительности не имеет перспектив для промышленного изготовления зубчатых колес с круговым зубом.

В работе [7] предложено использовать многорезцовый обкатный инструмент с нулевым углом профиля, в котором в качестве зубьев применяются прорезные резцы фирмы

Sandvik Coromant [8]. Инструмент позволяет нарезать круговые зубья цилиндрических колес с высокой производительностью, соизмеримой с традиционным зубонарезанием быстрорежущей червячной фрезой цилиндрических колес с прямолинейными зубьями.

Перспективным направлением повышения производительности обработки круговых зубьев цилиндрических колес является комбинирование способов чистовой и черновой обработки с различными схемами резания [9, 10]. Так для черновой обработки целесообразно применять зуборезные резцовые головки для конических передач с трапецеидальными зубьями с радиальной подачей, обкатыванием или комбинированной подачей, что позволит снизить себестоимость обрабатываемого изделия за счет высокой производительности, низкой стоимости инструмента и оборудования (рисунок 1).

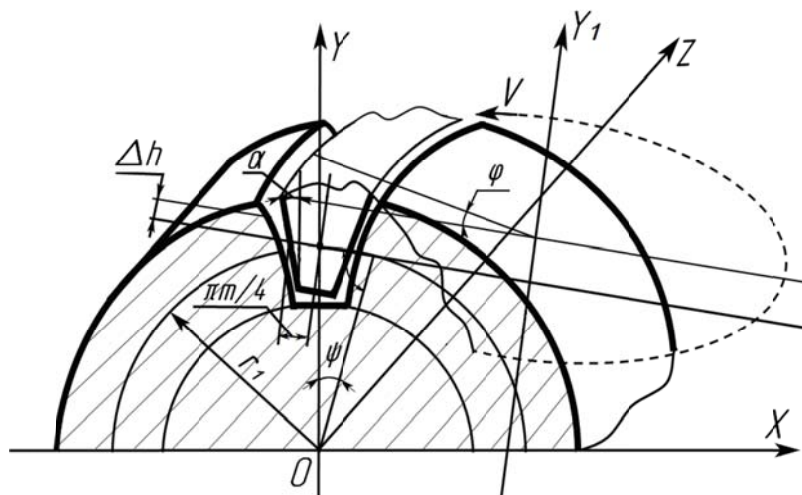


Рисунок 1 – Разработка математического отображения чернового нарезания цилиндрических арочных зубчатых колес резцовыми головками

При проектировании автоматического процесса расчета цилиндрического зубчатого колеса в компьютерной программе Excel можно точно следить за процессом черновой обработки, а именно за движением резцовой головки и изменением профиля обрабатываемого зуба.

Первоначально было построено нулевое положение резца во впадине зуба по точкам, которые соответствовали заданным данным. График отражает в себе расположение резца в точке отсчета (нулевой) с углом $\psi=0$.

При дальнейшем изменении угла ψ , было рассчитано положение профиля резца в разных стадиях обработки и построена схема его движение относительно впадины зуба ($m=5\text{ мм}$, $z=40\text{ мм}$, $r_1=100\text{ мм}$) (рисунок 2).

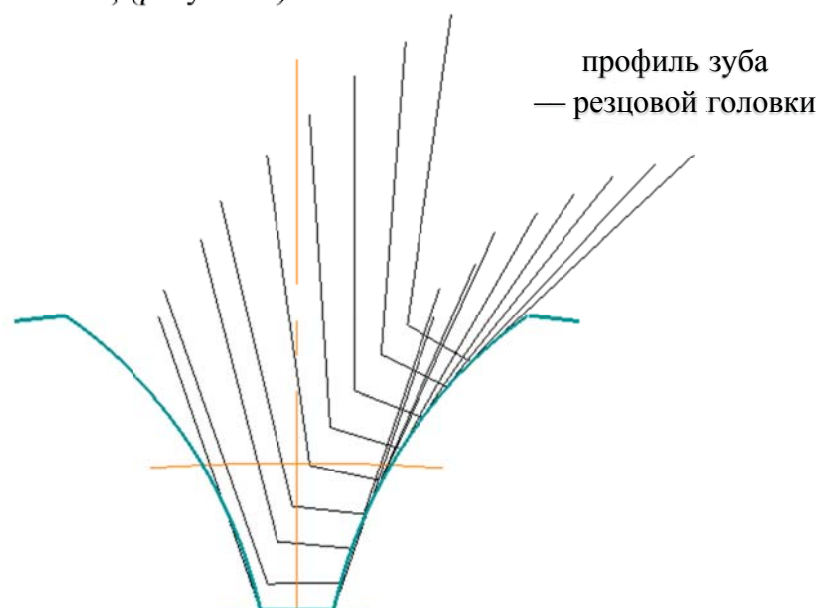


Рисунок 2 – Схема движения зуба резцовой головки

Была смоделирована графическая визуализация, показывающая, как обрабатывается впадина кругового зуба. При этом можно было наблюдать как влиял на обработку угол ϕ и координата Z (рисунок 3). Появилась возможность отследить процесс черновой обработки всего колеса от начала и до её завершения, что наглядно отображает простоту получения цилиндрических колес с круговым зубом с полной черновой и чистовой обработкой.

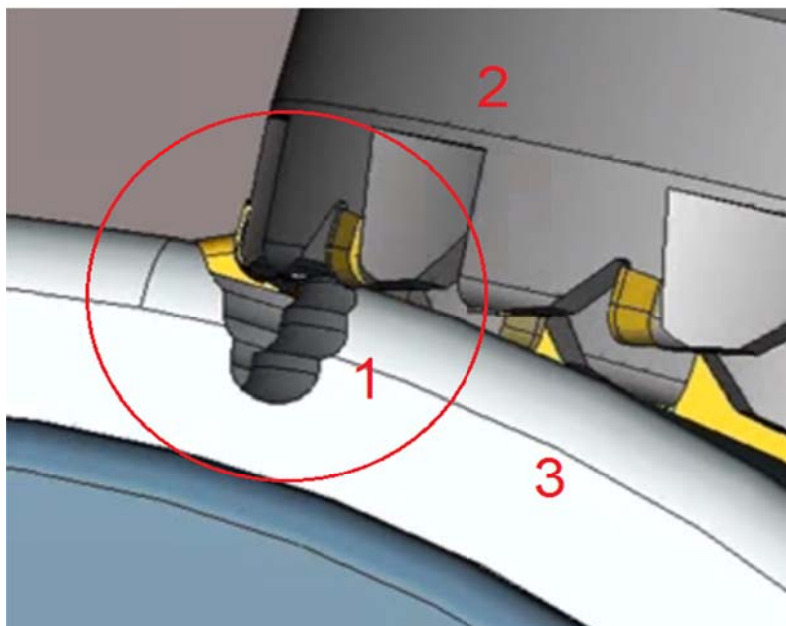


Рисунок 3 – Смоделированный процесс обработки:

1– зона обработки; 2– обрабатывающая головка; 3– заготовка зубчатого колеса

Моделирование процесса обработки помогает понять вид конечного продукта и как следствие представить вид специального станка для обработки цилиндрических колес с круговым зубом (рисунок 4).

В дальнейшем при его разработке и введении в эксплуатацию позволит существенно снизить расходы на изготовления цилиндрических колес с круговыми зубьями.

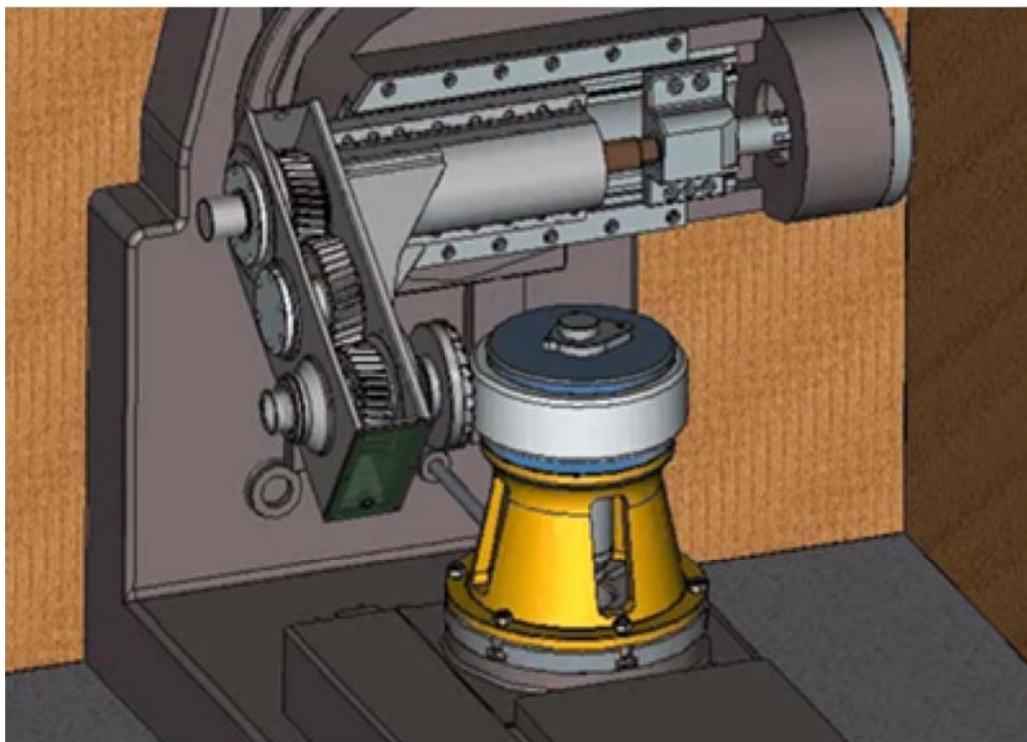


Рисунок 4 – Станок специальный для черновой обработки цилиндрических колес с круговым зубом

Расчет

Пространство черновой обработки резцовыми головками с трапецеидальными зубьями, в общем, может быть представлено выражением (1) позволяющим контролировать его любую точку. Причем для правого и левого режущего лезвия выражения отличаются (2), (3).

$$\begin{aligned}x &= [\pm 0,25\pi m \pm (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - (r_1 \cdot \psi) - r_{0i}(1 - \cos \varphi)] \cdot \cos \psi + (\Delta h \pm r_1) \cdot \sin \psi ; \\y &= [\pm 0,25\pi m \pm (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - (r_1 \cdot \psi) - r_{0i}(1 - \cos \varphi)] \cdot \sin \psi + (\Delta h \pm r_1) \cdot \cos \psi ; \\z &= r_{0i} \cdot \sin \psi .\end{aligned}\quad (1)$$

Правая кромка при $\varphi=0$:

$$\begin{aligned}x &= [0,25\pi m + (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - r_1 \cdot \psi] \cdot \cos \psi + (\Delta h + r_1) \cdot \sin \psi ; \\y &= [0,25\pi m + (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - r_1 \cdot \psi] \cdot \sin \psi + (\Delta h + r_1) \cdot \cos \psi ; \\z &= r_{0i} \cdot \sin \psi .\end{aligned}\quad (2)$$

Левая кромка при $\varphi=0$:

$$\begin{aligned}x &= [-0,25\pi m - (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - r_1 \cdot \psi] \cdot \cos \psi + (\Delta h - r_1) \cdot \sin \psi ; \\y &= [-0,25\pi m - (\Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha) - r_1 \cdot \psi] \cdot \sin \psi + (r_1 - \Delta h) \cdot \cos \psi ; \\z &= r_{0i} \cdot \sin \psi ,\end{aligned}\quad (3)$$

где x, y, z – координаты точки режущего лезвия инструмента в процессе резания;

Δh – параметр режущей кромки;

α – угол профиля;

ψ – текущий угол обката;

φ – угол поворота зуба резцовой головки;

r_1 – радиус делительной окружности;

r_{0i} – радиус начальной окружности;

m – модуль зацепления.

Заключение

При методе формообразования комплектом резцовых головок зубонарезание производится на 4-х координатных фрезерных станках с ЧПУ и токарно-обрабатывающих центрах. Таким образом, применение зависимостей (1), (2), (3) создает базовую основу для чистовой обработки, прогнозирования значения сил резания для любых начальных параметров, точность при известной жесткости технологической системы, а также шероховатость обрабатываемой поверхности. Каждая резцовая головка обрабатывает свою область впадины кругового зуба: черновое прорезание впадины, обработка вогнутой стороны зуба, обработка выпуклой стороны зуба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев А.А., Тарапанов А.С., Шаблинская Т.Н. «Выбор технологии формообразования цилиндрических пластмассовых колес с круговыми зубьями». Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 3. 2017 г
2. Паршин А.Н. Разработка методов анализа, синтеза зацепления и изготовления арочных цилиндрических зубчатых колес // Автореферат дис. канд. техн. наук – Москва, 2008. – 16 с.
3. Васин В.А., Бобков М.Н. Возможность создания единой обобщенной методики геометрического расчета цилиндрических передач с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Труды международной науч.-техн. конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.С. Петрухина. Вып. 2. – Инструментальные системы: прошлое, настоящее, будущее. Серия: Машиностроение. ТулГУ, 2003. С. 287 – 291.
4. Васин В.А., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Обработка арочных зубьев цилиндрических колес // СТИН. 2005. № 4. С. 26 – 29.
5. Давыдов А.П., Липатов С.И., Марголит Р.Б., Панков И.Г., Паршин А.Н. Арочная цилиндрическая зубчатая передача: пат. 2469230 Рос. Федерация; заявл. 19.05.2011; №, заявки 2011120157/11, опубли. 10.12.2012.
6. Виноградов А.Н., Липатов С.И., Марголит Р.Б. Точность нарезания колес с арочными зубьями // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 23 – 27.
7. Липатов С.И. Разработка многорезцового обкатного инструмента с нулевым углом профиля для высокопроизводительного зубонарезания арочных колес на станках с ЧПУ // Автореферат канд. техн. наук – Москва, 2013. – 16 с.
8. Sandvik Coromant: сайт. 2014. [Электронный ресурс] / Каталог – URL: <http://sandvik-coromant.ru> (дата обращения: 23.04.2015).
9. Тарапанов А.С., Харламов Г.А., Шоркин В.С. Математические основы виртуального представления и анализа процессов лезвийной обработки // Справочник. Инженерный журнал. 2003, № 2, С. 11 – 17; № 3, С. 18 – 24.
10. Тарапанов А.С., Шаблинская Т.Н. Комплексный анализ формообразования круговых зубьев цилиндрических колес. Сборник статей по материалам XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механика XXI века».

Помятихин Николай Игоревич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел.
Магистр кафедры «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств».
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. 8-915-508-38-17
E-mail: pomni182@gmail.com

Шаблинская Татьяна Николаевна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел.
Аспирант кафедры «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств».
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. 8-903-880-68-38
E-mail: 2007tasha@rambler.ru

N.I. POMYATIKHIN, T.N. SHABLINSKAYA

COMPUTER SIMULATION OF PRELIMINARY FORM FORMATION OF CYLINDRICAL WHEEL CIRCUIT DEPTH

Abstract. *The article analyzes the preliminary shaping of the cavity of a circular tooth of a cylindrical wheel. A dependence is proposed that allows creating the basic basis for optimizing the allowance for finishing and rough machining, predicting the value of the cutting forces for any initial parameters. It is established that the cutting of the convex and concave side of the cavity is necessary to be carried out by different heads, and the rough machining with the gear-cutting head using a trapezoidal profile.*

Keywords: *cylindrical wheels with circular teeth, shaping, pre-treatment, involute, incisive sausage.*

BIBLIOGRAPHY

1. Muravyev A.A., Tarapanov A.S., Shablinskaya T.N. «Vybor tekhnologii formoobrazovaniya tsilindricheskikh plastmassovykh koles s krugovymi zubymi». Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. № 3. 2017.
2. Parshin A.N. Razrabotka metodov analiza, sinteza zatsepleniya i izgotovleniya arochnykh tsilindricheskikh zubchatykh koles // Avtoreferat dis. kand. tekhn. nauk Moskva, 2008. 16 s.
3. Vasin V.A., Bobkov M.N. Vozmozhnost sozdaniya yedynoy obobshchennoy metodiki geometricheskogo rascheta tsilindricheskikh peredach s krugovymi zubymi // Izvestiya TulGU. Trudy mezhdunarodnykh nauch.-tekhn. konferentsii, posvyashchennoy 100-letayu so dnya rozhdeniya S.S. Petrukhina. Vyp. 2. – Instrumentalnyye sistemy: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye. Seriya: Mashinostroyeniye. TulGU, 2003. S. 287 291.
4. Vasin V.A., Bobkov M.N., Sheynin G.M. Obrabotka arochnykh zubyev tsilindricheskikh koles // STIN. 2005. № 4. S. 26 29.
5. Davydov A.P., Lipatov S.I., Margolit R.B., Pankov I.G., Parshin A.N. Arochnaya tsilindricheskaya zubchataya peredacha: pat. 2469230 Ros. Federatsiya; zayavl. 19.05.2011; №, zayavki 2011120157/11, opubl. 10.12.2012.
6. Vinogradov A.N., Lipatov S.I., Margolit R.B. Tochnost narezaniya koles s arochnymi zubymi // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2013. № 9. S. 23 27.
7. Lipatov S.I. Razrabotka mnogoreztsovogo obkatnogo instrumenta s nulevym uglom profilva dlya vysokoproizvoditelnogo zubonarezaniya arochnykh koles na stankakh s CHPU // Avtoreferat kand. tekhn. nauk Moskva, 2013. 16 s.
8. Sandvik Coromant: sayt. 2014. [Elektronnyy resurs] / Katalog URL: <http://sandvik-coromant.ru> (data obrashcheniya: 23.04.2015).
9. Tarapanov A.S., Kharlamov G.A., Shorkin V.S. Matematicheskiye osnovy virtualnogo predstavleniya i analiza protsessov lezviynoy obrabotki // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. 2003, № 2, S. 11 – 17; № 3, S. 18 – 24.
10. Tarapanov A.S., Shablinskaya T.N. Kompleksnyy analiz formoobrazovaniya krugovykh zubyev tsilindricheskikh koles. Sbornik statev po materialam XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Mekhaniki XXI veku».

Pomyatikhin Nikolay Igorevich

OSU named I.S. Turgenev, Orel
Master of the Department of Mechanical Engineering
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Ph. 8-915-508-38-17
E-mail: pomni182@gmail.com

Shablinskaya Tatiana Nikolayevna

OSU named I.S. Turgenev, Orel
Postgraduate of the Department of Mechanical
Engineering
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Ph. 8-903-880-68-38
E-mail: 2007tasha@rambler.ru

УДК 629.4.021

В.И. ВОРОБЬЕВ, О.В. ИЗМЕРОВ, М.И. БОРЗЕНКОВ, С.Н. ЗЛОБИН, С.О. КОПЫЛОВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОЛЕСНО–МОТОРНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения надежности колесно–моторного блока электровоза 2ЭС6. Предложена конструкция подвески тягового электродвигателя с заменой верхнего шарнира плоскими резиновыми элементами, обеспечивающая снижение динамических нагрузок и установлена целесообразность разработки варианта привода с опорно–рамным подвешиванием двигателя и осевым редуктором. На предложенные решения получено два патента на изобретения и пять патентов на полезные модели.

Ключевые слова: тяговый привод локомотива, динамика, надежность, конструирование.

Характеристика проблемы.

Опорно–осевой привод электровоза постоянного тока 2ЭС6 завода УЗЖМ группы «Синара» (рисунок 1) представляет собой усовершенствованный вариант тягового привода электровозов серии ВЛ80 отечественных железных дорог с двусторонней косозубой передачей, основные отличия состоят в применении моторно–осевых подшипников (МОП) качения и подвески с двумя сферическими резинометаллическими шарнирами (РМШ) [1].

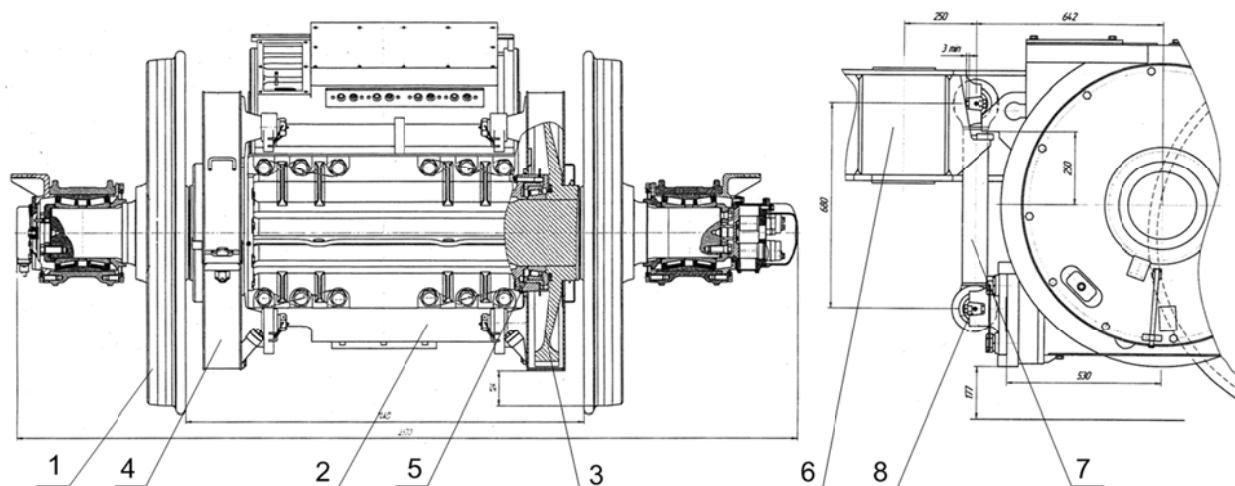


Рисунок 1 – Тяговый привод электровоза 2ЭС6:

1 – колесная пара; 2 – тяговый электродвигатель (ТЭД); 3 – зубчатая передача; 4 – кожух зубчатой передачи; 5 – моторно–осевой подшипник; 6 – рама тележки; 7 – тяга подвески; 8 – сферический РМШ

Основным достоинством такого привода является простота изготовления и ремонта, а также минимальные отличия от привода грузовых электровозов, составляющих основную часть парка электровозов отечественных железных дорог.

Как указано в [2], в 2015 году повреждения кожухов зубчатой передачи и поводков подвески тяговых электродвигателей (ТЭД) составили более 40 % от общего числа повреждений механического оборудования электровоза 2ЭС6. Кроме того, доля unplanned ремонтов ТЭД составила 26 % от общего числа, что выше среднесетевых показателей 13 – 15 % [4]. Таким образом, несмотря на то, что тяговый привод электровоза 2ЭС6 относится к новым разработкам, существует необходимость в его модернизации. Настоящая статья является попыткой решения данной проблемы.

Известные причины выходов из строя. Повреждения кожухов зубчатой передачи для данного типа привода встречались и ранее и описаны, в частности, в [3]. Основная причина заключается в том, что кожух, не несущий статических нагрузок и выполняющий функцию удержания смазки и защиты зубчатой передачи от пыли и влаги, не обладает достаточной прочностью при воздействии вибраций от пути и ударов от посторонних

При этом теряется совместимость модернизированных ТЭД с ранее выпущенными, что создает трудности в депо. При обеспечении совместимости ТЭД требуется сократить наружный диаметр резиновых элементов примерно до 150 мм (соответствует наружному диаметру головки РМШ), без изменения внутреннего диаметра, определяемого условиями поводка (~60 мм). Исходя из величин вертикального перемещения буксы относительно рамы тележки до 30 мм и поперечных перемещений ТЭД до 13 мм на сторону, краевые деформации шайб при диаметре 150 мм составят 2,3 мм. Исходя из того, что в приводе тепловозов использовалась подвеска с жесткостью 4 кН/мм [7], а жесткость подвески при постоянной частоте собственных колебаний ТЭД на подвеске будет примерно пропорциональна массе ТЭД,

полагая, что жесткость подвески должна быть менее 6 кН/мм. Составляющая от веса ТЭД по [2] – 22,5 кН, статическая реакция при движении под тягой в часовом режиме – 28,8 кН, соответственно, суммарное статическое усилие в тяге в часовом режиме составляет 51,3 кН, сжатие резиновой шайбы под указанной нагрузкой 8,6 мм. Таким образом, суммарная деформация плоских элементов должна составить около 11 мм, что, как показывает опыт применения резиновых амортизаторов в экипажной части локомотива, должно составлять не более 15 % от толщины элемента. Таким образом, минимальная толщина резиновой шайбы, определенная по данной методике, составит ~75 мм, а это означает, что размеры резиновой шайбы подвески ТЭД электровозов серий ВЛ80 уже близки к минимально допустимым.

Из изложенного следует, что вариант модернизации тягового привода с установкой плоских резиновых амортизаторов в нижнем шарнире подвески не полностью решает задачу обеспечения надежности работы подвески из-за ограничения габаритов для размещения резиновых элементов.

Анализ работы подвески. Согласно [2], экспериментально определенная радиальная жесткость РМШ составляет 27 тс/мм = 265 кН/мм. Полагая, что разрушение резинового элемента возможно при деформации сжатия более 20 %, получаем для толщины резинового слоя в 10 мм величину предельной нагрузки $265 \cdot 10 \cdot 0,2 = 530$ кН, что более чем в 10 раз выше расчетного статического усилия. Однако, поскольку верхний и нижний шарниры передают одну и ту же продольную нагрузку, то при этом должны были разрушаться оба шарнира, в то время как в [5] отмечено разрушение преимущественно нижнего шарнира.

При указанных выше вертикальном и горизонтальном перемещении пары и наружном радиусе резиновой сферы ~ 60 мм суммарный сдвиг резины по наружному радиусу составляет около 2 мм, т.е. 20 % от толщины резинового слоя, при допустимой величине деформации в 30 %. Таким образом, учет деформаций сдвига не дает однозначного объяснения преимущественного разрушения нижнего РМШ.

В [7] в качестве одной из причин выхода из строя сферического РМШ подвески осевого редуктора электровоза ЭП10 названы нарушения технологии изготовления, а именно подготовки поверхностей арматуры РМШ к вулканизации. Однако применительно к электровозу ЭС6 это не объясняет факта отсутствия в представленной в [2] статистике отказов механического оборудования отказов буксовых поводков, в которых также применены сферические РМШ.

Наконец, возможной причиной повреждения нижнего РМШ являются перемещения в нештатном режиме работы, превышающие допустимые (монтаж тележки, выкатка колесно–

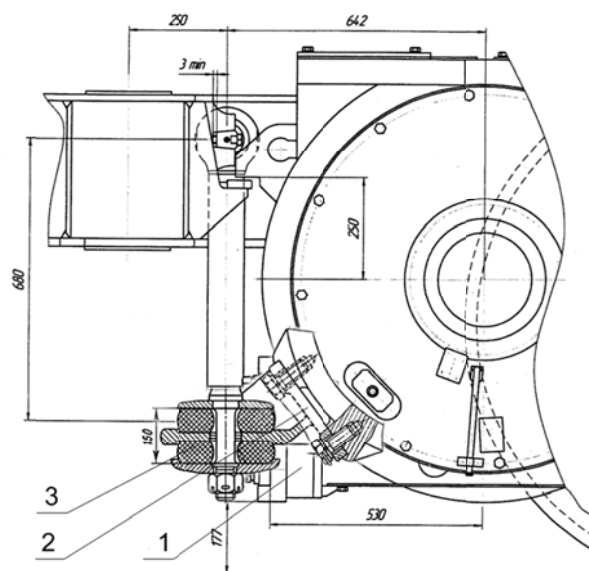


Рисунок 3 – Наложение вариантов подвески:
1 – кронштейн ТЭД 2ЭС6; 2 – кронштейн ВЛ80;
3 – резиновые элементы (ВЛ80)

моторного блока (КМБ), прохождение на малой скорости на подъездных путях асимметричных неровностей значительной высоты и т.п.).

Предложения по модернизации подвески. Показатели ТЭД ЭДП–810У1, как звена динамической системы КМБ, близки к показателям ТЭД отечественных электровозов постоянного и переменного тока с двусторонней жесткой тяговой передачей (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели ТЭД электровозов

Марка ТЭД	Локомотив	Масса, кг	Передаточное число
ЭДП–10У1	2ЭС6	4650	3,44
ДТК–800А	2ЭС4к	4610	3,26
НБ–514А	ВЛ80с	4300	4,19
НБ–418К	ВЛ80к	4350	4,19

Отсюда можно сделать вывод, что подвеска ТЭД с теми же упруго–диссипативными свойствами, что и использованная на электровозах 2ЭС4к, ВЛ80 и ВЛ10 различных индексов, обеспечит сходные динамические свойства и для КМБ электровоза 2ЭС6.

При разработке предложения авторами приняты за основу решения подвески, защищенные патентами на полезные модели №№ 176570 [8] и 176428 [9] и на изобретение № 2549427 [10]. В подвеске по патенту № 176570 для двухосной тележки две тяги подвесок тяговых электродвигателей крепятся к одной траверсе, закрепленной на раме тележки болтами, при этом каждая из тяг связана с траверсой набором плоских упругих элементов, стянутых гайкой, а с тяговым электродвигателем – шарниром, расположенным на нижнем конце подвески, через который проходит валик, имеющий канавку и фиксируемый в осевом направлении стопорной планкой, закрепленной болтами на кронштейне тягового электродвигателя. В подвеске по патенту № 2549427 компенсация поперечных перемещений производится за счет поперечного перемещения нижнего РМШ по его оси, при этом для предотвращения заклинивания нижнего РМШ Длина резиновой втулки верхнего РМШ составляет не менее 2/3 от величины межцентрового расстояния по шарнирам подвески. Нижний РМШ выполнен сферическим и пространство между ним и осью заполнено смазочной жидкостью с ферромагнитными наночастицами, а в расточке сферического сайлентблока помещены постоянные магниты, удерживающие смазку. Подвеска по патенту № 176428 отличается от предыдущей тем, что верхний РМШ разделен на два, разнесенных вдоль оси.

В предлагаемой подвеске (рисунок 4) плоские резиновые элементы крепятся не на кронштейне ТЭД, а на траверсе, связанной с рамой тележки болтовым креплением, за счет чего появляется возможность унифицировать их по размерам и свойствам с элементами подвески электровозов ВЛ10/ВЛ80. Компенсация поперечных перемещений ТЭД осуществляется за счет скольжения внутренней втулки сферического РМШ по оси. Для предотвращения заклинивания длина поводка выбирается такой, чтобы расстояние от оси РМШ до траверсы не превышало 1,5 от внешнего диаметра плоского резинового элемента, а пространство между РМШ и осью заполнено смазочной жидкостью с ферромагнитными наночастицами, удерживаемой постоянными магнитами в расточке шарнира.

Предложенный вариант подвески позволяет разместить плоские резиновые элементы достаточных размеров, чтобы обеспечить амортизацию ударов при проезде неровностей пути, а возможность скольжения внутренней втулки РМШ на оси предохраняет шарнир от повреждений при перемещениях в нештатном режиме работы.

При этом в конструкцию ТЭД не вносятся никаких изменений, что облегчает ремонт и замену КМБ в условиях депо. Для выкатки ТЭД на скатопускной канаве, в отличие от варианта с нижним расположением плоских амортизаторов, не требуется демонтаж самих амортизаторов с последующей трудоемкой затяжкой при дальнейшей подкатке: достаточно лишь при поддомкраченном ТЭД снять фиксирующую пластину и выбить ось из отверстия кронштейна.

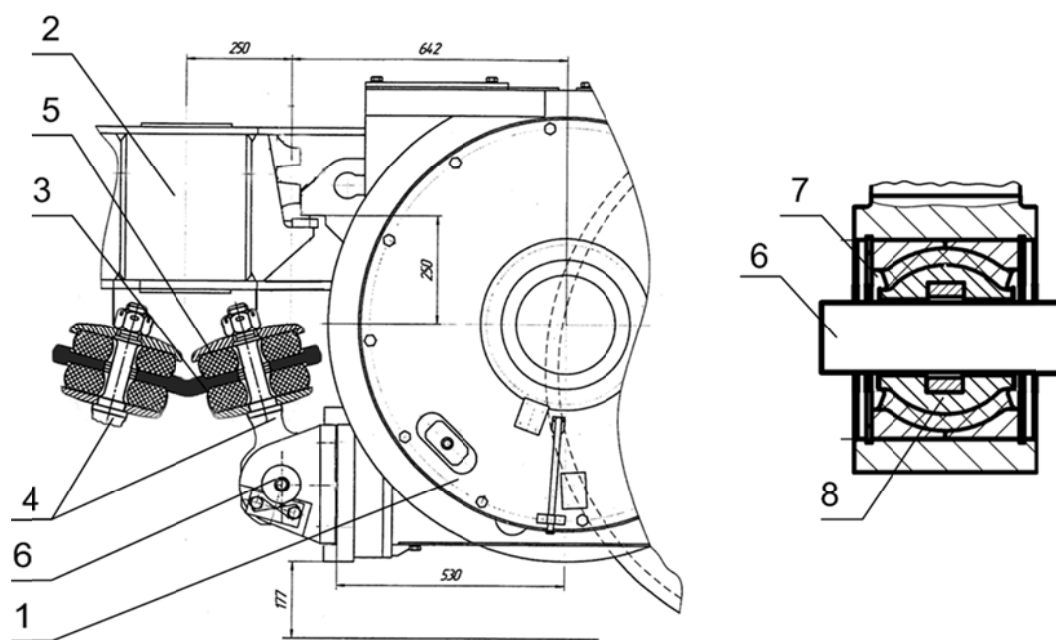


Рисунок 4 – Предлагаемый вариант подвески:

1 – ТЭД; 2 – рама тележки; 3 – траверса; 4 – поводки подвески; 5 – резиновые элементы; 6 – ось РМШ; 7 – сферический РМШ; 8 – кольцевой магнит

Авторы предлагают провести дальнейшую проработку вариантов конструкции предложенной подвески для уточнения следующих вопросов:

- уточнение рациональной формы плоских амортизаторов, которые могут быть выполнены не только круглыми, но и прямоугольными, в том числе и в виде двух пар разнесенных в поперечном направлении параллелепипедов, для более надежного предотвращения заклинивания втулки РМШ на стержне и повышения амортизирующей способности;
- выяснение возможности и целесообразности применения вместо РМШ втулки, унифицированной, применяемой на электровозах серий ВЛ10 и ВЛ80;
- выяснение возможности расположить плоские амортизаторы над поперечной балкой рамы тележки, что позволило бы исключить изнашиваемые детали.

Комплексная модернизация колесно–моторного блока. Изменение конструкции подвески ТЭД не решает проблем надежности работы кожухов тяговой передачи, коллекторного ТЭД и зубчатой передачи, которые подвергаются высоким динамическим нагрузкам при прохождении неровностей пути. На тепловозах еще в 70–х годах прошлого века удалось существенно снизить динамические нагрузки в валопроводах тягового привода путем применения упругого зубчатого колеса (УЗК). В 80–е годы ВНИКТИ совместно с НЭВЗ были разработаны опытные образцы упругих косозубых зубчатых колес (УКЗК) [4, 11], однако они до настоящего времени не нашли широкого применения на электровозах, поскольку боковое давление в косозубой передаче вызывает износ элементов УЗК.

На данный момент основным вариантом тягового привода, который решает указанные проблемы, является привод с опорно–рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором:

- ТЭД закреплен на раме тележки и не испытывает существенных динамических воздействий ни со стороны пути, ни со стороны зубчатой передачи;
- корпус осевого редуктора имеет значительно большую прочность по сравнению с кожухом тяговой передачи и, как показала длительная эксплуатация электровозов ЧС различных серий, не подвержен повреждениям от наледей;
- наличие упругого звена в передаточном механизме позволяет существенно снизить динамические нагрузки в зубчатой передаче.

К известным проблемам тягового привода данного типа относятся:

- более жесткие ограничения осевых габаритов ТЭД;

– сложность решения задачи проектирования передаточного механизма на быстроходном валу тяговой передачи.

Рассмотрим возможность решения данных проблем.

Как видно из таблицы 2, современные ТЭД при опорно–осевом приводе и приводе с опорно–рамным редуктором вполне сопоставим по показателям мощности, что связано с ограничением скорости в часовом и продолжительном режиме в грузовом движении. По моментомассовым показателям для привода с осевым редуктором некоторые ТЭД могут на 20 % превосходить опорно–осевые ТЭД. Переход к приводу с осевым редуктором в общем случае приводит к сокращению длины шихтованной части якоря, однако в известных конструкциях с опорно–осевым приводом максимальная длина якоря не всегда было реализована. Так, у ТЭД ЭД126АУХЛ1 длина якоря близка к ТЭД с опорно–осевой подвеской. Имеются резервы увеличения осевых габаритов ТЭД в приводе осевым редуктором. В частности, применение компенсирующих муфт малых осевых габаритов (резинокордные, зубчатые), осевые габариты корпуса ТЭД у двигателя ЭД126АУХЛ1 доведены до 925 мм против 850 мм у А1–4442nP. При этом привод тепловоза 2ТЭ121 рассчитан на горизонтальные перемещения ТЭД при осевом разбеге средней колесной пары 14 мм, что выше, чем в двухосной тележке электровоза 2ЭС6.

Таблица 2 – Характеристики ТЭД при опорно–осевом приводе и приводе с опорно–рамным редуктором

ТЭД	ЭД126АУХЛ1	НБ–520В	А1–4442nP	НБ–514Б	ЭДП810У1
Локомотив	ТЭ136	ЭП1	ЧС4т	2ЭС5К	2ЭС6
Тип привода	ОРП–ОР	ОРП–ОР	ОРП–ОР	ООП	ООП
$P_{\text{ч}}$, кВт	–	800	900	820	810
P_{∞} , кВт	–	750	860	765	755
M_{∞} , кНм	8,74	6,9	7,2	7,8	9,4
N_{max} , мин ^{–1}	1910	2020	1860	2030	1800
Диаметр, мм	1038	1072	1320	1045	1070
Осевой габарит, мм	925	874	850	1054	1054
Диаметр якоря, мм	680	730	710	660	740
Длина пакета, мм	340	260	280	350	400
Масса, кг	3400	3500	2950	4300	4600
C_M , кг/Нм	0,389	0,507	0,410	0,551	0,490

Предельная ширина ТЭД при осевом подвешивании и двусторонней тяговой передаче может быть принята равными 1020...1085 мм [8], но, с другой стороны, при опорно–осевом приводе требуется использование якорных подшипников больших габаритов, в том числе и ширины, для восприятия нагрузок от тяговой передачи и динамических сил при колебаниях ТЭД на неровностях пути. Таким образом, удлинение остова при опорно–осевой подвеске ТЭД не позволяет полностью реализовать увеличение длины якоря из–за больших размеров подшипниковых узлов.

Таким образом, в приводе с осевым редуктором имеются возможности увеличения осевых габаритов ТЭД и его мощности по сравнению с существующими аналогами, в связи с чем целесообразна конструктивная проработка такого варианта КМБ для электровоза 2ЭС6.

Также существуют резервы повышения надежности передаточного механизма, в первую очередь применяемой на электровозе ЭП1 резинкордной муфты. Как показала практика эксплуатации [12], недостатком данной муфты является возможность выхода из строя в эксплуатации, обусловленная сложностью монтажа. Нарушения технологии затяжки приводят к проскальзыванию резинкордных элементов по фланцам при передаче крутящего момента с последующим разрушением резинкордных элементов и болтов.

Предлагаемая конструкция резинкордной муфты показана на рисунке 5. Для обеспечения качества затяжки элементов и проверки несущей способности муфты до монтажа с тяговым приводом на внутреннем фланце сделаны торцевые шлицы. Для

повышения величины передаваемых нагрузок площади поверхностей внутренней и внешней бортовой зон резинокордного элемента выполнены равными друг другу, а диаметры болтов, соединяющих внешние и внутренние прижимные кольца соответственно с внешним и внутренним фланцами, обратно пропорциональны средним диаметрам бортовых зон, на которых расположены болты.

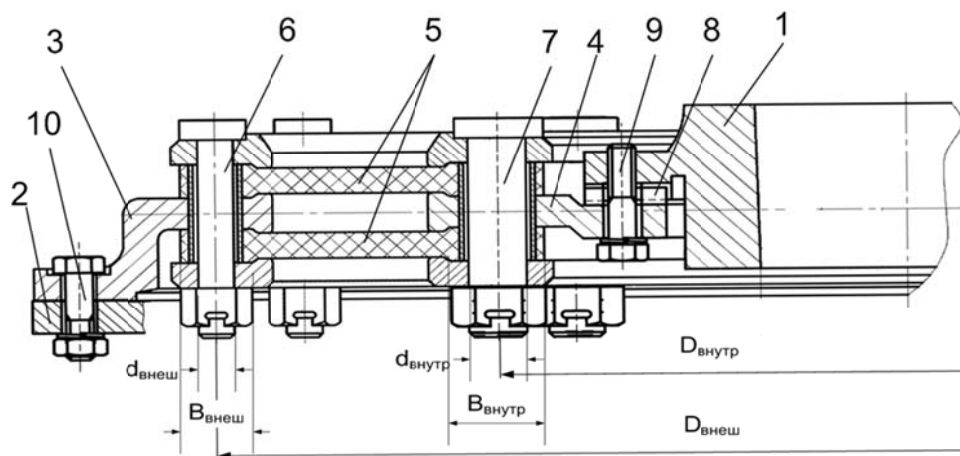


Рисунок 5 – Предложенная конструкция резинокордной муфты:

- 1 – фланец на валу ТЭД; 2 – фланец на валу редуктора; 3 – наружный фланец муфты;
4 – внутренний фланец муфты; 5 – резинокордные элементы; 6 – болты наружного фланца;
7 – болты внутреннего фланца; 8 – шлицы; 9 – болт крепления муфты к фланцу на валу ТЭД;
10 – болт крепления муфты к фланцу на валу редуктора

Конструкция муфты защищена патентом РФ на изобретение № 2527254 [13] и патентами РФ на полезные модели №№ 166918, 157519 и 173560 [14 – 16].

Другим возможным вариантом является применение передаточного механизма с двумя зубчатыми муфтами, как это сделано на электровозе ДСЗ.

Основные результаты и выводы.

1. При эксплуатации тягового привода электровоза 2ЭС6 имеются частые случаи выходов из строя тягового электродвигателя, кожухов зубчатой передачи и подвески ТЭД. Реализация варианта модернизации тягового привода с заменой нижнего шарнира на плоские резиновые амортизаторы осложнена ограниченными габаритами для размещения амортизаторов.

2. Предложен вариант модернизации подвески ТЭД с заменой верхнего шарнира на плоские резиновые амортизаторы и обеспечением поперечных перемещений за счет скольжения нижнего шарнира по оси. Исползованные решения запатентованы (получен патент на изобретение и два патента на полезные модели).

3. Для дальнейшего повышения надежности работы привода целесообразна конструкторская проработка варианта привода с опорно-рамной подвеской ТЭД и осевым редуктором. Предложена конструкция резинокордной муфты передаточного механизма, обеспечивающая повышенную надежность работы; на конструкцию получен патент на изобретение и три патента на полезные модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коссов В.С., Мещерин Ю.В., Руденко В.Ф., Михайлов Г.И., Гусев В.Ю., Ткаченко В.Н. Экипажная часть грузового электровоза постоянного тока 2ЭС6. // Создание и модернизация электровозов. Под ред. Г.И. Михайлова. Тр. ВНИКТИ, Коломна, 2008, с. 13–18.
2. Юрасов О.Д. Повышение работоспособности колесно-моторных блоков электровозов 2ЭС6. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О.Д. Юрасов // Омск, 2016. – 122 с.
3. Мальцев А.В. Повышение надежности изоляционных конструкций тяговых двигателей электровозов /А.В. Мальцев // Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья

и железнодорожный транспорт: Сборник трудов международной научно-практической конференции. – Чита: ЗаБИЖТ.2011. – 6С.

4. Калихович В.Н. Тяговые приводы локомотивов. (Устройство, обслуживание, ремонт). М.–Транспорт, 1983. 111 с.

5. Корнев А.М., Липунов Д.В. Модернизация системы подвешивания ТЭД электровоза постоянного тока 2ЭС6. / А.М. Корнев // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. – с. 237–242.

6. Отчет ВНИТИ И–103–68. «Исследование динамики тягового привода тепловоза 2ТЭ10Л с опорно-осевым подвешиванием электродвигателя ЭД107 в эксплуатационных условиях». Коломна, 1968, 120 с.

7. Соколов, Ю.Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю.Н. Соколов, А.С. Пономарев, В.Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4–11.

8. Патент на полезную модель № 176570, Российская Федерация, МПК В61С 9/38. Устройство для крепления тягового электродвигателя локомотива к раме тележки. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Бондаренко Д.А., Измеров О.В., Маслов М.А., Шорохов С.Г., Копылов С.О. Оpubл. 23.01.2018 Бюл. № 3.

9. Патент на полезную модель № 176428, Российская Федерация, МПК В61С 9/38. Узел подвешивания тягового электродвигателя. / Новиков В.Г., Воробьев В.И., Измеров О.В., Тихомиров В.П. Оpubл. 18.01.2018 Бюл. № 2.

10. Узел подвешивания тягового электродвигателя / Пугачев А.А., Волохов С.Г., Измеров О.В., Воробьев В.И., Михальченко Г.С., Новиков В.Г. Патент на изобретение № 2549427, Российская Федерация, МПК В61С 9/50. Оpubл. 27.04.2015, бюл. № 12.

11. Бирюков И.В., Беляев А.И., Рыбников Е.К.. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. М., Транспорт, 1986 – 256 с.

12. Соколов, Ю.Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю.Н. Соколов, А.С. Пономарев, В.Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4–11.

13. Луков Н.М., Ромашкова О.Н., Космодамианский А.С., Попов Ю.В., Стрекалов Н.Н., Серин С.А., Михальченко Г.С., Воробьев В.И., Новиков В.Г., Измеров О.В., Пугачев А.А. Компенсационная муфта тягового привода локомотива. Патент РФ № 2527254 от 19.12.2012.

14. Патент на полезную модель № 166918, Российская Федерация, МПК F16D 3/78, В61С 9/00. Компенсационная муфта тягового привода локомотива. / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Бондаренко Д.А., Пугачев А.А., Цыганков С.Г., Измеров О.В., Шорохов С.Г. Оpubл. 10.12. 2016, бюл. № 34.

15. Патент на полезную модель № 157519, Российская Федерация, МПК F16D 3/78. Оболочка резинокордная для высокоэластичной муфты. / Воробьев В.И., Измеров О.В., Дорофеев О.В., Злобин С.Н. Оpubл. 10.12.2015, бюл. № 34.

16. Патент на полезную модель № 173560, Российская Федерация, МПК В61С 9/00, F16D 3/78. Компенсационная муфта тягового привода локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Новиков А.С., Космодамианский А.С., Шорохов С.Г., Мануева М.В.. Оpubл. 30.08.2017 Бюл. № 25.

Воробьев Владимир Иванович
Брянский государственный
технический университет, г.
Брянск
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Подвижной
состав железных дорог»
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Измеров Олег Васильевич
Брянский государственный
технический университет, г. Брянск
Соискатель по кафедре
«Подвижной состав железных
дорог»
E-mail: izmerov@yandex.ru

Борзенков Михаил Иванович
Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева,
г. Орел
Кандидат технических наук,
доцент, начальник отдела научных
изданий
E-mail: bim@ostu.ru

Злобин Сергей Николаевич
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение»
E-mail: zsn2@rambler.ru

Копылов Степан Олегович
Брянский государственный
технический университет, г. Брянск
Аспирант кафедры «Подвижной
состав железных дорог»
E-mail: kopylov.stepan@gmail.com

V.I. VOROBYEV, O.V. IZMEROV, M.I. BORZENKOV, S.N. ZLOBIN, S.O. KOPYLOV

MODERNIZATION OF WHEEL–MOTOR BLOCK ELECTROPHOSES 2ES6

Abstract. *The problems of increasing the reliability of the wheel–motor unit of the electric locomotive 2ES6 are considered. The design of the traction motor suspension is proposed, with the replacement of the upper hinge by flat rubber elements, which reduces the dynamic loads and establishes the expediency of developing a drive variant with a support and frame suspension of the engine and an axial reduction gear. The proposed solutions received two patents for inventions and five patents for utility models.*

Keywords: *locomotive traction drive, dynamics, reliability, design.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kossov V.S., Meshcherin YU.V., Rudenko V.F., Mikhaylov G.I., Gusev V.YU., Tkachenko V.N. Ekipazhnaya chast gruzovogo elektrovoza postoyannogo toka 2ES6. // Sozdaniye i modernizatsiya elektrovozov. Pod red. G.I. Mikhaylova. Tr. VNIKTI, Kolomna, 2008, s. 13–18.
2. Yurasov O.D. Povysheniye rabotosposobnosti kolesno–motornykh blokov elektrovozov 2ES6. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / O.D. Yurasov // Omsk, 2016. – 122 s.
3. Maltsev A.V. Povysheniye nadezhnosti izolyatsionnykh konstruktsey tyagovykh dvigateley elektrovozov / A.V. Maltsev // Problemy transferta sovremennykh tekhnologiy v ekonomiku Zabaykalya i zheleznodorozhnyy transport: Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii. – Chita: ZabIZHT.2011. – 6S.
4. Kalikhovich V.N. Tyagovyye privody lokomotivov. (Ustroystvo, obsluzhivaniye, remont). M.– Transport, 1983. 111 s.
5. Kornev A.M., Lipunov D.V. Modernizatsiya sistemy podveshivaniya TED elektrovoza postoyannogo toka 2ES6. / A.M. Kornev // Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov: Materialy tretyey vserossiyskoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem / Omskiy gos. un–t putey soobshcheniya. Omsk, 2016. – s. 237–242.
6. Otchet VNITI I–103–68. «Issledovaniye dinamiki tyagovogo privoda teplovoza 2TE10L s oporno–osevym podveshivaniyem elektrodvigatelya ED107 v ekspluatatsionnykh usloviyakh». Kolomna, 1968, 120 s.
7. Sokolov, YU.N. Povysheniye nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskikh elektrovozov EP1M i EP10 / YU.N. Sokolov, A.S. Ponomarev, V.Ye. Degtyarev // Lokomotiv–inform. – 2010. – № 6. – S. 4–11.
8. Patent na poleznuyu model № 176570, Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61S 9/38. Ustroystvo dlya krepleniya tyagovogo elektrodvigatelya lokomotiva k rame telezhki. / Vorobyev V.I., Antipin D.YA., Bondarenko D.A., Izmerov O.V., Maslov M.A., Shorokhov S.G., Kopylov S.O. Opubl. 23.01.2018 Byul. № 3.
9. Patent na poleznuyu model № 176428, Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61S 9/38. Uzel podveshivaniya tyagovogo elektrodvigatelya. / Novikov V.G., Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Tikhomirov V.P. Opubl. 18.01.2018 Byul. № 2.
10. Uzel podveshivaniya tyagovogo elektrodvigatelya / Pugachev A.A., Volokhov S.G., Izmerov O.V., Vorobyev V.I., Mikhachenko G.S., Novikov V.G. Patent na izobreteniyе № 2549427, Rossiyskaya Federatsiya, MPK V61S 9/50. Opubl. 27.04.2015, byul. № 12.
11. Biryukov I.V., Belyayev A.I., Rybnikov Ye.K.. Tyagovyye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog. M., Transport, 1986 – 256 s.
12. Sokolov, YU.N. Povysheniye nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskikh elektrovozov EP1M i EP10 / YU.N. Sokolov, A.S. Ponomarev, V.Ye. Degtyarev // Lokomotiv–inform. – 2010. – № 6. – S. 4–11.
13. Lukov N.M., Romashkova O.N., Kosmodamianskiy A.S., Popov YU.V., Strekalov N.N., Serin S.A., Mikhachenko G.S., Vorobyev V.I., Novikov V.G., Izmerov O.V., Pugachev A.A. Kompensatsionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva. Patent RF № 2527254 ot 19.12.2012.
14. Patent na poleznuyu model № 166918, Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16D 3/78, B61C 9/00. Kompensatsionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva. / Antipin D.YA., Vorobyev V.I., Bondarenko D.A., Pugachev A.A., Tsygankov S.G., Izmerov O.V., Shorokhov S.G. Opubl. 10.12. 2016, byul. № 34.
15. Patent na poleznuyu model № 157519, Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16D 3/78. Obolochka rezinokordnaya dlya vysokoelastichnoy mufty. / Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Dorofeyev O.V., Zlobin S.N. Opubl. 10.12.2015, byul. № 34.
16. Patent na poleznuyu model № 173560, Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61C 9/00, F16D 3/78. Kompensatsionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva. / Vorobyev V.I., Antipin D.YA., Izmerov O.V., Novikov A.S., Kosmodamianskiy A.S., Shorokhov S.G., Manuyeva M.V.. Opubl. 30.08.2017 Byul. № 25.

Vorobev Vladimir Ivanovich
Bryansk State Technical University,
Bryansk
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor of the
Department «Railroad rolling stock»
E–mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Izmerov Oleg Vasilevich
Bryansk State Technical University,
Bryansk
Competitor of the Department
«Railroad rolling stock»
E–mail: izmerov@yandex.ru

Borzenkov Mikhail Ivanovich
Orel State University, Orel
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, head of scientific
publications Department
E–mail: bim@ostu.ru

Zlobin Sergey Nikolaevich
Orel State University, Orel
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
the Department «Mechanical engineering»
E–mail: zsn2@rambler.ru

Kopylov Stepan Olegovich
Bryansk State Technical University, Bryansk
Graduate student of the Department «Railroad rolling
stock»
E–mail: kopylov.stepan@gmail.com

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШПИНДЕЛЯ СТАНКА DMG MORI CTX 510 ECOLINE ПОЛИМЕРНЫМИ НАНОКОМПОЗИЦИЯМИ

Аннотация. Значительную часть российского рынка станочного оборудования занимают зарубежные производители, поэтому обслуживание станков и приобретение к ним запасных частей обходится предприятиям-заказчикам достаточно дорого. В связи с этим, удешевление и упрощение процессов восстановления изношенных станочных узлов и деталей, в частности шпинделей, является актуальной задачей. Специалисты центра обслуживания клиентов компании DMG MORI Russia отмечают, что случаи выхода из строя шпиндельных узлов из-за износа посадочных шеек шпинделя довольно редки, поэтому технологии наплавки и напыления нерационально применять для восстановления утраченного объема из-за потребности в специальном оборудовании. Авторами статьи предложен способ восстановления посадочных поверхностей шпинделя нанонаполненными анаэробными полимерами. Данная технология проста в применении, не требует дорогостоящего оборудования, в результате ремонта исключается фреттинг-износ сопрягаемых поверхностей. Кроме того, модифицирование полимерного состава наночастицами приводит к значительному улучшению его механических и эксплуатационных характеристик. Предлагаемый способ можно применять как самостоятельный способ ремонта, а также в комбинации с использованием дополнительной ремонтной детали — тонкостенной компенсационной втулки. В связи с этим, в статье рассмотрен вопрос механической обработки тонкостенных заготовок, обработка которых встречает трудности, обусловленные их деформацией под действием сил резания и закрепления [1].

Ключевые слова: шпиндельный узел, шпиндель, фреттинг-износ, тонкостенная втулка, анаэробный клей, нанонаполнители, прочность, вибростойкость.

Введение

Шпиндельный узел (далее – ШУ) является одним из наиболее ответственных узлов любого станка. Воспринимая, в первую очередь, эксплуатационные нагрузки и подвергаясь действию процессов различной скорости, ШУ должен обеспечивать заданные выходные параметры точности и сохранение их во времени [2]. Часто данный узел перестает работать в нормальном режиме из-за нарушений геометрии шпинделя, вследствие фреттинг-износа посадочных поверхностей.

Основная часть

Станок фирмы DMG MORI модели CTX510 ecoline (далее – CTX510 ecoline) – это современный, производительный, гибкий и простой в управлении универсальный токарный станок с ЧПУ [3]. Основной целью авторов статьи является разработка рациональной технологии восстановления изношенных посадочных поверхностей шпинделя CTX510 ecoline. На рисунке 1 приведен чертеж станка и его общий вид.

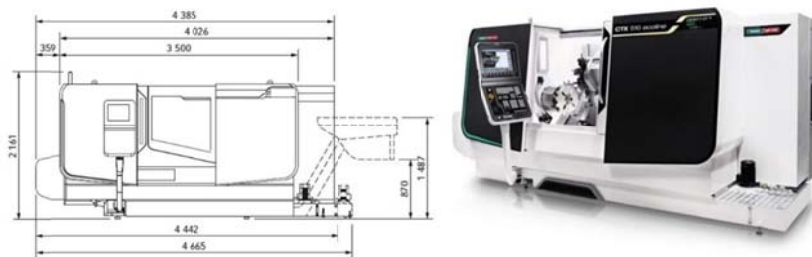


Рисунок 1 – Общий вид и чертеж станка CTX 510 ecoline

Шпиндельный узел токарного станка CTX 510 ecoline имеет клиноременный привод, рассчитанный на максимальную скорость вращения 3250 оборотов в минуту. Шпиндель смонтирован в корпусе ШУ на четырех радиально-упорных шариковых подшипниках. Материалом рассматриваемой детали служит углеродистая конструкционная сталь марки 1.0503 (по стандартам ФРГ). Отечественным аналогом данного материала является сталь 45.

При инспектировании шпиндельного узла и его элементов, специалисты обращают внимание на отсутствие смазки, наличие загрязнений, дефектов и следов неправильной эксплуатации механизма, а также на другие явные признаки отказа. Производится полная разборка ШУ, выполняется очистка деталей от масла, следов загрязнений и дается заключение о характере и причинах установленных дефектов [4].

Характерными дефектами шпинделей являются износ и фреттинг–коррозия посадочных поверхностей. Фреттинг–коррозия – это коррозия при минимальном повторяющемся (локальном) перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды [5]. Следует отметить, что износ посадочных поверхностей шпинделей не превышает нескольких десятков микрон.

К традиционным технологиям восстановления изношенных участков прецизионных валов относятся вибродуговая наплавка, плазменная металлизация, холодное газодинамическое напыление. К основным недостаткам данных методов можно отнести потребность в специальном оборудовании, структурную неоднородность нанесенных покрытий, а также их склонность к образованию усталостных трещин. Использование же полимерных составов холодного отверждения при ремонте шпинделей и других деталей, работающих в узлах повышенной жесткости, недопустимо, так как модуль упругости полимерных составов в сотни раз меньше модуля упругости стали. Учитывая то, что наносимый слой полимерного состава холодного отверждения должен составлять не менее 2–3 мм, это приведет к значительному снижению жесткости узла.

Перспективной технологией ремонта является использование модифицированных анаэробных полимерных составов. Достоинствами таких материалов являются универсальность и простота эксплуатации, предотвращение фреттинг–износа за счет тонкого полимерного слоя между сопрягаемыми деталями, достижение равномерного распределения давления по всей площади соединения. Кроме того, благодаря формированию малой толщины анаэробного слоя (до 10 мкм), практически сводится к нулю вероятность снижения жесткости шпиндельного узла.

При выборе ремонтного состава необходимо учитывать ряд факторов, характерных для работы ШУ: вибрационные нагрузки (максимально допустимые значения вибрации станков приведены в ГОСТ ИСО 10816–1–97), тепловой режим (обычно, температура работы подшипников в ШУ не превышает 45–50 °С), сдвиговые нагрузки (их пиковые значения могут достигать 3–5 кН).

Общепризнанным мировым лидером по производству анаэробных клеев является компания Loctite входящая в концерн Henkel [6]. Поэтому для дальнейших исследований был выбран анаэробный состав Loctite 660, который является однокомпонентным вал–втулочным фиксатором, полимеризующимся при нарушении контакта с кислородом воздуха в цилиндрических соединениях. Данный состав обладает отличными характеристиками заполнения зазоров и применяется для фиксации цилиндрических деталей при зазоре до 0,50 мм.

Согласно данным испытаний на сдвиг, проведенных компанией Локтайт по методике ISO 10123 через 24 часа после склеивания на стали при температуре окружающей среды 22 °С, прочность на сдвиг для Loctite 660 составляет 15–33 Н/мм². Заявленная прочность состава сохраняется при температуре до 30 °С, а при температуре 150 °С прочность снижается до 60%.

Для улучшения механических характеристик анаэробных составов предлагается использовать нанонаполнители, которые обладают высокой поверхностной энергией и малыми размерами. В работах ряда ученых отмечается, что при введении нанонаполнителей адгезионно–когезионная прочность полимеров увеличивается до 40 %, стойкость к вибрационным нагрузкам возрастает до 18% [7, 8, 9].

С целью определения характера изменения свойств нанокомпозиций на базе Loctite 660, нами были проведены экспериментальные исследования их прочности (в соответствии с ГОСТ 14759–69 и ГОСТ 14760–69) и вибростойкости.

Полимерный состав модифицировали нанопорошком оксида алюминия альфа типа (далее – Al_2O_3) со средним размером частиц 80 нм производства НПП «Центр нанотехнологий» и многослойными углеродными нанотрубками (далее – УНТ) производства компании DEALTOM со средним диаметром 49 нм. В ходе испытаний была определена

наиболее оптимальная концентрация наполнителей в составе исходного полимера.

Так, при наполнении состава Loctite 660 нанопорошком Al_2O_3 , наибольшие значения прочности имели образцы с концентрацией этого наполнителя 0,1 %, при этом значение нормальных разрушающих напряжений увеличилось с 4,0 до 6,3 МПа (на 57 %), а значение касательных разрушающих напряжений – с 2,1 до 3,3 МПа (на 67 %).

При наполнении данного состава углеродными нанотрубками – УНТ, наилучшие показатели достигались при их концентрации 0,5% по массе. Значения нормальных разрушающих напряжений увеличались с 4,0 до 5,6 МПа (на 40 %), а значение касательных разрушающих напряжений – с 2,1 до 2,85 МПа (на 36 %). Результаты испытаний представлены на рисунке 2.

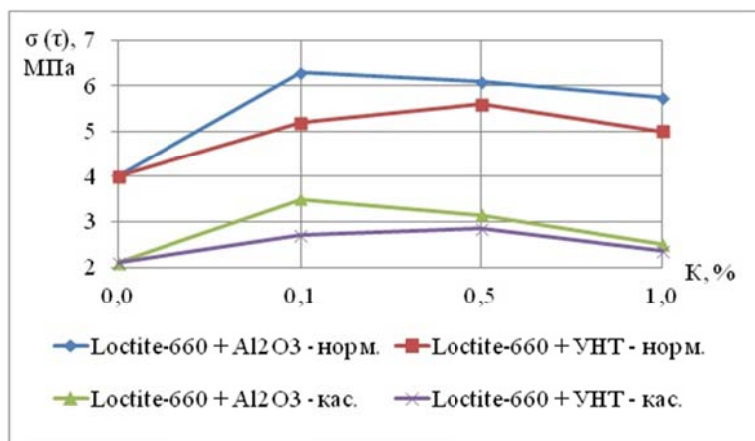


Рисунок 2 – Влияние наполнителей на величину нормальных и касательных разрушающих напряжений состава Loctite 660 и нанокмпозиций на его основе

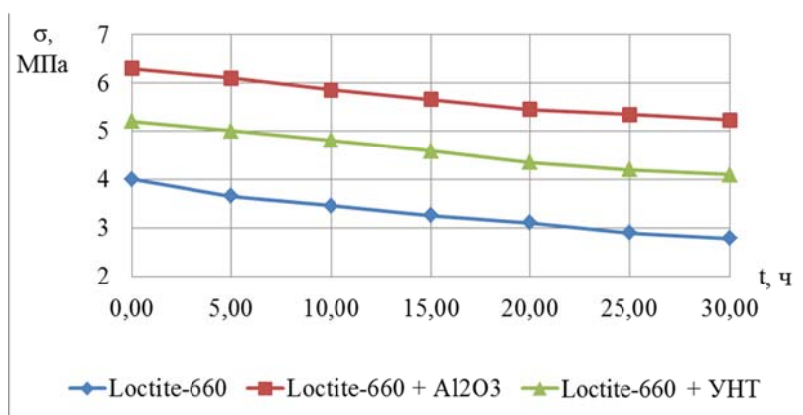


Рисунок 3 – Зависимость прочности σ состава Loctite 660 с нанокмпозициями от времени t воздействия вибрационных нагрузок

В процессе резания, который по своей природе является динамическим, в шпиндельном узле возникают вибрации (колебания с амплитудой от нескольких до десятков микрон и с частотой от нескольких десятков до нескольких тысяч Герц). Тем не менее, в литературных источниках отсутствует достаточное количество информации о том, какое влияние оказывают вибрационные нагрузки на прочность нанокмпозиций. Поэтому нами были проведены исследования на стойкость полимерных составов и нанокмпозиций на их основе к воздействиям вибрационных нагрузок. Испытанию подвергалось 42 образца, которые равными партиями, поочередно, извлекались с вибростенда по истечении определенного промежутка времени. Вибростенд изготовлен на базе эксцентрикового двигателя ИВ-107 (ТУ22-4666-80).

По результатам экспериментов (рисунок 3) было выявлено, что через 30 ч нагружения значение прочности ненаполненного состава Loctite 660 снизилось на 31 %, прочность состава Loctite 660, наполненного УНТ, снизилась всего на 23 %, а наночастицами Al_2O_3 – на

17 %. Полученные результаты показали, что композиции, наполненные наночастицами имеют стойкость к вибрационным нагрузкам в 1,4–1,8 раз выше, чем ненаполненные составы.

Таким образом, результаты исследований стойкости к вибрациям и воздействию нормальных и касательных разрушающих напряжений показывают, что введение нанонаполнителей – Al_2O_3 и углеродных нанотрубок – положительно влияет на данные характеристики. Наилучшими прочностными характеристиками и вибростойкостью обладает полимерный состав Loctite 660, наполненный 0,1 % по массе наночастицами Al_2O_3 . Он и был рекомендован для технологического процесса восстановления посадочных поверхностей шпинделя токарного станка.

Предлагаемый в статье метод восстановления предполагает использование дополнительной ремонтной детали (тонкостенной компенсационной втулки), так как толщина слоя полимера должна быть минимальной (чтобы избежать снижения жесткости узла). В случае выхода из строя этой ремонтной втулки, её можно демонтировать и заменить – ремонтпригодность вала возрастет. Некоторые компании–производители предлагают подобные изделия. Например, компанией SKF поставляются специальные тонкостенные втулки SPEEDI–SLEEVE, изготавливаемые из износостойкой стали и предназначенные для восстановления изношенных участков валов [10]. Следует отметить, что некоторые конструкции шпинделей не позволяют применять данный способ ремонта, так как необходимо использовать компенсационную втулку из того же материала, что и вал. Сложен и сам процесс прецизионной обработки тонкостенных деталей.

Трудность обработки тонкостенных деталей вращения обусловлена их низкой конструктивной жесткостью. Например, при закреплении тонкостенной трубки в трехкулачковом патроне токарного станка, в ней возникают упругие деформации от сил прижима кулачков. По этой причине, слой металла, удаляемый резцом, будет неравномерным. Данная проблема может быть решена благодаря использованию специальных станочных приспособлений и подбору «смягченных» режимов резания. Вопросы, связанные с выбором режимов резания при обработке тонкостенных трубчатых заготовок, рассматриваются в ряде статей [11,12].

Анализ технической литературы показал, что наиболее часто применяют следующие разновидности станочных приспособлений: гидропластмассовые, кулачковые (растачиваемые), цанговые, гофрированные оправки, разрезные втулки различной конфигурации [13]. Следует учесть, что материалом кулачков в данном случае служит мягкая незакаленная сталь, алюминий или пластик. Практический интерес представляет также устройство [14] для крепления тонкостенных труб, обеспечивающее повышенную жесткость и виброустойчивость, за счет пневматического зажима, позволяющего закреплять трубы большой длины.

В работе рассмотрена возможность улучшения традиционного цангового патрона для токарного станка — предложено выполнить зажимную часть таким образом, чтобы поджатие заготовки производилось одновременно по передней и задней её частям. Приспособление работает следующим образом: на гайке 1 выполнены правая и левая внутренние резьбы, втулка 2 – с левой резьбой, втулка 3 – с правой резьбой, внутренняя поверхность втулок – коническая. При кручении гайки 1 втулки 2 и 3 сдвигаются, передавая усилие затяжки на поверхность лепестков зажимного устройства 4, которые обхватывают заготовку 5. Данное зажимное устройство 4, в свою очередь, закрепляется в трехкулачковом самоцентрирующем патроне станка по задней цилиндрической поверхности (рисунок 4).

Общим недостатком, связанным с применением специальных станочных приспособлений, является увеличение сроков технологической подготовки производства, а также повышение производственных затрат, обусловленных проектированием приспособлений, их изготовлением и эксплуатацией [15]. Поэтому, при незначительном износе посадочной поверхности допускается не использовать компенсационную втулку, а только заполнить зазор между внутренним кольцом подшипника и валом анаэробным фиксатором. Это позволит исключить проворачивание подшипника на ослабленной посадке, благодаря чему значительно замедлится процесс изнашивания и увеличится ресурс шпинделя.

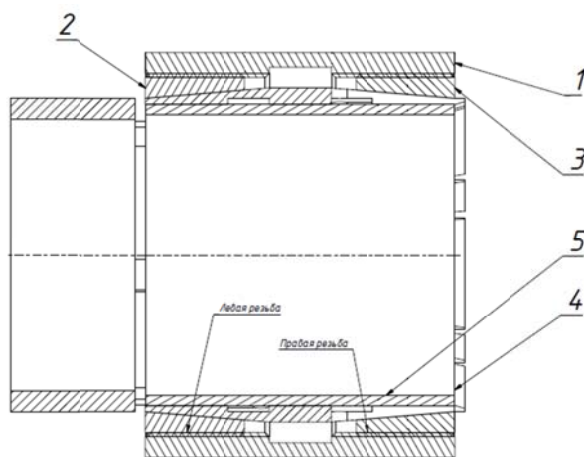


Рисунок 4 – Схема приспособления с установленной заготовкой:

1 – гайка; 2 – втулка с левой резьбой; 3 – втулка с правой резьбой; 4 – зажимное устройство; 5 – заготовка

Таким образом, проведенные изыскания позволили разработать технологический процесс восстановления посадочных поверхностей шпинделя токарного станка полимерными нанокompозициями, который включает в себя следующие операции:

- изготовление компенсационной втулки в соответствии с размерами подготовленной посадочной поверхности шпинделя (её предварительно подвергают механической обработке). Необходимо получить переходную посадку (или посадку с лёгким зазором) между валом и втулкой, обеспечив шероховатость сопрягаемых поверхностей порядка $Ra = 6,3$ мкм;

- очистка деталей средством для обезжиривания. Допускается применять ацетон ГОСТ 2768–84 с выдержкой 15 мин;

- подготовка анаэробного состава (введение 0,1 % по массе наночастиц Al_2O_3);

- нанесение небольшого количества полимерной нанокompозиции по окружности переднего края посадочной поверхности и внутренней поверхности втулки;

- запрессовка компенсационной втулки на подготовленный участок шпинделя;

- удаление лишнего состава;

- полимеризация состава в течение 12 часов;

- создание на компенсационной втулке посадочной поверхности под подшипник путем механической обработки её наружной части.

Следует отметить, что при запрессовке подшипника на восстановленную поверхность рекомендуется также применять анаэробную нанокompозицию.

Выводы

1. Предложен новый способ восстановления изношенных посадочных шеек шпинделей использованием дополнительной ремонтной детали – тонкостенной втулки с фиксацией её анаэробной нанокompозицией.

2. Экспериментально подтверждено положительное влияние нанонаполнителей — углеродных нанотрубок и нанопорошка Al_2O_3 на прочностные характеристики (до 67 %) и стойкость к вибрациям (до 55 %) анаэробного полимерного состава Loctite–660.

3. Разработано новое приспособление, позволяющее жестко закреплять в патроне токарного станка тонкостенную трубчатую заготовку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология машиностроения. В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения / под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 370 с.
2. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность. М.: Машиностроение. 1992. 288 с.

3. Компания DMG MORI (ДМГ МОРИ): сайт. Режим доступа: <https://ru.dmgmori.com/blob/497586/671022a221bb859a4d13455c5db7013d/pegru-ecoline-pdf-data.pdf> (Дата обращения 30.11.2017).
4. Компания «Шпиндель-сервис»: сайт. Режим доступа: http://spindle-service.ru/sm-sp_rep-ger_proc.shtml (дата обращения 30.11.2017).
5. ГОСТ 5272–68. Коррозия металлов. Термины.
6. Компания Loctite (Локтайт): сайт. Режим доступа: <http://www.loctite.ru/product-search-3772.htm?primaryFacet=000000028Z> (дата обращения 01.12.2017).
7. Кононенко, А.С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: автореферат дис. ... доктор техн. наук: 05.20.03 / Кононенко Александр Сергеевич. – М., 2012. – 34 с.
8. Адгезионная прочность герметиков и нанокompозиций на их основе / Кононенко А.С., Гайдар С.М. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2011. № 6. С. 38–42.
9. Адгезионная прочность составов холодного отверждения и нанокompозиций на их основе. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 11. С. 10–14.
10. Компания SKF (СКФ): сайт. Режим доступа: <http://www.skf.com/ru/products/seals/industrial-seals/power-transmission-seals/wear-sleeves/skf-speedi-sleeve/index.html> (дата обращения 04.04.2018).
11. Арбузов Е. В., Жаргалова А. Д., Лазаренко Г. П., Семисалов В. И. К вопросу о деформации тонкостенных деталей при обработке на станках токарной группы // Наука и образование. Электронный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014 – № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/700319.html> (дата обращения 07.01.2018).
12. Кильдеев Т.А., Осипов Т.А. Анализ способов обработки резанием тонкостенных трубчатых заготовок / Т.А. Кильдеев // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные исследования в области технических и технологических систем» (Казань, 15.01.2018 г.). – Уфа: Аэтерна, 2018. – 269 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.
14. Устройство для крепления тонкостенных труб // Патент СССР № 1426703 30.09.1988. Бюл. №36/ Б. С. Хомяк, П. Б. Хомяк, М. С. Хомяк, И. Б. Хомяк.
15. Методические указания. ЕСТПП. Выбор и рациональное применение системы станочных приспособлений. М.: Изд-во стандартов, 1979. 87 с.

Кононенко Александр Сергеевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
доктор технических наук,
профессор кафедры «Технологии
обработки материалов»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская
ул., д. 5, стр. 1
Тел. 8 (926) 147–17–50
E-mail: as-kononeko@yandex.ru

Кильдеев Тимур Анверович
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
студент 4 курса кафедры
«Технологии обработки
материалов»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская
ул., д. 5, стр. 1
Тел. 8 (917) 088–41–13
E-mail: kildeev@mail.ru

Сажасев Александр Анатольевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
доцент кафедры «Технологии
обработки материалов»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская
ул., д. 5, стр. 1
Тел. 8 (916) 708–13–76
E-mail: alexsaz1@yandex.ru

A.S. KONONENKO, T.A. KILDEEV, A.A. SAZHAEV

RESTORING THE SEATING SURFACES OF THE DMG MORI CTX 510 ECOLINE SPINDLE WITH POLYMERIC NANOCOMPOSITIONS

Abstract. *Due to the fact that a significant part of the Russian machine tools market is occupied by foreign manufacturers, maintenance of machine tools and the purchase of spare parts for them are costly for the customers. Therefore, the current task is to reduce the cost and to simplify the recovery processes of worn out machine components and parts, in particular spindles. Specialists of the customer service center of DMG MORI Russia note that the cases of failure of the spindle unit due to wear of the spindle are quite rare, so it is irrational to use the technologies of surfacing and sputtering, due to the need in special equipment. The authors of the article proposed a method for restoring the surfaces of the spindle by nano-filled anaerobic compositions. This technology is easy to use, does not require expensive equipment, fretting wear of mating surfaces is excluded. In addition, researches showed that the modification of the polymer composition by nanoparticles leads to a significant improvement in its mechanical and operational characteristics. The proposed method can be used as an independent repair method, as well as in combination with the use of an additional repair part — a thin-walled compensation sleeve. In this connection, the article touches upon the issue of machining thin-walled details. The turning of such details encounters difficulties due to their deformation under the action of cutting and fastening forces [1].*

Keywords: *spindle unit, spindle, fretting wear, thin-walled bushing, anaerobic adhesive, nanofillers, strength, vibration resistance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Tekhnologiya mashinostroeniya. V 2 t. T.1. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya / pod red. A.M. Dalskogo. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1999. 370 s.
2. Push A.V. Shpindelnye uzly: Kachestvo i nadezhnost. M.: Mashinostroenie. 1992. 288 s.
3. Kompaniya DMG MORI (DMG MORI): sajt. Rezhim dostupa: <https://ru.dmgmori.com/blob/497586/671022a221bb859a4d13455c5db7013d/pegru-ecoline-pdf-data.pdf> (Data obrashcheniya 30.11.2017).
4. Kompaniya «Shpindel-servis»: sajt. Rezhim dostupa: http://spindle-service.ru/sm-sp_rep-rep_proc.shtml (data obrashcheniya 30.11.2017).
5. GOST 5272–68. Korroziya metallov. Terminy.
6. Kompaniya Loctite (Loktajt): sajt. Rezhim dostupa: <http://www.loctite.ru/product-search-3772.htm?primaryFacet=000000028Z> (data obrashcheniya 01.12.2017).
7. Kononenko, A.S. Povyshenie nadezhnosti nepodviznykh flancevyyh soedinenij selskohozyajstvennoj tekhniki ispolzovaniem nanostrukturirovannyh germetikov: avtoreferat dis. ... doktor tekhn. nauk: 05.20.03 / Kononenko Aleksandr Sergeevich. – M., 2012. – 34 s.
8. Adgezionnaya prochnost germetikov i nanokompozicij na ih osnove / Kononenko A.S., Gajdar S.M. // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2011. № 6. S. 38–42.
9. Adgezionnaya prochnost sostavov holodnogo otverzhdeniya i nanokompozicij na ih osnove. Kononenko A.S., Dmitrav K.G. // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2016. № 11. S. 10–14.
10. Kompaniya SKF (SKF): sajt. Rezhim dostupa: <http://www.skf.com/ru/products/seals/industrial-seals/power-transmission-seals/wear-sleeves/skf-speedi-sleeve/index.html> (data obrashcheniya 04.04.2018).
11. Arbuzov E. V., Zhargalova A. D., Lazarenko G. P., Semisalov V. I. K voprosu o deformacii tonkostennykh detalej pri obrabotke na stankah tokarnoj gruppy// Nauka i obrazovanie. Elektronnyj zhurnal MGTU im. N. E.H. Baumana. 2014 – № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/700319.html> (data obrashcheniya 07.01.2018).
12. Kildeev T.A., Osipov T.A. Analiz sposobov obrabotki rezaniem tonkostennykh trubchatykh zagotovok / T.A. Kildeev // Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchnye issledovaniya v oblasti tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem» (Kazan, 15.01.2018 g.). – Ufa: Aeterna, 2018. – 269 s.
13. Spravochnik tekhnologa–mashinostroitelja. V 2–h t. T. 2/Pod red. A. G. Kosilovoj i R. K. Meshcheryakova. – 4–e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1986. 656 s., il.
14. Ustrojstvo dlya krepleniya tonkostennykh trub // Patent SSSR № 1426703 30.09.1988. Byul. №36/ B. S. Homyak, P. B. Homyak, M. S. Homyak, I. B. Homyak.
15. Metodicheskie ukazaniya. ESTPP. Vybor i racionalnoe primenenie sistemy stanochnykh prispособlenij. M.: Izd-vo standartov, 1979. 87 s.

Kononenko Alexander Sergeevich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow
Doctor of Science, Professor of
«Materials Processing Technologies»
department
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya
St., Bldg. 5, Block 1
Tel. 8 (926) 147–17–50
E-mail: as-kononeko@yandex.ru

Kildeev Timur Anverovich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow
4th year student of «Materials
Processing Technologies» department
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya
St., Bldg. 5, Block 1
Tel. 8 (917) 088–41–13
E-mail: kildeevt@mail.ru

Sazhaev Alexander Anatolievich
Bauman Moscow State Technical
University, Moscow
Associate Professor of «Materials
Processing Technologies» department
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya
St., Bldg. 5, Block 1
Tel. 8 (916) 708–13–76
E-mail: alexsazh1@yandex.ru

УДК 621.9

А.Д. НОВИКОВ, Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, К.Ф. СЕЛЕМЕНЕВ

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ НАНЕСЕНИИ НАНОПОКРЫТИЙ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения долговечности и надежности инструмента при нанесении нанопокровтий. Установлено, что этиламирование рабочих поверхностей инструмента существенно изменяет характер сопротивления адгезионному взаимодействию. Отмечено, что задиры на контактирующей поверхности инструмента являются следствием абразивного износа и проявляются в виде глубоких царапин.

Ключевые слова: износ, этиламы, технология, эффективность ПДД.

Введение

Повышение качества, надежности и долговечности изделий авиационной техники, судостроения, энергосиловых установок на протяжении многих десятилетий и в настоящее время является важной народнохозяйственной проблемой, над которой работают многие специалисты в нашей стране и за рубежом. Эта проблема стала особенно актуальной в связи с созданием новых поколений вертолетов, самолетов, судов, двигателей и обострившейся конкуренцией на мировом рынке. В конструкции упомянутых типов изделий входят группы высоконагруженных деталей, надежность и долговечность которых, в значительной мере определяет ресурс работы и надежность всего изделия. Значительное количество такого рода деталей имеют сложную форму, большие размеры, ограниченную жесткость и высокие требования к параметрам качества поверхности и поверхностного слоя.

Характерным примером такого типа деталей являются: лонжерон лопасти несущего винта вертолета, элементы крыла и фюзеляжа (панели) самолета и другие детали.

Указанные детали в зависимости от типа изделия и его назначения имеют различные конструктивные формы и размеры, изготавливаются, как правило из конструкционных легированных сталей, алюминиевых сплавов.

К качеству поверхности предъявляются высокие требования, обусловленные тяжелыми условиями эксплуатации – высокий уровень знакопеременных нагрузок, высокие скорость и контактные нагрузки, колебания температурного градиента, коррозионные и эрозионные процессы. В этой связи шероховатость поверхности ограничивается – $Ra=0,5\div1,25$ мкм, оговаривается структура и направленность микрорельефа; поверхностный слой подвергается упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД). Отмеченные особенности требуют нетрадиционного подхода к решению технологических задач упрочняющей обработки: разработке и совершенствованию методов виброударного воздействия, новых технологических схем виброударной обработки деталей рассматриваемого класса, применение нанопокровтий рабочих органов инструментальных поверхностей.

Основная часть

Центробежная обработка (ЦО) является одним из упрочняющих динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Этот метод применяют для повышения усталостной прочности деталей машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

К основным преимуществам ЦО относятся: высокая интенсивность обработки, простое по конструкции оборудование, возможность обработки длинномерных малогабаритных изделий сложной формы, большая энергия воздействия на поверхность детали, что позволяет получать высокую степень упрочнения для стальных деталей.

Процесс упрочнения центробежным способом не изменяет геометрической формы детали, поэтому не требуется специального припуска на обработку. От чистоты исходной поверхности зависит поверхностная твердость. В случае грубо подготовленной поверхности гребешки препятствуют ударному воздействию шариков на основной слой металла.

Смазка вводится в зону контакта во время обработки и фиксируется там за счет молекулярно–поверхностных сил масла и материала детали и инструмента. При миграции масла его запас в месте контакта становится недостаточным для обеспечения стойкости инструмента.

Поверхностная энергия твердых тел велика – порядка $500\text{--}5000\text{ мД/м}^2$, а поверхностное натяжение жидкостей в 10–100 раз меньше. Поэтому для предотвращения растекания жидкостей по твердому телу следует, как бы снизить поверхностное натяжение твердого тела, поместив между жидкостью и твердым телом какую–то прослойку – пленку, поверхностное натяжение которой близко к поверхностной энергии жидкости.

Эпиламирование – это процесс осаждения ПАВ на твердую поверхность. Характер адсорбции и ориентация осажденных молекул определяется взаимодействием адсорбционных центров поверхности с активными центрами молекул. Пространственное расположение адсорбированных молекул зависит от их полярности и условий осаждения и может быть как вертикальным, так и горизонтальным или может образовывать любой угол с твердой поверхностью.

Эпиламирование предполагает образование на поверхности твердого тела мультимолекулярных слоев с регулярно ориентированными молекулами. Степень ориентации и толщина ориентированного слоя зависят от природы твердого тела и молекул ПАВ. Так, пределах гомологического ряда жирных кислот степень ориентации возрастает с увеличением длины цепи молекулы.

Одним из самых перспективных направлений повышения эффективности ППД представляется разработка и применение смазочно – охлаждающих технологических сред (СОТС) и поверхностно – активных веществ (ПАВ) для обеспечения благоприятных условий эксплуатации инструмента и повышения качества обрабатываемых поверхностей.

Действие СОТС направлено на уменьшение работы сил трения и адгезии между инструментальным и обрабатываемым материалом, их охлаждение в процессе обработки, повышение качества обработанной поверхности, снижение энергозатрат и увеличение производительности обработки. Технологическая эффективность зависит от смазочного, охлаждающего, моющего, диспергирующего и демпфирующего, пластифицирующего действия СОТС, которые определяются составом и свойствами, технологией и техникой ее применения. Улучшение шероховатости поверхности, обработанной в присутствии СОТС, объясняется уменьшением интенсивности трения и пластифицирующим действием поверхностно–активных компонентов СОТС. Особенно это важно в процессе подачи инструмента при ППД, когда в точке деформации возникают высокие касательные напряжения снижающие стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

Одним из наиболее эффективных путей удержания смазки на поверхности, является нанесение на нее нанопленки эпилама, которая посредством энергетических карманов и удерживает СОТС. Эпиламы обладают столь необычными свойствами, что вызывают устойчивый интерес исследователей во всем мире. Термин «эпилам» появился в 30–е годы XX века и определяет составы, которые наносятся на твердые поверхности трибосопряжений для удержания смазки в зоне трения. Эпиламы впервые были предложены швейцарцем П. Воогом для обработки часовых деталей.

Воогом было предложено модифицирование твердой поверхности деталей слоем вещества с низкой поверхностной энергией и запатентован процесс, в котором раствор олеиновой или стеариновой кислоты в летучем растворителе использовался для обработки твердых поверхностей. Однако, такие растворы имели ряд недостатков: низкую временную стабильность (не более 3 месяцев), низкую температуру деструкции (не более 50°C) и др.

Триботехнологические свойства эпиламированных поверхностей, способы управления их характеристиками и механизм действия эпиламов до настоящего времени все еще изучены недостаточно. Данные ряда публикаций противоречивы, что является следствием неполного понимания природы и механизмов действия эпиламов. Весьма ограничены сведения о возможностях использования нанопленок эпиламов в целях повышения эффективности механической обработки материалов.

Эпиламирование предполагает образование на поверхности твердого тела мультимолекулярных слоев с регулярно ориентированными молекулами. Степень

ориентации и толщина ориентированного слоя зависят от природы твердого тела и молекул ПАВ. В пределах гомологического ряда осаждения молекул на поверхности степень ориентации возрастает с увеличением длины молекул эпилама.

Поверхность металлической основы изделия обладает ориентирующим влиянием из-за наличия приповерхностного электрического поля с напряженностью $E \sim 10^9 \text{ В/м}$ – для каждого конкретного материала эта величина может быть оценена физическими методами [1, 2]. При соединении материала покрытия с основой его атомы или молекулы продолжают атомную решетку, структуру основы. При этом они приобретают ориентацию, не свойственную их ориентации в структуре материала, вдали от поверхности адгезионного контакта. Это равносильно тому, что те же атомы оказываются повернутыми ориентирующим полем материала основы распределенными вдоль поверхности контакта моментами на определенный угол ω , совершающими при этом работу против внутренних сил и моментов материала покрытия. Из-за этого в этом материале, даже в отсутствии внешних воздействий в поверхностном слое, развивается напряженное состояние, концентрируется определенная энергия Δ упругих деформаций. С учетом этих причин выражение имеет вид:

$$\frac{h\tau_{\max}^2}{2\mu} + \Delta = F_a. \quad (1)$$

где $\tau_{\max}$ – допустимое касательное напряжение,
 h – толщина покрытия;
 μ – параметр Ламэ;
 F_a – энергия адгезии.

Тогда при оценке допустимого касательного напряжения $\tau_{\max}$ оказывается справедливо неравенство:

$$\tau_{\max}^* = \sqrt{\frac{2\mu(F_a - \Delta)}{h}} < \tau_{\max} = \sqrt{\frac{2\mu F_a}{h}}. \quad (2)$$

Это неравенство свидетельствует о том, что расчет, основанный на классических представлениях об упругих свойствах поверхностного слоя материала, приводит к завышенным значениям допустимых касательных напряжений.

Для оценки величин μ и Δ предлагается использовать микрополярную теорию упругости. В ее основе лежит представление о том, что частица сплошной упругой среды обладает не тремя, как в классическом случае, а шестью степенями свободы. Соответственно для описания ее движения используется вектор перемещения $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$ и вектор малого угла поворота $\vec{\omega}(\vec{r})$ ($\vec{r}$ – радиус вектор центра масс частицы).

Выражение для вычисления объемной плотности энергии упругих деформаций w согласно этой модели можно представить в виде:

$$w = \frac{\mu + \alpha}{2} \gamma_{ij} \gamma_{ij} + \frac{\mu - \alpha}{2} \gamma_{ij} \gamma_{ji} + \frac{\lambda}{2} \gamma_{kk} \gamma_{nn} + \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \kappa_{ij} \kappa_{ij} + \frac{\gamma - \varepsilon}{2} \kappa_{ij} \kappa_{ji} + \frac{\beta}{2} \kappa_{kk} \kappa_{nn}. \quad (3)$$

где λ, μ – классические константы, коэффициенты Ламэ;

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ – дополнительные константы, нуждающиеся в экспериментальном или теоретическом (на основании физических соображений) определении;

$\gamma_{ij} = u_{i,j} - \epsilon_{kji} \omega_k$; $\kappa_{ij} = \omega_{i,j}$ – тензоры деформаций материала (ϵ_{kji} – трехиндексный символ Леви–Чивита;

индекс после запятой означает дифференцирование по координате с соответствующим номером;

u_i, ω_i – компоненты векторов $\vec{u}, \vec{\omega}$ в ортонормированном базисе $\vec{e}_i$ декартовой системы координат x_i).

В выражении (3) осуществляется суммирование по повторяющемуся индексу.

Учитывая, что внутренние напряжения σ_{ij} и моменты μ_{ij} при постоянной температуре

выражаются через тензоры деформаций с помощью соотношений

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \gamma_{ij}} = 2\mu \gamma_{(ij)} + 2\alpha \gamma_{\langle ij \rangle} + \lambda \gamma_{kk} \delta_{ij}, \quad (4)$$

$$\mu_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \kappa_{ij}} = 2\gamma \kappa_{(ij)} + 2\varepsilon \kappa_{\langle ij \rangle} + \beta \kappa_{kk} \delta_{ij}, \quad (5)$$

для объемной плотности энергии упругих деформаций w можно получить выражение:

$$w = \mu^* \sigma_{(ij)} \sigma_{(ij)} + \alpha^* \sigma_{\langle ij \rangle} \sigma_{\langle ij \rangle} + \frac{\lambda^*}{2} \sigma_{kk} \sigma_{nn} + \gamma^* \mu_{(ij)} \mu_{(ij)} + \varepsilon^* \mu_{\langle ij \rangle} \mu_{\langle ij \rangle} + \frac{\beta^*}{2} \mu_{kk} \mu_{nn}. \quad (6)$$

В выражениях (4) – (6) круглые скобки означают симметричную часть, а угловые – антисимметричную часть соответствующего тензора; δ_{ij} – символ Кронекера;

$$\mu^* = \frac{1}{4\mu}; \quad \alpha^* = \frac{1}{4\alpha}; \quad \gamma^* = \frac{1}{4\gamma}; \quad \varepsilon^* = \frac{1}{4\varepsilon}; \quad (7)$$

$$\lambda^* = -\frac{\lambda}{6\mu K}; \quad \beta^* = -\frac{\beta}{6\gamma \Omega}; \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu; \quad \Omega = \beta + \frac{2}{3}\gamma. \quad (8)$$

В выражении (6) первое слагаемое полностью соответствует классическим представлениям об объемной плотности энергии упругих деформаций. Далее, при оценке роли суммы остальных слагаемых, полагаем, что напряжения $\sigma_{(ij)}$ совпадают со своими классическими значениями.

В случае плоского сдвига, представляющего интерес при рассмотрении затронутой в данной работе проблемы, векторы перемещений и микровращений приобретают вид:

$$\vec{u} = (u_1(x_2), 0, 0); \quad \vec{\omega} = (0, 0, \omega_3(x_2)). \quad (9)$$

При этом ось Ox_1 направлена вдоль плоскости контакта покрытия и основы в направлении действия параллельного ей касательного напряжения $\tau \equiv \tau_1$. Ось Ox_2 направлена перпендикулярно плоскости контакта. Сдвиг происходит в плоскости $x_1 Ox_2$. В результате в рассмотрении оказываются лишь следующие величины:

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= u_{1,2} + \omega_3; \quad \kappa_{32} = \omega_{3,2}; \\ \gamma_{(12)} &= \frac{1}{2} u_{1,2}; \quad \gamma_{\langle 12 \rangle} = \frac{1}{2} u_{1,2} + \omega_3; \\ \kappa_{(32)} &= \frac{1}{2} \omega_{3,2}; \quad \kappa_{\langle 23 \rangle} = \frac{1}{2} \omega_{3,2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения равновесия в напряжениях в рамках рассматриваемой модели среды имеют в общем случае вид:

$$\sigma_{ij,i} = 0; \quad \mu_{ij,i} + \varepsilon_{ijk} \sigma_{ik} = 0. \quad (11)$$

В рассматриваемом плоском случае чистого сдвига на основании (11), записав при этом второе уравнение в перемещениях, можно получить:

$$\sigma_{21,2} = 0; \quad (\gamma + \varepsilon) \omega_{3,22} + 2\alpha u_{1,2} - 4\alpha \omega_3 = 0. \quad (12)$$

Краевыми условиями для них являются соотношения:

$$\sigma_{21}(h) = \tau; \quad \mu_{23}(h) = 0; \quad u_1(0) = 0; \quad \omega_3(0) = \omega^0 \quad (13)$$

Первое уравнение системы (12) с учетом первого из краевых условий (13) дает основание считать, что, как и при использовании классической модели линейно-упругой среды, в рамках рассматриваемой модели касательное напряжение, сдвигающее покрытие, распределено по его толщине h равномерно и равно действующему сдвиговому напряжению на поверхности.

$$\sigma_{21} = \tau. \quad (14)$$

Этот результат, а также соотношения (4) и (5), связывающие внутренние напряжения

и деформации, и последнее из соотношений (6) позволяют сделать вывод о том, что распределения перемещений $u_1(x_2)$ и поворотов $\omega_3(x_2)$, а также их производных по толщине покрытия отличны от нуля. На основании (8) и (9) с учетом (10) этот вывод приводит к утверждению о том, что энергию упругих деформации W , сосредоточенную под единицей площади поверхности покрытия, можно записать в виде:

$$W = \frac{h\tau^2}{2\mu} + \frac{\alpha}{2} \int_0^h \left(\frac{1}{2} u_{1,2}(x_2) + \omega_3(x_2) \right)^2 dx_2 + \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \int_0^h (\omega_{3,2}(x_2))^2 dx_2 \quad (15)$$

Сравнивая его с левой частью равенства (3) можно убедиться, что

$$\Delta = \frac{\alpha}{2} \int_0^h \left(\frac{1}{2} u_{1,2}(x_2) + \omega_3(x_2) \right)^2 dx_2 + \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \int_0^h (\omega_{3,2}(x_2))^2 dx_2 \quad (16)$$

Видно, что классическая оценка энергии адгезии меньше по сравнению с той, которую можно делать, приравняв (15) величине F_a . Очевидно, при достаточно больших значениях α и $\gamma + \varepsilon$ классическими оценками $\tau_{\max}$ пользоваться нельзя.

В работе для значений напряженности $E \sim 10^9$ В/м сделаны оценки: $\alpha \approx 10^8$ н/м²; $\gamma + \varepsilon \approx 10^6$ Дж/м. Для покрытия с толщиной $h \approx 10^{-4}$ м, $u_1 \approx 10^{-6}$ м, $\omega \approx 10^{-3}$ рад значение величины Δ может оказаться соизмеримым с величиной F_a , имеющей порядок $1 \text{ Аэ} / \text{н}^2$. (При оценке величины Δ учитывалось, что подинтегральная функция имеет порядок своего среднего значения, равного полусумме ее крайних значений, а производная – отношения среднего значения к толщине покрытия). Поэтому расчет $\tau_{\max}$ на основании классических представлений может привести к значительным погрешностям. Это подтверждает необходимость учета изложенных выше взглядов при расчете режимов резания инструментами с покрытиями.

Современные эпиламы – высоко эффективные средства регулирования смачивания, и если в узле трения часть контактирующих поверхностей эпиламирована, а часть неэпиламирована, то масло будет стремиться собраться на неэпиламированном участке. В зоне контакта трущихся тел эпилам стирается и масло стремится собраться на этом участке поверхности. На прилегающих участках эпилам сохраняется и служит барьером, предотвращающим растекание масла.

Поверхностное натяжение масел составляет величину в пределах 20 – 40 эрг/см². Механизм растекания некоторых смазочных жидкостей имеет сложный характер: сначала растекается тонкий граничный слой, который, ориентируясь под действием силового поля твердого тела, создает поверхность низкой энергии. На этой поверхности остальная масса не растекается. Однако в настоящее время созданы масла с низкой поверхностной энергией, не обладающие способностью образовывать граничные слои. Поэтому для предотвращения растекания таких масел необходимо понизить поверхностную энергию твердых поверхностей. Это достигается тем, что на поверхности твердых тел создаются слои ориентированных молекул, радикально меняющих энергетические свойства поверхности. При этом резко меняются условия смачивания и краевой угол смачивания капли жидкости на такой поверхности растет.

При эксплуатации инструмента с применением СОТС, формируется многослойное покрытие, представляющее собой нано пленку эпилама, удерживающую пленку СОТС.

Основной эффект от нанесения тонкой пленки эпилама на рабочую поверхность инструмента заключается в удержании масла в зоне контакта, снижении коэффициента трения, длительного сохранения работоспособности. Дополнительным преимуществом работы эпиламированным инструментом является адсорбционное снижение прочности обрабатываемого материала, увеличение пластифицирующего действия СОТС, уменьшение сил деформации вследствие проявления эффекта Ребиндера.

Стойкость упрочнителя рассматривалась с позиции трех составляющих:

- размерная стойкость сепаратора,
- износ инструментальной среды,

– размерная стойкость внутренней обоймы упрочнителя.

Упрочнители данного типа относятся к группе специальных инструментов центробежно – ударного действия. При этом инструментальная среда находится на периферии вращающегося инструмента и удерживается сепаратором. При взаимодействии с обрабатываемой деталью (лонжероном) происходит отскок шарика от сепаратора и удар о внутреннюю обойму упрочнителя.

Соответственно надо рассматривать несколько процессов влияния эпиламов на размерную стойкость упрочнителя:

– способность эпиламированной инструментальной среды сопротивляться ударным нагрузкам, т.е. сохранять размерную стойкость обоймы,

– способность эпиламов влиять на процесс пластической деформации за счет удержания смазки в зоне резания, соответственно приводящих к уменьшению технологических дефектов инструментальной среды, как микротрещины, отдельные царапины, риски, вмятины, и др.,

– способность эпиламов снижать интенсивность контактного взаимодействия инструментальной среды с поверхностью сепаратора, т.е. сохранять размерную стойкость сепаратора;

Анализ экспериментальных данных показал, что наибольший износ обоймы упрочнителя наблюдался в зоне без обработки эпиламирующими составами. Положительное влияние на величину износа обоймы наблюдалось при обработке эпилами инструментальной среды. Наибольший эффект по стойкости был достигнут при нанесении покрытий на инструментальную среду и сепаратор. По оси ординат – размер отпечатка шара на обойме (d , мм), по оси абсцисс – положение шара в сепараторе. Испытания проводились в течение 60 часов.

Нанесенное покрытие эпилама в данном случае выполняет роль граничной смазки, способствует удержанию масла в зоне ударных нагрузок. При этом технологическая эффективность масла в зоне ударных нагрузок реализуется через ее функциональные действия – смазочное, демпфирующее, пластифицирующее.

При контактном взаимодействии инструментальной среды и сепаратора происходит изнашивание поверхностей под действием трения и ударных нагрузок. Результатом изнашивания является износ – изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок, либо разрушения (изнашивания) поверхностного слоя при трении.

В результате изнашивания изменяются размеры инструментальной среды и сепаратора, увеличиваются зазоры между трущимися поверхностями, вызывающие биение и стук.

Для снижения напряжений в точке контакта при вибрационной обработке необходимо использование масляных СОТС. Наличие смазки в зоне контакта оказывает пластифицирующее влияние, а так же способствует уменьшению силы трения в зоне контакта инструментальной среды и сепаратора.

Наличие пленки на рабочих поверхностях инструментальной среды и сепаратора способствует проникновению и удержанию масла в зоне контакта. В результате нарушения целостности покрытия эпиламов, происходит образование энергетических барьерных участков, препятствующих удалению масла из зоны трения, что способствует снижению сил трения и адгезии в зоне контакта.

Из анализа экспериментальных данных можно выделить несколько видов износа. Для инструментальной среды это:

- усталостное разрушение и выкрашивание поверхности;
- натирь;
- мелкие царапины;
- задиры

Характерной особенностью является то, что при покрытии эпиламирующими составами 6СФК – 180 – 05 и ЭФРЕН – 2 только инструментальной среды показатели по дефектам выше в процентном отношении к показателям когда происходило эпиламирование инструментальной среды и поверхности сепаратора, что говорит об образовании участков с

большой поверхностной энергией и удержании масла на поверхности не только инструментальной среды, но и на поверхности сепаратора.

В результате контакта инструментальной среды и сепаратора возникают большие ударные нагрузки на поверхность сепаратора приводящие к износу. Можно выделить два вида изнашивания:

- механическое изнашивание, характеризующееся энергией удара инструментальной среды по поверхности сепаратора. В зависимости от геометрических параметров, материала сопрягаемых поверхностей, а также свойств инструментальной среды и технологических факторов, энергия удара различным образом распределяется между инструментальной средой и поверхностью сепаратора.

- абразивное изнашивание, происходящее в результате режущего или царапающего действия твердых тел (инструментальной среды и поверхности сепаратора). Такое изнашивание возникает при большом давлении в поверхностном слое контактирующих поверхностей и недостаточностью доступа смазочной среды (масла) в зону контакта.

Наличие пленки на рабочих поверхностях инструментальной среды и сепаратора способствует проникновению и удержанию масла в зоне контакта. В результате нарушения целостности покрытия эпиламов, происходит образование энергетических барьерных участков, препятствующих удалению масла из зоны трения, что способствует снижению сил трения и адгезии в зоне контакта, при этом п. 3 технологическая эффективность масла в зоне ударных нагрузок реализуется через ее функциональные действия – смазочное, демпфирующее, пластифицирующее.

Наименьший износ поверхности сепаратора наблюдался при эпиламировании инструментальной среды и поверхности сепаратора эпиламом и ЭФРЕН – 2.

Следует отметить общее снижение диаметральной величины разброса отверстий сепаратора в 1,2 раза, связанное со снижением шероховатости поверхностей трения (инструментальной среды и поверхности сепаратора), уменьшению количества неровностей H_{0max} и H_{max} , которые деформируются в процессе работы трибосопряжения при нанесении покрытий эпиламов (6СФК – 180 – 05, ЭФРЕН – 2).

Заключение

- Эпиламирование рабочих поверхностей инструмента существенно изменяет характер сопротивления адгезионному взаимодействию, эффективность которого в значительной степени повышается при применении СОТС (смазочно–охлаждающих технологических сред).

- Анализ экспериментальных данных подтверждает теоретические положения, что при использовании эпилирующих покрытий количество дефектной инструментальной среды резко снижается. Так при эпиламировании инструментальной среды и поверхности сепаратора эпилами 6СФК – 180 – 05 и ЭФРЕН – 2 усталостного разрушения и выкрашивания не наблюдалось. Вместе с тем при анализе рабочих поверхностей инструмента в производственных условиях данные дефекты составляли 5,2%. При обработке эпиламом ЭФРЕН–2 покрытий натиры на поверхности инструмента составили 2,6% что в 2 раза ниже полученных при производственных испытаниях – 4,3% и необработанной экспериментальной среды – 5,3% соответственно.

- Задир на контактирующей поверхности инструмента являются следствием абразивного износа и проявляются в виде глубоких царапин. У неэпилированной инструментальной среды и поверхности сепаратора процент износа составляет 78,9% (экспериментальные данные) и 87,9% соответственно (производственные испытания). При обработке эпиламом 6СФК–180 – 05 (инструментальная среда и поверхность сепаратора) количество данного вида дефектов снизилось в 3 раза и составило 21%, а при использовании эпилама ЭФРЕН – 2 (поверхность шариков и сепаратора) процент задилов составил 7, 9%, что говорит о снижении общих дефектов более чем в 7 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шоркин В. С. Теоретическая оценка адгезионных свойств покрытий режущего инструмента // Шоркин В. С., Фроленкова Л. Ю. Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 8. С. 22. 25.

2. Шоркин В. С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // Шоркин В. С., Фроленкова Л. Ю., Азаров А. С. «Материаловедение». – 2011. – № 2. – С. 2 – 7.

3. Киричек А.В. Влияние эпиламов (ПАВ) на физико – технические свойства инструментов при низкоскоростной механической обработке // Киричек А.В., Селеменев М.Ф., Селеменова О.В. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» №2 (322), ОГУ имени И.С.Тургенева, 2017г. С.– 85–96

4. Бабичев А.П., Формирование вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена. // Бабичев А.П., Иванов В.В., Селеменев М.Ф., Марченко Ю.В. Известия Орел ГТУ «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», № 2 (286) Орел. 2011.

5. Иванов В.В. Формирование вибрационных механохимических покрытий на основе дисульфида молибдена // Иванов В.В., Селеменев М.Ф., Марченко Ю.В. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №2. – С. 73–78.

Новиков Александр Дмитриевич
ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С.
Тургенева, г.Орел
Магистр кафедры
«Машиностроения»
Тел 89103033373,
E-mail: sasha.waw@mail.ru

Фроленкова Лариса Юрьевна
ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С.
Тургенева, г.Орел
Доктор технических наук,
профессор кафедры
«Машиностроения»
Тел 89103017320,
E-mail: larafrlenkova@yandex.ru

Селеменев Константин Федорович
ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический
университет», г.Брянск
Инженер, заведующий лабораторией
Тел (4832) 58 83 32,
E-mail: Selkostik@yandex.ru

A.D. NOVIKOV, L.Yu. FROLENKOVA, K.F. SELEMENEV

INCREASE OF WEAR-RESISTANCE OF THE WORKING SURFACES OF THE TOOL AT APPLICATION OF NANO-COATINGS

Abstract. *The article deals with the issues of increasing the durability and reliability of the tool when applying nanocoatings. It is established that epilamination of the working surfaces of the tool significantly changes the character of the resistance to adhesion interaction. It is noted that scuffs on the contacting surface of the tool are a consequence of abrasive wear and appear as deep scratches.*

Keywords: *depreciation, epilamy, technology, SDA efficiency..*

BIBLIOGRAPHY

1. Shorkin V. S. Teoreticheskaya otsenka adgezionnykh svoystv pokrytiy rezhushchego instrumenta // Shorkin V. S., Frolenkova L. YU. Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2012. – № 8. S. 22. 25.

2. Shorkin V. S. Uchet vliyaniya troynogo vzaimodeystviya chastits sredy na poverkhnostnyye i adgezionnyye svoystva tverdykh tel // Shorkin V. S., Frolenkova L. YU., Azarov A. S. «Materialovedeniye». – 2011. – № 2. – С. 2 – 7.

3. Kirichek A.V. Vliyaniye epilamov (PAV) na fiziko – tekhnicheskiye svoystva instrumentov pri nizkoskorostnoy mekhanicheskoy obrabotke // Kirichek A.V., Selemeney M.F., Selemeney O.V. «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii» №2 (322), OGU imeni I.S.Turgeneva, 2017g. S.– 85–96

4. Babichev A.P., Formirovaniye vibratsionnykh mekhanokhimicheskikh tverdostmazochnykh pokrytiy na osnove disulfida molibdena. // Babichev A.P., Ivanov V.V., Selemeney M.F., Marchenko YU.V. Izvestiya Orel GTU «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii», № 2 (286) Orel. 2011.

5. Ivanov V.V. Formirovaniye vibratsionnykh mekhanokhimicheskikh pokrytiy na osnove disulfida molibdena // Ivanov V.V., Selemeney M.F., Marchenko YU.V. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – №2. – С. 73–78.

Novikov Aleksandr Dmitriyevich
Orel State University named after I.S.
Turgenev, the city of Orel
Master of the Department of
Mechanical Engineering
Tel. 89103033373
E-mail: sasha.waw@mail.ru

Frolenkova Larisa Yurevna
Orel State University named after I.S.
Turgenev, the city of Orel
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of
Mechanical Engineering
Tel. 89103017320,
E-mail: larafrlenkova@yandex.ru

Selemeney Konstantin Fedorovich
FGBOU VO «Bryansk State
Technical University», the city of
Bryansk
Engineer, Head of Laboratory
Tel. (4832) 58 83 32
E-mail: Selkostik@yandex.ru

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 621.822

А.Ю. КОРНЕЕВ, А.В. СЫТИН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В КОНИЧЕСКОМ ЛЕПЕСТКОВОМ ПОДШИПНИКЕ

Аннотация. Предложена математическая модель расчета турбулентного течения смазочного материала в коническом лепестковом подшипнике. Представлены расчетные схемы подшипника и лепестка, функция зазора в смазочном слое подшипника, уравнения Рейнольдса и баланса расходов. Описаны преимущества данного типа опор.

Ключевые слова: конический лепестковый подшипник, турбулентность, лепесток, уравнение Рейнольдса, уравнение баланса расходов.

Введение.

Повышение производительности механической обработки, сжатия и перемещения жидкостей и газов, развитие областей материаловедения, управляющего электрооборудования, мехатроники и робототехники обуславливает рост частот вращения рабочих органов, предъявляя повышенные требования к роторно–опорным узлам. Стандартная компоновка высокоскоростного роторного агрегата предусматривает наличие двух радиальных и одного/двух осевых подшипников, что влечет дополнительные требования к точности изготовления, шероховатости поверхности, материалу деталей и чистоте смазочного материала. Снижение массогабаритных характеристик, особенно важное для нестационарных роторных агрегатов, достигается заменой всех подшипников едиными радиально–упорными узлами, среди которых особое место занимают конические подшипники, характеризующиеся широким диапазоном параметров, а также конструктивно задаваемым соотношением воспринимаемых радиальных и осевых нагрузок в рамках одного опорного узла. Повышение частот вращения предполагает закритическую рабочую зону с минимальными потерями при переходе критических частот. Демпфирование возникающих колебаний происходит непосредственно в смазочном слое подшипника скольжения, однако этого бывает недостаточно, в результате чего возможны соударения цапфы вала и втулки, сопровождаемое возникновением трещин, выкрашиванием поверхности с последующим разрушением или заклиниванием опоры из-за заполнения зазора осколками контактирующих деталей. Решением данной проблемы является применением упругих элементов в виде демпферов или непосредственно формирующих рабочую поверхность наборов тонкостенных металлических лепестков [1].

Основная часть.

Для лепестковых подшипников скольжения независимо от применяемого смазочного материала податливость элементов является необходимым условием работы, причем упругие деформации элементов могут иметь тот же порядок величины, что и толщина смазочной пленки. Конструкции конических лепестковых подшипников могут иметь различное количество упругих элементов, расположенных внахлест друг на друга, образуя тем самым податливую многоклиновую рабочую поверхность (рисунок 1).

Типовые конструкции лепестковых подшипников скольжения в режиме пуска и останова обладают повышенным износом упругих элементов, приводящему к истиранию поверхностного слоя, резкому повышению температуры, нарушению целостности лепестков и провалам в поле давлений. Минимизация износа, в совокупности с нанесением дополнительных твердых износостойких покрытий [3], достигается:

– применением комбинированных опор, включающих подшипники качения, скольжения, электромагнитные узлы;

- применением систем подачи смазочного материала под давлением в рабочую зону;
- применением дополнительных механических или мехатронных систем разгрузки в периоды пуска, останова и при аварийных режимах работы.

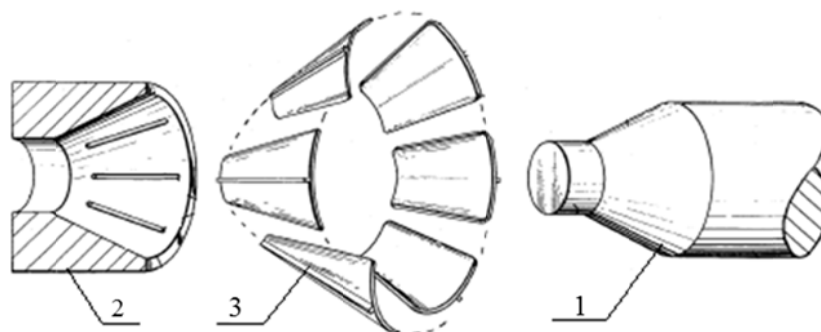


Рисунок 1 – Схема конического лепесткового газодинамического подшипника:
1 – ротор, 2 – корпус подшипника, 3 – лепестки

Наиболее интересным и значимым способом обеспечения повышенной износостойкости контактирующих элементов роторно–опорной системы является использование технических компонентов для создания наддува смазочного материала в рабочую зону. Такие конструктивные решения позволяют сформировать область гарантированного избыточного давления смазочного материала в момент старта и останова ротора, а также корректировать его положение во время работы, варьируя жесткостью смазочного слоя. До момента начала вращения ротор всплывает во втулке лепесткового газового подшипника за счет газостатического давления, и, только после этого, начинает раскручиваться, выходить на заявленную частоту вращения. Останов вала роторной машины происходит в обратном порядке. Для наглядного понимания работы роторно–опорной системы с интегрированным наддувом разберем принцип действия известных конструкций радиальных лепестковых подшипников, представленных на рисунке 2.

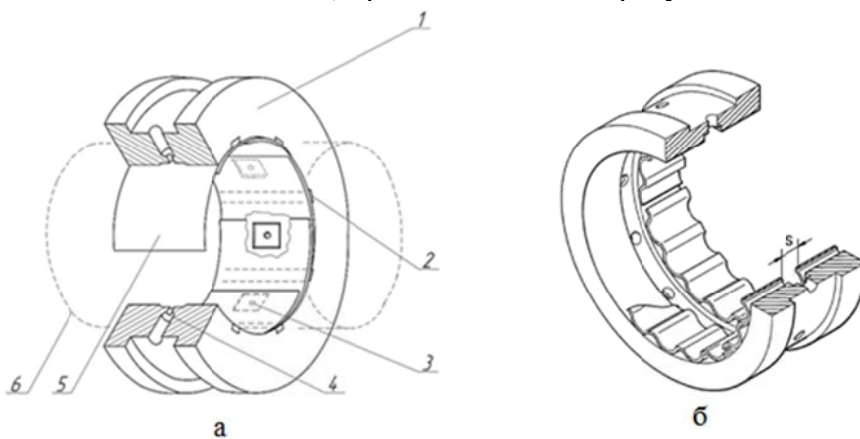


Рисунок 2 –Схемы роторно–опорного узла с системой подачи смазочного материала:

а) под упругие элементы, б) между упругими элементами

1 – корпус, 2 – паз для крепления лепестков, 3 – прямоугольная питающая камера, 4 – подводящий канал, 5 – лепесток, 6 – вал

На рисунке 2(а) приведена конструкция роторно–опорного узла с подачей смазочного материала в зону между корпусом и упругими элементами [4]. Это позволяет варьировать жесткостью опорного узла, а при реверсивном движении смазочного материала, за счет противодействия прижимать лепестки к корпусу в моменты пуска и останова. При отсутствии вращения вал 6 плотно охвачен лепестками 5, в моменты пуска и останова лепестки 5 контактируют с валом 6, до частоты всплытия, за счет создания в прямоугольных питающих камерах 3 давления меньше, чем на рабочей поверхности упругих элементов, достигается их отклонение в сторону корпуса, минимизируя износ в кратковременные

моменты пуска и останова. При достижении рабочих частот вращения нагрузка на лепестки 5 становится максимальной, поэтому через подводящие каналы 4 в питающие прямоугольные камеры 3 подается смазочный материал под давлением. Это позволяет избежать необратимых деформаций лепестков 5 и, как следствие, выхода опоры и всей турбомашины из строя. При вращении вала 6 лепестки и весь лепестковый подшипник нагреваются, что приводит к изменению геометрических размеров и прочностных свойств материалов. Дополнительными функциями подачи смазочного материала под лепестки 5 являются принудительное охлаждение и дополнительное демпфирование колебаний, возникающих в процессе работы. Демпфирование в лепестковом подшипнике происходит за счет деформаций упругих элементов, трения между ними, а также за счет демпфирования смазочного слоя под лепестками [1]. Достоинства конструкции представленной на рисунок 2(б) заключаются в подаче смазочного материала под давлением на всем протяжении работы подшипника или только в необходимые моменты пуска и останова, а также критические ситуации [5]. Принудительное разделение поверхностей снижает износ последних в процессе пуска и останова, а при достижении рабочих частот вращения увеличивает жесткость подшипника, демпфирование колебаний и устойчивость движения, способствует снижению влияния температурных деформаций, что положительно влияет на ресурс работы подшипника.

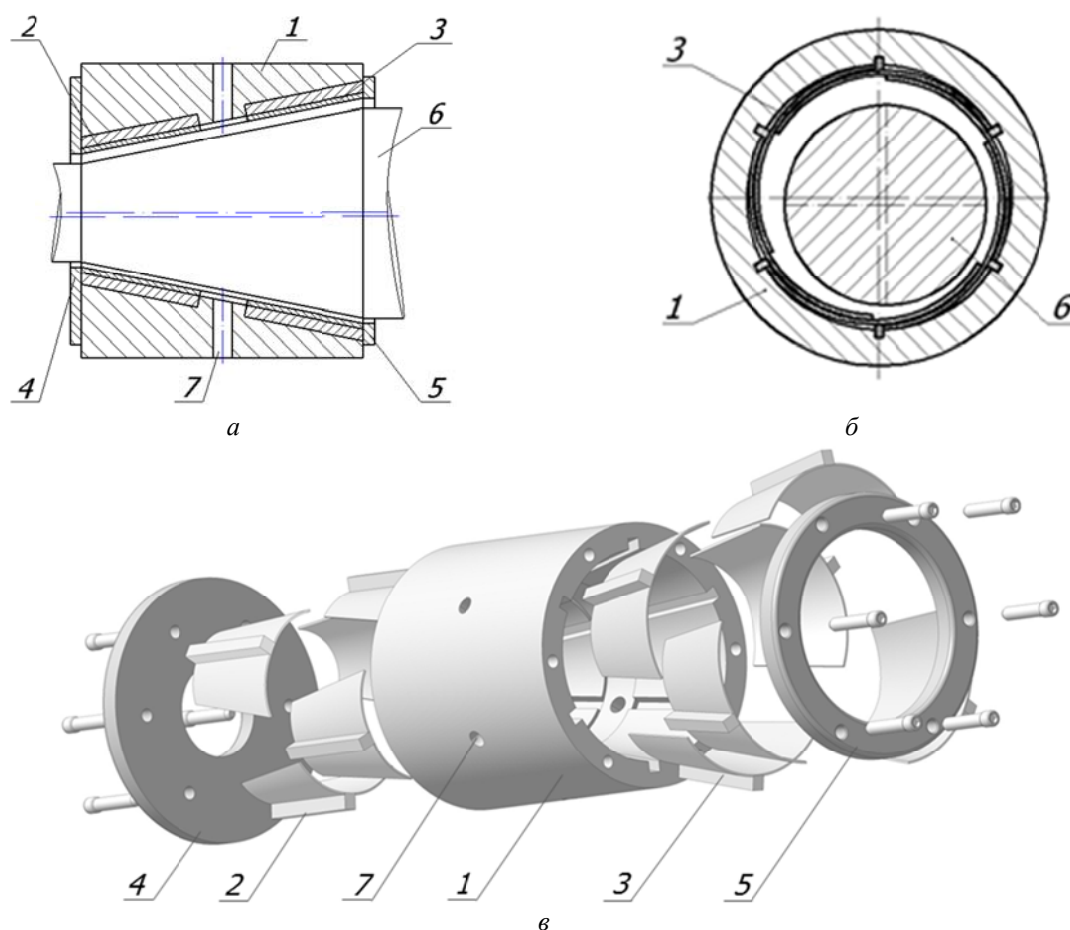


Рисунок 3 – Конический лепестковый подшипник с системой подачи смазочного материала:

а – продольный разрез; б – поперечный разрез; в – 3-Dмодель

1 – корпус, 2 и 3 – лепестки, 4 и 5 – крышки, 6 – вал, 7 – канал для подвода смазки

На основании рассмотренных конструктивных решений авторы предлагают конический лепестковый подшипник скольжения [6]. Преимущество конструкции, представленной на рисунке 3, – это одновременное восприятие радиальной и осевой нагрузок в единой опоре. Наличие упругих элементов, расположенных в два ряда,

предполагает значительное демпфирование осевых и радиальных колебаний, устойчивость движения, простоту сборки и замены отдельных деталей. Наличие равномерно расположенных отверстий минимизирует износ в процессе пуска и останова, а при наличии системы управления, позволяет варьировать жесткостью опоры и предотвращать аварийные ситуации и процессе работы.

Для моделирования процессов происходящих в рабочей зоне конического лепесткового подшипника, выделим основные узлы/детали конструкции (рисунок 3). Объемное моделирование с разнесением объектов наглядно отображает компоновку, взаимное расположение элементов, а также позволяет наиболее точно подобрать математическую модель каждому компоненту. Каждый лепесток описывается тонкой незамкнутой конической оболочкой (рисунок 4), а конструктивные особенности, такие как укладка лепестков внахлест, или многослойные конструкции описываются соответствующими выражениями совместных деформаций и граничными условиями. Наиболее широкое применение конические оболочки находят в авиационной технике и машиностроении. Одной из первых работ по исследованию устойчивости конических оболочек была работа Х.М. Муштари [8]. По сравнению с расчетом цилиндрических оболочек исследовать такие конструкции значительно труднее. Это проявляется, прежде всего, в усложнении геометрических соотношений, связывающих перемещения и деформации.

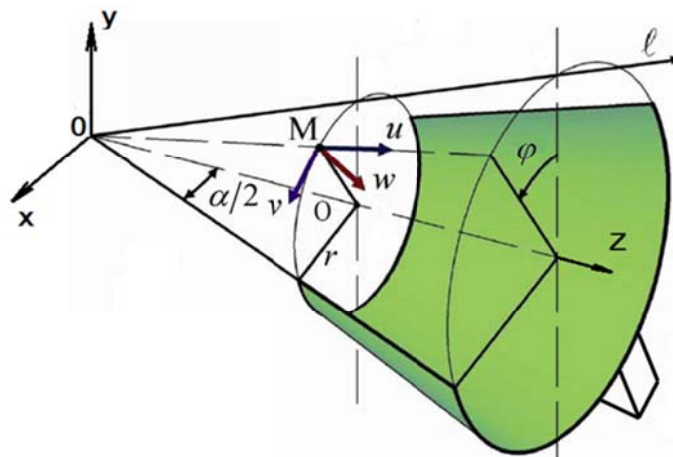


Рисунок 4 – Расчетная схема конической оболочки

Как известно в работах [7–10], в данном случае исходными уравнениями для исследования могут служить дополненные инерционными членами уравнения теории оболочек в форме Муштари – Власова, которые для конических оболочек представляются в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{12(1-\mu^2)} \nabla^2 \nabla^2 \bar{w} + \frac{\operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\bar{r}} \frac{\partial^2 \bar{\sigma}}{\partial \bar{r}^2} = \frac{\bar{l}^2}{E} \left(\rho l^2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} + p \bar{l} \right), \\ \nabla^2 \nabla^2 \bar{f} + \frac{\bar{l}^2 \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\bar{r}} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{r}^2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi_\gamma^2}, \quad \varphi_\gamma = \varphi \sin(\alpha/2), \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{E \delta^3}, \quad \bar{r} = \frac{r}{l}, \quad \bar{w} = \frac{w}{l}, \quad \bar{l} = \frac{l}{\delta},$$

где μ – коэффициент Пуассона;

$w = f(r, \varphi)$ – функция нормального прогиба (перпендикулярно образующей оболочки);

$p = f(r, \varphi)$ – функция давления;

α – угол конусности;

σ – функция напряжений;
 l – расстояние по образующей от вершины конуса до его основания;
 E – модуль упругости;
 ρ – плотность материала лепестка;
 t – время;
 δ – толщина лепестка.

Для полноценного описания работы конического лепесткового подшипника необходимо определить граничные условия для упругих элементов, зоны совместных деформаций и дополнительные силовые и геометрические параметры. Для этого выделим нижнюю и верхнюю часть лепестка, а также зоны контакта с корпусом и крепления (рисунок 5).

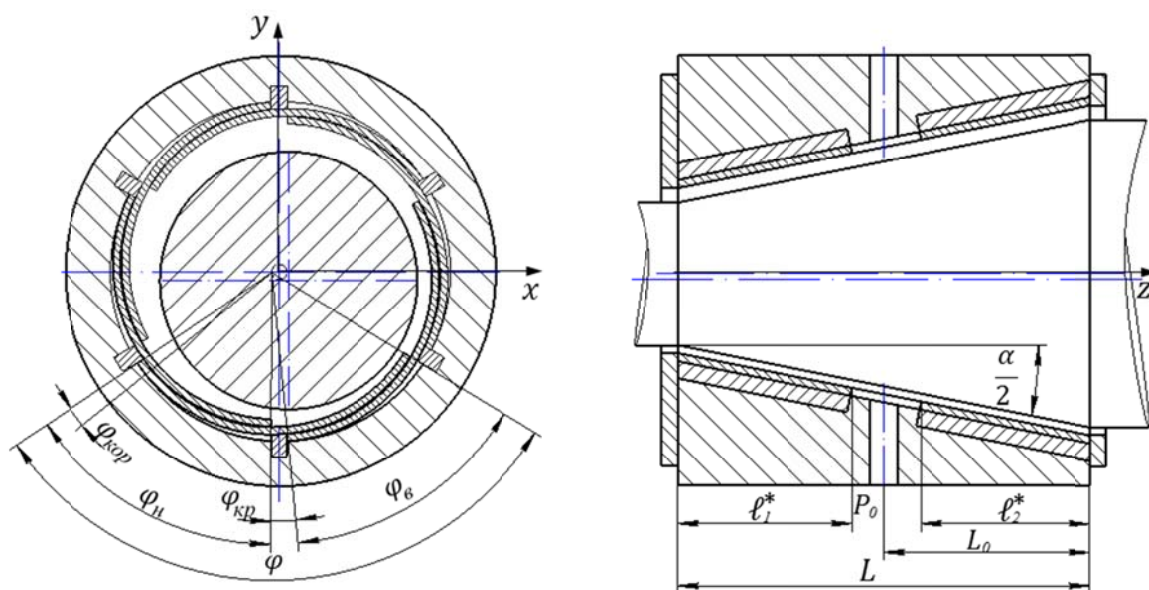


Рисунок 5 – Расчетная схема конического подшипника

$$w = \begin{cases} 0, & \varphi \in [0, \varphi_{кор}] \\ w_{vi-1}, & \varphi \in [0, \varphi_n], \delta = \delta_{vi-1} + \delta_i; \\ 0, & \varphi \in [\varphi_n, \varphi_n + \varphi_{кр}] \\ w_{ni+1}, & \varphi \in [\varphi_n + \varphi_{кр}, \varphi_n + \varphi_{кр} + \varphi_v], \delta = \delta_i + \delta_{ni+1}. \end{cases} \quad (2)$$

где φ_n – угловая протяженность нижней части лепестка,
 φ_v – угловая протяженность верхней части лепестка,
 $\varphi_{кор}$ – угловая протяженность контакта нижней части лепестка с корпусом,
 $\varphi_{кр}$ – угловая протяженность крепления лепестка,
 δ – толщина лепестка,
 δ_{vi-1} – толщина верхнего края соседнего лепестка,
 δ_{ni+1} – толщина нижнего края соседнего лепестка,
 δ_i – толщина расчетного лепестка.

Для случая эксцентричного положения цапфы в коническом лепестковом подшипнике функция зазора будет включать в себя уже три составляющие (помимо функции зазора между валом и конической поверхностью $h(r, \varphi)$ и функции зазора вдоль поверхности сегмента h_s добавляется упругий прогиб лепестка) и выглядит следующим образом [11]:

$$h = h(r, \varphi) + h_s + w, \quad (3)$$

где $w = f(r, \varphi)$ – функция прогиба лепестка.

В рамках поставленной задачи результатом решения систем уравнений (1, 2) является нахождение функции нормального прогиба $w = f(r, \varphi)$, входящей в выражение (3) для определения функции зазора в коническом лепестковом подшипнике. Дальнейшая подстановка функции зазора h в уравнение Рейнольдса для определения функции давления $p = f(r, \varphi)$ замыкает систему уравнений для расчета полей давлений.

С учетом приведенных выше формул можно записать конечную формулу по определению функции полного зазора в коническом лепестковом подшипнике:

$$h = \frac{2h_0}{1 + \cos(n\varphi_s - \varphi)} - \left[X \sin\left(\frac{\varphi}{\sin(\alpha/2)}\right) + Y \cos\left(\frac{\varphi}{\sin(\alpha/2)}\right) \right] \cos(\alpha/2) + \\ + Z \sin(\alpha/2) - \left(r - \frac{R_1}{\sin(\alpha/2)} \right) \operatorname{tg} \gamma + w. \quad (4)$$

Основой расчета гидродинамических сил и динамических характеристик опор жидкостного трения, в том числе и исследуемых, является знание распределения давлений в смазочном слое. Течение смазочной среды описывается системой уравнений гидромеханики, в которую входят уравнения: неразрывности и Навье–Стокса (смазочный материал – ньютоновская жидкость).

Преобразование уравнений неразрывности и Навье–Стокса с учетом компонентов тензора напряжений приводит к выводу обобщенного уравнения Рейнольдса [12 – 14] на случай двумерного турбулентного течения сжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической гибридной опоры:

$$\frac{\partial}{r \partial r} \left[\frac{\rho r h^3}{\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left[\frac{\rho h^3}{\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \right] = \\ = 12h \frac{\partial \rho}{\partial t} + 6 \frac{\partial}{r \partial r} (\rho r h V_r) + 6 \frac{\partial}{r \partial \varphi} (\rho h V_\varphi) + 12 \rho V_y, \quad (5)$$

где коэффициенты турбулентности определяются по следующим зависимостям:

$$K_\varphi = 1 + 0,044 \cdot \operatorname{Re}^{0,725}; \quad K_r = 1 + 0,0247 \cdot \operatorname{Re}'^{0,65}, \quad (6)$$

значение числа Рейнольдса определяется как:

$$\operatorname{Re} = (k^*)^2 \frac{\omega R_u^* \rho h}{\mu},$$

где ρ и μ – плотность и вязкость смазочного материала,

R_u^* – текущий радиус цапфы,

k^* – коэффициент Кармана, определяющий величину пути смешения и зависящий от радиального зазора.

Коэффициент k^* может принимать следующие значения: $k^* \approx 0,2 \dots 0,4$; причем малые значения k^* соответствуют малым радиальным зазорам от 10 до 100 мкм. Часто рассчитывают коэффициент Кармана по эмпирической зависимости: $k^* = 0,125 \cdot \operatorname{Re}^{0,07}$.

Значения скоростей в точках на поверхности цапфы (V_r, V_y, V_φ) определяются при решении уравнений динамики ротора и связаны со скоростями центра цапфы ($\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$) следующим образом:

$$V_r = (\dot{X} \sin \beta + \dot{Y} \cos \beta) \sin(\alpha/2) + \dot{Z} \cos(\alpha/2); \quad V_\varphi = \omega r \sin(\alpha/2) + \dot{X} \cos \beta - \dot{Y} \sin \beta;$$

$$V_y = (\dot{X} \sin \beta + \dot{Y} \cos \beta) \cos(\alpha/2) - \dot{Z} \sin(\alpha/2).$$

Решение уравнения (5) позволяет определить поле давлений $p(r, \varphi)$ в конкретный момент времени. Граничные условия для уравнения (5) определяются конкретным типом опоры и условиями ее работы. Применительно к высокоскоростным опорам турбомашин их можно записать в виде:

1) заданное давление слива p_s (на торце опоры): $p(r_2, \varphi) = p_s$,

2) условие неразрывности (сплошности) смазочного слоя по координате φ (гипотеза Зоммерфельда) [13, 14]:

$$p(r, 0) = p(r, 2\pi \sin(\alpha/2)); \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi}(r, 0) = \frac{\partial p}{\partial \varphi}(r, 2\pi \sin(\alpha/2)).$$

Дополнительные граничные условия для уравнения Рейнольдса с учетом особенной конструкции конического лепесткового подшипника, при учете возможной подачи смазочного материала в рабочую зону согласно схеме представленной на рисунок 5 выглядят следующим образом:

$$p(r, \varphi) = \begin{cases} p_{вн}, & z = 0; \\ p_0, & z = \ell_1^*; \\ p_0, & z = L - \ell_2^*; \\ p_{вн}, & z = L. \end{cases} \quad (7)$$

где $p_{вн}$ – давление на торцах подшипника,

p_0 – давление подачи смазочного материала,

ℓ_1^* – длина меньшего лепестка в проекции на ось z ,

ℓ_2^* – длина большего лепестка в проекции на ось z .

Для определения давлений в питающих камерах p_H необходимо включить в математическую модель расчета поля давлений в смазочном слое уравнение баланса расходов [14], которое выражает равенство массовых расходов смазочного материала через жиклер и контур, расположенный вокруг питающей камеры, и имеет вид при условии положительного расхода ($p_0 > p_H$):

$$Q_H = Q_r + Q_\varphi + Q_y. \quad (8)$$

Массовые расходы, входящие в (8), имеют следующий смысл:

1) Q_H – массовый расход смазочного материала через дросселирующее устройство (жиклер), определяемый следующей зависимостью [14]:

$$Q_H = \frac{\pi d_H^4}{128 \cdot l_H} \frac{(p_0 - p_H)(p_0 + p_H)}{K(\mu_0 + \mu_H)}, \quad (9)$$

где K – обобщенный коэффициент, зависящий от интенсивности течения.

Для гладкого канала дросселя с острыми входными кромками значение коэффициента K находится из следующего соотношения [14]:

$$K = \frac{1,5 \text{Re} \cdot d_H}{64 \cdot l_H} + \begin{cases} 1, & \text{при } \text{Re} \leq \text{Re}^*; \\ \left(\text{Re}/\text{Re}^*\right)^{0,75}, & \text{при } \text{Re} > \text{Re}^*, \end{cases} \quad (10)$$

критическое значение числа Рейнольдса равно: $\text{Re}^* \approx 1200$.

2) Q_r и Q_φ – массовые расходы смазочного материала в осевом и окружном направлениях через контур вокруг питающей камеры, обусловленные вращением цапфы и градиентом давлений в соответствующих направлениях и определяемые по соотношениям аналогично [14]:

$$Q_r = \int_{\varphi_H - \varepsilon_\varphi}^{\varphi_B + \varepsilon_\varphi} \left[\left(\frac{\rho V_r h}{2} - \frac{\rho h^3}{12\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_B + \varepsilon_r} - \left(\frac{\rho V_r h}{2} - \frac{\rho h^3}{12\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_H - \varepsilon_r} \right] r d\varphi; \quad (11)$$

$$Q_\varphi = \int_{r_H - \varepsilon_r}^{r_B + \varepsilon_r} \left[\left(\frac{\rho V_\varphi h}{2} - \frac{\rho h^3}{12\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_B + \varepsilon_\varphi} - \left(\frac{\rho V_\varphi h}{2} - \frac{\rho h^3}{12\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_H - \varepsilon_\varphi} \right] dr,$$

где ε_r и ε_φ – окрестности, ограничивающие заданный контур; для точечных камер (рисунок 6) для пределов нужно учесть, что $r_H = r_B = r_C$ и $\varphi_H = \varphi_B = \varphi_C$.

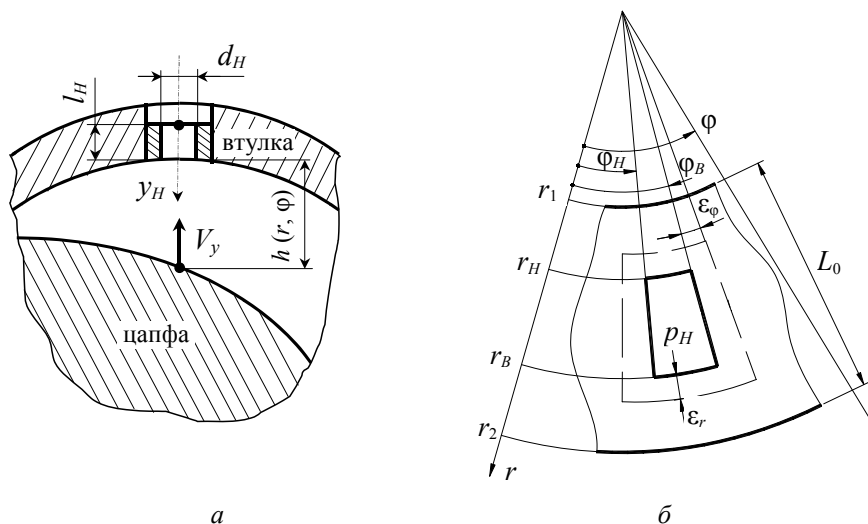


Рисунок 6 – Расчетная схема для определения давлений в камерах:
а) точечных; б) прямоугольных

3) Q_y – массовый расход, обусловленный радиальным перемещением цапфы, когда проявляются эффекты всасывания и сдавливания смазочной пленки, для точечных и прямоугольных камер соответственно равный:

$$Q_y = -\rho_H V_y \frac{\pi d_H^2}{4} \text{ и } Q_y = - \iint_{S_K} \rho V_y r d\varphi dr, \quad (12)$$

где S_K – площадь поверхности прямоугольной камеры.

Решение уравнения (8) позволяет определить давление p_H в камерах, используемое в граничном условии для уравнения Рейнольдса.

Суммарный массовый расход смазочного материала, являющийся основной характеристикой конических ГСП, определяется по формуле [14]:

$$Q_m = \frac{\pi d_H^4}{128 \cdot l_H} \sum_{n=1}^{N_P N_K} \left(\frac{(p_0 - p_H)(\rho_H + \rho_0)}{K(\mu_H + \mu_0)} \right)_n, \quad (13)$$

где N_P и N_K – число рядов камер и камер в ряду.

Представленная математическая модель позволяет получить распределение давлений в смазочном слое конического лепесткового подшипника (рисунок 7), знание которых позволяет в дальнейшем перейти к расчету статических и динамических характеристик опоры.

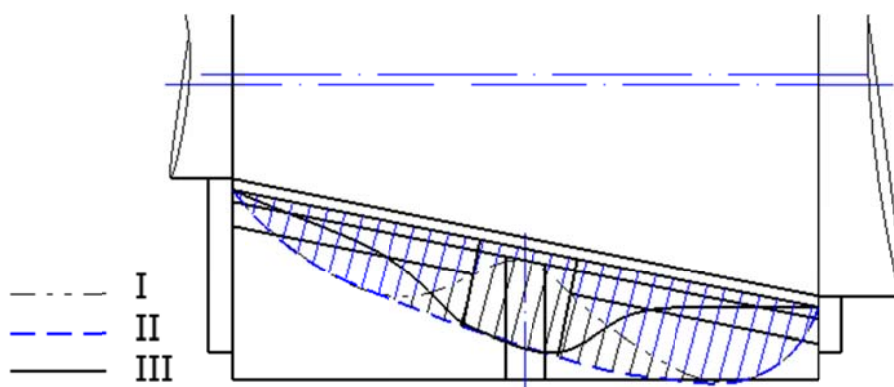


Рисунок 7 – Эпюры давлений в смазочном слое:

*I – в гидродинамическом режиме; II – в гидростатодинамическом режиме;
III – в гидростатическом режиме*

Однако, сложность построенной математической модели, обусловленная многогранностью гидродинамических и теплофизических явлений, происходящих в смазочном слое конического подшипника, не позволяет получить аналитическое решение для функции распределения давлений в смазочном слое.

Вывод

Решение представленной системы уравнений должно осуществляться численными методами, например методом конечных разностей. Это, в дальнейшем, позволяет выявить наиболее приемлемое перспективное развитие выбранного способа совершенствования конических лепестковых опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытин, А.В. Лепестковые газодинамические подшипники: применение и технические решения: монография / А.В. Сытин, Л.А. Савин; Орел: ОГУ, 2016. – 196 с.
2. Патент USA, № 4178046, Int. C1 F16C 17/00. Foil bearing. Alexander Silver and James R. Wenban. Appl. No 689,619; 24.05.1979.
3. Казаков В. А., Шлугер М. А. Износостойкие и антифрикционные гальванические покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
4. Патент USA, № 5885004, Int. C1 F16C 17/03. Hydrostatically supported foil bearing. Joseph K. Scharrer; Robert F. Beatty. Appl. No.: 979,357; 23.03.1999.
5. Патент USA, № 7056025, Int. C1 F16C32/06. Foil bearing. Hidehiko Nakata. Appl. No.: 10/815,937; 06.06.2006.
6. Конический лепестковый подшипник скольжения. Патент на изобретение №2437005. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 20.12.2011 г. Савин Л.А., Корнеев А.Ю., Сытин А.В., Ярославцев М.М.
7. Овчаров А.А., Брылев И.С. Математическая модель деформирования нелинейно упругих подкрепленных конических оболочек при динамическом нагружении // Инженерный вестник Дона, 2014. – Вып. 5. – Т. 29.
8. Муштары, Х. М. Об устойчивости тонкостенных конических оболочек круглого сечения при кручении парами / Х. М. Муштары. – В кн. Сборник научных трудов КАИ. – Казань: Издательство Казанского авиационного института, 1935. – С. 39–40.
9. Костылев В. В. К вопросу расчета динамической прочности тонких конических оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек, 1966. – Вып. 4. – с. 336 – 341.
10. Костылев В. В. Устойчивость круговых конических оболочек под действием динамического внешнего давления // Исследования по теории пластин и оболочек, 1967. – Вып. 5. – с. 480 – 493.
11. Корнеев А.Ю., Сытин А.В., Ли Шенбо. Функция зазора в конических лепестковых газодинамических подшипниках // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 5–2 (313), 2015. – С. 213 – 220.
12. Токарь И.Я. Проектирование и расчет опор трения. М.: Машиностроение, 1971. – 168 с.
13. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Математическая модель неизотермического турбулентного течения смазочного материала в конических опорах жидкостного трения // Вестник машиностроения, 2005. – № 7. – С. 37 – 42.
14. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Конические подшипники жидкостного трения: монография. М: Машиностроение–1, 2008. – 172 с.

Корнеев Андрей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
Кандидат технических наук, доцент, декан
факультета среднего профессионального
образования
Тел. 8-906-662-44-22
E-mail: korneev_andrey@mail.ru

Сытин Антон Валерьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Кандидат технических наук, доцент кафедры
мехатроники, механики и робототехники
Тел. 8 (4862) 41-98-85
E-mail: sytin@mail.ru

A.Yu. KORNEYEV, A.V. SYTIN

THE MATHEMATICAL MODEL OF LUBRICANT TURBULENCE FLOW IN THE CONICAL FOIL BEARING

Abstract. *The mathematical model of lubricant turbulence flow in the conical foil bearing is considered. Schemes of conical bearing and foil, clearance function in lubricant layer, Reynolds and flow rate balance equations are represented. The advantages of this type of bearings are described.*

Keywords: *conical foil bearing, turbulence, foil, Reynolds equation, flow rate balance equation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sytin, A.V. Lepestkovyye gazodinamicheskiye podshipniki: primeneniye i tekhnicheskiye resheniya: monografiya / A.V. Sytin, L.A. Savin; Orel: OGU, 2016. – 196 s.
2. Patent USA, № 4178046, Int. C1 F16S 17/00. Foil bearing. Alexander Silver and James R. Wenban. Appl. No 689,619; 24.05.1979.
3. Kazakov V. A., Shluger M. A. Iznosostoykiye i antifriktsionnyye galva–nicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii. – L.: Mashinostroyeniye, 1981. – 212 s.
4. Patent USA, № 5885004, Int. C1 F16S 17/03. Hydrostatically supported foil bearing. Joseph K. Scharrer; Robert F. Beatty. Appl. No.: 979,357; 23.03.1999.
5. PatentUSA, № 7056025, Int. C1 F16S32/06. Foil bearing. Hidehiko Nakata. Appl. No.: 10/815,937; 06.06.2006.
6. Konicheskiy lepestkovyy podshipnik skolzheniya. Patent na izobreteniy №2437005. Zaregistririvan v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy RF 20.12.2011 g. Savin L.A., Korneyev A.YU., Sytin A.V., Yaroslavtsev M.M.
7. Ovcharov A.A., Brylev I.S. Matematicheskaya model deformirovaniya nelineyno uprugikh podkreplennykh konicheskikh obolochek pri dinamicheskom nagruzhenii // Inzhenernyy vestnik Dona, 2014. – Vyp. 5. — T. 29.
8. Mushtari, KH. M. Ob ustoychivosti tonkostennykh konicheskikh obolochek kruglogo secheniya pri kruchenii parami / KH. M. Mushtari. – V kn. Sbornik nauchnykh trudov KAI. – Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo aviatsionnogo instituta, 1935. – S. 39–40.
9. Kostylev V. V. K voprosu rascheta dinamicheskoy prochnosti tonkikh konicheskikh obolochek // Issledovaniya po teorii plastin i obolochek, 1966. – Vyp. 4. – s. 336 – 341.
10. Kostylev V. V. Ustoychivost krugovykh konicheskikh obolochek pod deystviyem dinamicheskogo vneshnego davleniya // Issledovaniya po teorii plastin i obolochek, 1967. – Vyp. 5. – s. 480 – 493.
11. Korneyev A.YU., Sytin A.V., Li Shenbo. Funktsiya zazora v konicheskikh lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikakh // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. № 5–2 (313), 2015. – S. 213 – 220.
12. Tokar I.YA. Proyektirovaniye i raschet opor treniya. M.: Mashinostroyeniye, 1971. – 168 s.
13. Korneyev A.YU., Savin L.A., Solomin O.V. Matematicheskaya model neizotermicheskogo turbulentnogo techeniya smazochnogo materiala v konicheskikh oporakh zhidkostnogo treniya // Vestnik mashinostroyeniya, 2005. – № 7. – S. 37 – 42.
14. Korneyev A.YU., Savin L.A., Solomin O.V. Konicheskiye podshipniki zhidkostnogo treniya: monografiya. M: Mashinostroyeniye–1, 2008. – 172 s.

Korneyev Andrey Yuryevich

Orel State University named after I.S. Turgenev,
candidate of technical sciences, assistant professor, dean of
faculty of mean professional education
302030, Orel, Moskovskaya street, 34
Tel. 8-906-662-44-22
E-mail: korneev_andrey@mail.ru

Sytin Anton Valeryevich

Orel State University named after I.S. Turgenev,
candidate of technical sciences, assistant professor
of department of Mechatronics, Mechanics and Robotics
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29
Tel. (4862) 41-98-85
E-mail: sytin@mail.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 537.322.9

О.И. МАРКОВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ БОКОВОГО ОТВОДА ТЕПЛА В СТУПЕНЧАТОМ ТЕРМОЭЛЕМЕНТЕ

Аннотация. *Выполнено численное моделирование тепловых и термоэлектрических процессов в ветви ступенчатого термоэлектрического охладителя Пельтье. Математическая модель, основанная на уравнениях стационарной теплопроводности с распределенными источниками тепловыделения, использует в качестве исходных данных рабочие характеристики термоэлектрических модулей. Представлены результаты численного моделирования тепловых полей*

Ключевые слова: *математическое моделирование, температурное поле, твердотельные термоэлектрические охладители Пельтье, боковой отвод тепла.*

Введение.

Малые габариты, отсутствие движущихся частей, бесшумность, малая чувствительность к вибрациям, возможность плавного и точного регулирования температурного режима, малая инерционность, экологичность и простота эксплуатации являются определяющими при использовании термоэлектрических преобразователей в физиотерапии [1, 2]. Более широкое использование термоэлектрических преобразователей для медицинских целей требует создания новых рациональных конструкторско-технологических решений при производстве изделий и модернизации уже известных. Одним из таких решений может быть использование ступенчатых термоэлементов. Большинство конструкций термоэлектрических охладителей на основе эффекта Пельтье устроены таким образом, что перенос заряда и тепла происходит вдоль ветвей термоэлементов. Поэтому тепловые и термоэлектрические процессы в термоэлементах в большинстве случаев описываются в приближении одномерности температурного поля. [3,4]. Однако одномерность температуры ветвей термоэлемента имеет место только при условии, что они достаточно длинные по сравнению с их поперечными размерами, иначе условие одномерности нарушается. Такой «одномерный» подход позволяет рассматривать и более сложные конструктивные решения для термоэлементов с единых позиций и сравнивать их эффективности друг с другом [4,5]. Автором предпринята попытка рассмотрения эффективности преобразования в ветви термоэлемента для случая с боковым теплообменом, хотя в этом случае более последовательно было бы говорить об оценке влияния теплообмена на эффективность преобразователя [6].

Идея бокового отвода тепла в ветви с целью увеличения перепада температур на охлаждающем термоэlemente впервые была опубликована в докладах [7,8].. В первом докладе сформулирована постановка задачи о боковом отводе тепла. Предложена математическая модель в виде трех обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих процесс стационарной теплопроводности с распределенной теплотой Джоуля вместе с граничными и краевыми условиями. В том же докладе приводится решение граничной задачи, полученное в аналитическом виде. Утверждается, что полученное выражение, полученное выражение позволяет определить холодопроизводительность, холодильный коэффициент и оптимизировать характеристики по току и геометрии. Так, установлено, что оптимальная длина бокового термоэлемента составляет половину длины центрального термоэлемента.

Во втором докладе показано, что температурное поле центрального термоэлемента существенно изменяется, а распределение температуры в боковом термоэlemente существенно не меняется. Боковые термоэлементы работают с тепловой нагрузкой за счет

притока тепла от центрального термоэлемента. Утверждается, что поэтому в боковых термоэлементах отсутствует область перегрева.

В работе [9] уже другой автор рассмотрел аналогичную задачу двухступенчатого термоэлемента с боковым отводом тепла, используя те же дифференциальные уравнения и граничные условия, но представил решение в более удобном для анализа виде, привел выражение для холодопроизводительности центрального термоэлемента. Ему удалось получить и оптимизированное выражение для холодопроизводительности и определить оптимальный рабочий ток системы. Определена оптимальная длина бокового термоэлемента и оптимальный ток. Установлена связь между минимальной температурой холодного спая центрального термоэлемента с перепадом на боковом термоэлементе.

Авторами [10] была поставлена и решена аналогичная задача. В предположении одномерного описания были получены выражения для максимального перепада температур, определен максимальный ток и отношение токов центральной и боковой термопар. Эти выражения получились более простыми и наглядными. Общим недостатком этих работ [7–10] является использование предположения об одномерности температурного поля ветви термоэлемента с боковым отводом тепла, поскольку в этом случае наряду с продольными потоками тепла весьма существенными являются поперечные потоки. Целью данной работы являются теоретические исследования тепловых характеристик термоэлектрических преобразователей с боковым отводом тепла. В данном случае необходимо использовать двухмерную модель. Решение двумерных задач по расчету температурного поля приводят к пересмотру давно сложившихся взглядов на традиционное устройство термопар. Такой подход оказался более продуктивным и уже привел к новому конструктивному решению термоэлемента [11].

Основная часть.

Исходя из предположения симметрии ветвей термоэлемента с боковым отводом тепла с помощью боковых термоэлементов, можно для простоты рассмотреть лишь часть конструкции, физическая модель которой представлена на рисунке 1: длинная ветвь центрального термоэлемента и короткая ветвь бокового. Часть контактной перемычкой бокового термоэлемента изображена в верхней части ветви. Боковые свободные поверхности ветвей изолированы как по притоку тепла, так и электрически. Боковые контакты ветвей центрального и бокового термоэлементов только тепловые без возможности протекания, электрического тока. Контактная перемычка с ветвью центрального термоэлемента тоже находится только в тепловом контакте.

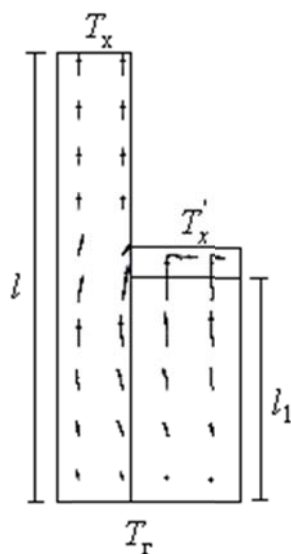


Рисунок 1 – Физическая модель расчета бокового отвода тепла

Для расчета выбран материал ветвей термоэлемента – теллурид висмута с характеристиками:

дифференциальная термоэдс $\alpha=200$ мкВ/К,

удельное сопротивление ветви $\rho=8,3 \cdot 10^{-4}$ Ом*м,

удельная теплопроводность ветви, $\chi=1.6$ Вт/м*К,

длина ветви центрального термоэлемента $l=3$ см,

поперечное сечение $S=0.5$ см²,

длина ветви бокового термоэлемента l_1 – переменная величина;

температура горячих концов ветвей центрального и бокового термоэлементов $T_\Gamma=300$ К,

температура холодного конца ветви центрального термоэлемента T_x ,

температура холодного конца ветви бокового термоэлемента T'_x – переменная величина,

Контактная перемычка – медная:

удельная теплопроводность $\chi=400$ Вт/м*К.

При своей работе охлаждающий термоэлемент потребляет электрическую мощность, которая выделяется в объеме ветвей в виде джоулевой теплоты плотностью

$$w = \frac{(\alpha T_x)^2}{\rho l^2} \quad (1)$$

Для построения компьютерной модели была использована программа ELCUT [12], что дало возможность сформулировать граничную задачу в виде двумерного уравнения стационарной теплопроводности с распределенными источниками тепла

$$\chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{(\alpha T_x)^2}{\rho l^2} = 0, \quad (2)$$

для ветви бокового термоэлемента

$$\chi \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y^2} \right) + \frac{(\alpha T'_x)^2}{\rho l_1^2} = 0 \quad (3)$$

и граничных условий:

на верхнем конце ветви центрального термоэлемента

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(\alpha T_x)^2}{\chi \rho l} \quad (4)$$

на верхнем конце ветви бокового термоэлемента

$$\frac{\partial T'}{\partial y} = \frac{(\alpha T'_x)^2}{\chi \rho l_1} \quad (5)$$

на нижних концах ветвей $T_\Gamma=300$ К.

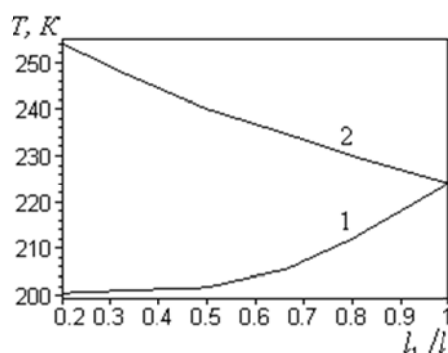


Рисунок 2 – Зависимость температур холодных концов ветвей от отношения длин ветвей центрального (1) и бокового (2) термоэлементов

Вдоль поверхности соприкосновения ветвей, а также в области касания перемычки ветви центрального термоэлемента выполняется равенство температур и градиентов температур.

Как показал расчет, вопреки выводам [8], поток тепла вдоль всей поверхности соприкосновения ветвей направлен от бокового термоэлемента к центральному (рисунок 1), что обусловлено тем, что боковой термоэлемент, работая под нагрузкой, более перегрет, чем нижняя часть ветви центрального термоэлемента. Поглощение тепла происходит исключительно в области теплового контакта перемычки с ветвью центрального термоэлемента.

В режиме максимального перепада температур центрального термоэлемента эффективность теплоотвода должна проявиться в снижении температуры холодного конца ветви центрального термоэлемента. Кривая 1 (рисунок 2) показывает зависимость температуры холодного конца ветви центрального термоэлемента от отношения длин ветвей бокового и центрального термоэлементов. Кривая 2 (рисунок 2) показывает, как изменяется температура холодного конца ветви бокового термоэлемента в зависимости от отношения длин ветвей бокового и центрального термоэлементов. Из рисунка 2 видно, что уменьшение длины бокового термоэлемента меньше половины длины центрального нецелесообразно и практически не приводит к снижению температуры холодного конца центрального термоэлемента. Это связано с тем, что теплота Джоуля, выделяющаяся в верхней половине ветви центрального термоэлемента, достигает холодного конца ветви полностью, а отвод тепла из нижней части просто не эффективен.

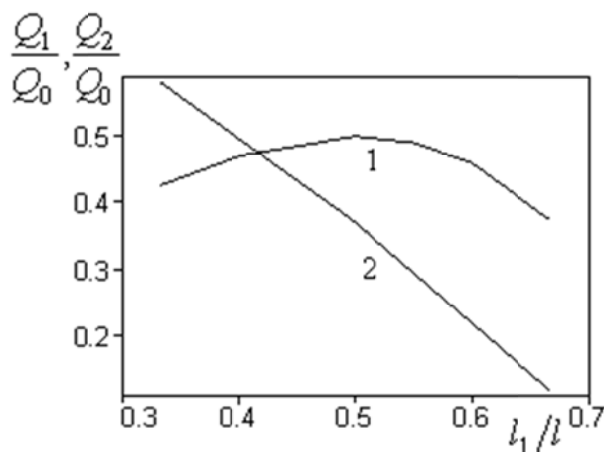


Рисунок 3 – Распределение потоков тепла между ветвями в зависимости от отношения длин ветвей бокового и центрального термоэлементов

При помощи возможностей программы ELCUT были определены потоки тепла через тепловой контакт ветви центрального термоэлемента с перемычкой Q_1 и через поверхность соприкосновения ветви центрального термоэлемента с ветвью бокового термоэлемента Q_2 . Оптимальное положение места теплового контакта перемычки с боковой стороной ветви центрального термоэлемента показывает рисунок 3. Кривая 1 (рисунок 3) определяет зависимость Q_1/Q_0 от отношения длин ветвей бокового и центрального термоэлементов. Кривая 2 показывает зависимость Q_2/Q_0 от отношения длин ветвей бокового и центрального термоэлементов. Как видно (кривая 1) полезно используется только половина величины холодопроизводительности бокового термоэлемента при длине ветви бокового термоэлемента, равной половине длины ветви центрального термоэлемента, как было определено еще в работе [8]. Как видно (кривая 2), при малых длинах бокового термоэлемента тепловой поток из бокового термоэлемента начинает превышать охлаждающий приток тепла и, поэтому эффективность действия бокового термоэлемента резко падает.

Заключение. На основе рассмотренной модели проведен расчет температурных и тепловых полей для различных отношений длин термоэлементов при постоянной силе тока электропитания и холодопроизводительности бокового отвода тепла. Показано, что теплоотвод осуществляется в области теплового контакта перемычки бокового термоэлемента с ветвью центрального термоэлемента. Установлено, что оптимальному преобразованию соответствует длина бокового термоэлемента, равная половине длины ветви центрального термоэлемента. Через поверхность соприкосновения ветвей поток тепла направлен в противоположную сторону и приводит к нагреву ветви центрального термоэлемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов, Г.И. Термоэлектрические устройства для экспериментального исследования реакции человеческого организма на локальное тепловое воздействие / Г.И.Аминов. // Доклады X Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применения», С.-Петербург. ФТИ им. А.Ф.Иоффе. 2006. С. 424–431.
2. Хазамова, М.А. Термоэлектрическое устройство для контрастного температурного воздействия в рефлексотерапии/ М.А.Хазамова // Доклады X Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применения», С.-Петербург. ФТИ им. А.Ф.Иоффе. 2006. С. 432–435.
3. Анатычук, Л.И. Термоэлектричество. Т.1. Физика термоэлектричества/ Л.И. Анатычук. – Черновцы: Изд-во Института термоэлектричества. 2008. – 388 с
4. Анатычук, Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии/ Л.И. Анатычук. – Черновцы: Изд-во Института термоэлектричества. 2003. – 374 с
5. Марков, О.И. Компьютерное моделирование термоэлектрических преобразователей / О.И.Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 1 (285). – С.20–24.
6. Марков, О.И. Оценка влияния теплообмена излучением на эффективность термоэлектрического охладителя. / О.И.Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 6 (326). – С.167–171.
7. Корнилов, В.С. Расчет характеристик термоэлектрического охладителя с боковым отводом тепла / В.С.Корнилов, Г.А.Иванов, А.С. Парахин // Тезисы докладов межвузовской конференции «Физика твердого тела». Барнаул.БГПИ. 1982. с.10–11.
8. Корнилов, В.С. Исследование температурного поля термоэлектрического охладителя с боковым отводом тепла / В.С.Корнилов, Г.А.Иванов, А.С. Парахин // Тезисы докладов межвузовской конференции «Физика твердого тела». Барнаул. БГПИ. 1982. с.11–12.
9. Мунтян, С.П. Боковой сброс тепла в термоэлектрическом охлаждении. / С.П. Мунтян // Электронные свойства полуметаллов и полупроводников. Сб. научных трудов. – Кишинев: «Штиинца». –1987. – с.126–132.
10. Марков, О.И. Оптимизация решения граничной задачи для термоэлементов с теплообменом./ О.И. Марков, О.А. Мызникова, А.И. Рыжиков // сб. трудов IX Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики». – Орел. – ОГУ. –2000. –С.300–303.
11. Патент на полезную модель РФ №172616 МПК H02L 35/02. Устройство полупроводникового термоэлемента. / О.И. Марков. Заявл. 10.03.2017; опубл. 14.07.2017., Бюл. №20, 2017.
12. Описание возможностей программы ELCUT // источник: http://elcut.ru/feat_r.htm

Марков Олег Иванович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел,
д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики
E-mail: O.I.Markov@mail.ru/

O.I. MARKOV

MODELLING OF LATERAL HEAT REMOVAL IN THE STEP THERMOELEMENT

Abstract. Numerical modeling thermal and thermoelectric processes in a branch of step thermoelectric cooler of Peltier is executed. The mathematical model based on the equations of stationary heat conductivity with distributed sources of a thermal emission, uses performance data of thermoelectric modules as initial data. Results of numerical modeling of thermal fields are presented

Keywords: *Mathematical modeling, temperature field, solid-state thermoelectric coolers Peltier, lateral heat removal.*

BIBLIOGRAPHY

1. Aminov, G. I. Termoelektricheskie ustroystva dlja experimentalnogo issledovaniya reaktsii chelovecheskogo organizma na lokalnoe teplovoe vosdeystvie / G.I. Aminov // Doklady X Mezhhgosudarstvennogo seminaru «Termoelektriki i ih primeneniya», S.–Peterburg. FTI im. A.F.Ioffe. 2006. S. 424–431.
2. Hasamova, M.A. Termoelektricheskoe ustroystvo dlja kontrastnogo temperaturnogo vosdeystviya v reflesoterapii / M.A.Hasamova // Doklady X Mezhhgosudarstvennogo seminaru «Termoelektriki i ih primeneniya», S.–Peterburg. FTI im. A.F.Ioffe. 2006. S. 432–435.
3. Anatyshuk, L. I. Termoelektrichestvo. T.1. Fizika termoelektrichestva / L.I. Anatyshuk.– Chernovtsy: Isd–vo Unstituta termoelektrichestva. 2008. –388 s.
4. Anatyshuk, L. I. Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskie preobrasovateli energii / L.I. Anatyshuk.– Chernovtsy: Isd–vo Unstituta termoelektrichestva. 2003.– 374 s.
5. Markov, O.I. Kompyuternoye modelirovaniye termoelektricheskikh preobrasovateley/ O.I.Markov// Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – №1 (285). – S. 20–24.
6. Markov, O.I. Otsenka vliyaniya teploobmena na effektivnost termoelektricheskogo ohladitelya / O.I.Markov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – №6 (326). – S. 167–171.
7. Kornilov, V.S. Raschet harakteristik termoelektricheskogo ohladitelya s bokovym otvodom tepla / V.S. Kornilov, G.A.Ivanov, A.S.Parahin // Tesisy dokladov mezhhvusoovskoy konferentsii «Fizika tverdogo tela». Barnaul.: BGPI, 1982 –. S. 10–11.
8. Kornilov, V.S. Issledovanie temperaturnogo polya termoelektricheskogo ohladitelya s bokovym otvodom tepla / V.S. Kornilov, G.A.Ivanov A.S.Parahin // Tesisy dokladov mezhhvusoovskoy konferentsii «Fizika tverdogo tela». Barnaul.: BGPI, 1982. – S. 11–12.
9. Muntyan, S.P. Bokovoy sbros tepla v termoelektricheskom ohlazhdenii / S.P. Muntyan // Elektronnyye svoystva polumetallov i poluprivodnikov. Sb. nauchnykh trudov. Kishinev: Shtiintsa. –1987.– S.126–132.
10. Markov, O.I. Optimisatsiya resheniya granichnoy sadachi dlya termoelementov s teploobmenom / O.I.Markov,O.A. Mysnikova, A.I. Ryzhikov // sb. trudov IX Mezhdunarodnogo simposiuma «Metody diskretnykh osobennostey v sadachah matematicheskoy fiziki». –Orel.–OGU.– 2000. –S.300–303.
11. Patent na polesnyuyu model RF № 172616 MIIK H02L 35/02. Ustroystvo poluprovodnikovogo termoelementa / Markov O.I. sayavl. 10.03.2017, opubl. 14.07.2017. Byul. №20, 2017.
12. Opisanie vozmozhnostey programmy ELCUT // istochnik: http://elcut.ru/feat_r.htm

Markov Oleg Ivanovich

Orel State University named after I.S.Turgenev, Orel,

Doctor of Phys.–Math, Sciences,

Head of Department of experimental and theoretical physics

E–mail: O.I.Markov@mail.ru

УДК 51–74

И.Н. БУРИЛИЧ, Д.Н. ТЮТЮНОВ, Л.И. СТУДЕНИКИНА, Е.Ю. МАШКОВ, Н.А. КОНОРЕВА

ОДИН ИЗ ВАРИАНТОВ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЗАДАННЫХ ЛИМИТОВ

Аннотация. В предлагаемой статье рассмотрена проблема формирования массива потребителей электроэнергии на основе предлагаемых лимитов. Поставлена задача оптимизации процесса распределения мощностей, подаваемых из сети в зависимости от числа заказчиков. Предложена математическая модель, основанная на анализе и свойствах функции нескольких независимых вещественных переменных, приводящая к поиску локального экстремума этой функции. Главные положения метода, получившего название «метод n -ок», базируются на распределении потребителей электроэнергии на n групп и опираются на наличие ограничений по лимитам потребления. В качестве критерия оптимальности выбирается условный локальный минимум функции цели, которая представляет собой сумму отношений n значений лимитов энергоресурса к соответствующему числу его потребителей в полученных группах. Выведены необходимые рабочие формулы оптимального распределения лимитов электроэнергии в массиве потребителей.

Ключевые слова: формирование массива потребителей, математическая модель, локальный минимум функции цели, стационарная точка, дифференциал функции Лагранжа.

Введение

Решение проблемы в области электроснабжения и энергосбережения наиболее актуально в плане повышения энергетической эффективности в обслуживании потребителей, что нашло отражение в Государственной программе РФ «энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2010 г.». В этой связи оптимизация процесса распределения лимита некоторого электроэнергетического ресурса среди массива потребителей может стать одним из возможных решений данной проблемы.

Основным стратегическим направлением ресурсосбережения [1–3] в системах потребления электрической энергии служит вектор оптимального распределения в сфере потребления, опирающийся на современные методы математического анализа и соответствующую аппаратную поддержку [1–8].

Предлагается задача поиска локального экстремума некоторого множества (удельного объема некоторых ресурсов). Элементы указанного множества получены путем алгебраических преобразований из элементов двух других множеств, функционально связанных с ними. Рассматривается «метод n -ок», который за счет оптимального разбиения этих множеств дает возможность получить условный локальный минимум. Предложенная математическая модель имеет важное практическое значение в решении целого ряда проблем распределения ресурсов и материальных запасов. К примеру, данный подход позволяет оптимизировать решение проблемы энергосбережения в современных системах управления с распределением тепловой энергии между потребителями разного уровня. Получены необходимые формулы оптимального распределения лимита ресурсов в массиве потребителей.

Анализ

«Метод n -ок» заключается в том, что предварительно два множества разбиваются на n подмножеств с фиксированным количеством элементов в каждом из них. Далее производится исследование вновь полученного из них множества с помощью функции Лагранжа. Найдена единственная стационарная точка, приводящая к искомой цели.

Важное значение в поисках наивыгоднейших результатов играют этапы определения локальных экстремумов задач [1], [2], [3].

Расчет

Изложим основные положения «метода n -ок» на примере математической модели оптимального распределения элементов некоторого множества $\{G\}$; полученного из элементов множеств $\{N\}$ (например, множество потребителей электроэнергии, электроток,

приборов и т.п.) и $\{Q\}$: (например, множество значений лимитов электроэнергии, допустимых значений силы тока и т.п.).

Произведем их произвольное разбиение на n попарно непересекающихся подмножеств (рисунок 1), т.е. для любой пары разбиения справедливы ограничения:

$$N_p \cap Q_p = \emptyset, N_p \cap N_k = \emptyset, Q_p \cap Q_k = \emptyset. \quad (1)$$

В итоге получим:

$$N = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_i \cup \dots \cup N_n = \bigcup_i^n N_i, \quad (2)$$

$$Q = Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_i \cup \dots \cup Q_n = \bigcup_i^n Q_i, \quad (3)$$

где $p, k, i = \overline{1, n}$.

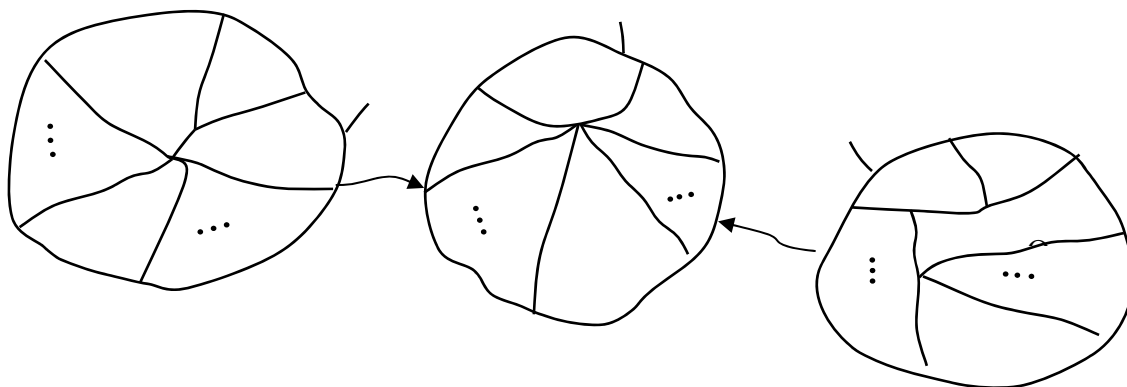


Рисунок 1 – Условная схема разбиения множеств

Будем полагать, что число элементов в указанных множествах конечно. Это ограничение позволило сделать следующие утверждения:

$$m(Q) = \sum_{i=1}^n m(Q_i), \quad (4)$$

$$m(N) = \sum_{i=1}^n m(N_i), \quad (5)$$

где $m(Q), m(N), m(Q_i), m(N_i)$ – соответственно мощности множеств Q, N, Q_i, N_i .

Учитывая (4), (5), перейдем к новым более удобным обозначениям:

$$M(Q) = Q, \quad m(N) = N, \quad m(Q_i) = Q_i, \quad m(N_i) = N_i. \quad (6)$$

В этом случае выражения (4), (5) примут вид:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad N = \sum_{i=1}^n N_i. \quad (7)$$

Проведем ранжирование полученных подмножеств

$$Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_i \leq \dots \leq Q_n \quad (8)$$

$$N_1 \leq N_2 \leq \dots \leq N_i \leq \dots \leq N_n \quad (9)$$

Введем понятие множества G :

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n\},$$

каждый элемент которого определяется по формуле:

$$g_i = \frac{Q_i}{N_i}, \quad (10)$$

где $i = \overline{1, n}$.

Элементы $g_1, g_2, \dots, g_n$ множества G по физическому смыслу определяют удельные электрические мощности (энергии, силы тока и т.п.) $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, приходящиеся соответственно на элементы $N_1, N_2, \dots, N_n$

Проведем исследование функции $Z(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_j, \dots, N_n)$ для попарно независимых переменных N_i и N_j ($i \neq j$) зафиксировав соответствующие значения $Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_i \leq \dots \leq Q_n$ ($Q_i = \text{const}, i, j = \overline{1, n}$) на локальный минимум:

$$Z(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) = \frac{Q_1}{N_1} + \frac{Q_2}{N_2} + \dots + \frac{Q_i}{N_i} + \dots + \frac{Q_n}{N_n} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Нахождение локального экстремума можно производить различными способами, применяя методы дифференциального исчисления [4–8]. В данном случае осуществим поиск условного экстремума функции в соотношении (11).

Для этого определим локальный минимум вспомогательной функции Лагранжа

$$F = F(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) = Z(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) + \lambda \varphi(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n), \quad (12)$$

где $\lambda = \text{const}$ – некоторый постоянный множитель. Функцию $\varphi = \varphi(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n)$ находим из уравнения (7):

$$\varphi = \varphi(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) = \sum_{i=1}^n N_i - N = N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots + N_n - N. \quad (13)$$

Учитывая (11) и (12), получим:

$$F = F(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) = \frac{Q_1}{N_1} + \frac{Q_2}{N_2} + \dots + \frac{Q_i}{N_i} + \dots + \frac{Q_n}{N_n} + \lambda(N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots + N_n - N). \quad (14)$$

Необходимые условия локального экстремума найдем, решив

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial N_1} = -\frac{Q_1}{N_1^2} + \lambda = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial N_2} = -\frac{Q_2}{N_2^2} + \lambda = 0, \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial F}{\partial N_i} = -\frac{Q_i}{N_i^2} + \lambda = 0, \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial F}{\partial N_j} = -\frac{Q_j}{N_j^2} + \lambda = 0, \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial F}{\partial N_n} = -\frac{Q_n}{N_n^2} + \lambda = 0, \\ \varphi(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n) = N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots + N_n - N \end{array} \right. \quad (15)$$

В итоге с учетом (15) получим единственную стационарную точку первого рода $K(N_{1c}, N_{2c}, \dots, N_{ic}, \dots, N_{nc}, \lambda)$, где

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{1c} = \sqrt{\frac{Q_1}{\lambda}} = \frac{N\sqrt{Q_1}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}}, \\ N_{2c} = \sqrt{\frac{Q_2}{\lambda}} = \frac{N\sqrt{Q_2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}}, \\ \dots\dots\dots \\ N_{ic} = \sqrt{\frac{Q_i}{\lambda}} = \frac{N\sqrt{Q_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}}, \\ \dots\dots\dots \\ N_{nc} = \sqrt{\frac{Q_n}{\lambda}} = \frac{N\sqrt{Q_n}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}}, \\ \sqrt{\lambda} = \frac{\sqrt{Q_1} + \sqrt{Q_2} + \dots + \sqrt{Q_i} + \dots + \sqrt{Q_n}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}}{N}, \\ N_{1c} + N_{2c} + \dots + N_{ic} + \dots + N_{nc} = N \end{array} \right. \quad (16)$$

Вопрос о существовании условного минимума определяется на основании изучения знака второго дифференциала функции Лагранжа

$$d^2F(N_{1c}, N_{2c}, \dots, N_{ic}, \dots, N_{kc}, \dots, N_{jc}, \dots, N),$$

что является достаточным условием нашего поиска.

Учитывая попарную независимость переменных N_i и N_j множества N , в этом случае применим формулу:

$$d^2y = \frac{\partial^2 F}{\partial N_1^2} dN_1^2 + \frac{\partial^2 F}{\partial N_2^2} dN_2^2 + \dots + \frac{\partial^2 F}{\partial N_i^2} dN_i^2 + \dots + \frac{\partial^2 F}{\partial N_n^2} dN_n^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 F}{\partial N_i^2} dN_i^2 \quad (17)$$

Из соотношения (15), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 F}{\partial N_1^2} = \frac{\partial}{\partial N_1} \left(-\frac{Q_1}{N_1^2} + \lambda \right) = \frac{2Q_1}{N_1^3} > 0, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial N_2^2} = \frac{\partial}{\partial N_2} \left(-\frac{Q_2}{N_2^2} + \lambda \right) = \frac{2Q_2}{N_2^3} > 0, \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial N_i^2} = \frac{\partial}{\partial N_i} \left(-\frac{Q_i}{N_i^2} + \lambda \right) = \frac{2Q_i}{N_i^3} > 0, \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial N_n^2} = \frac{\partial}{\partial N_n} \left(-\frac{Q_n}{N_n^2} + \lambda \right) = \frac{2Q_n}{N_n^3} > 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

Из (17) следует, что $\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 F}{\partial N_i^2} dN_i^2 > 0$, т.е. точки $K(N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n, \lambda)$ – точки

условного минимума.

Вычислим наименьшее значение функции $Z_{\min}(i)$ в найденной точке, используя формулы (16):

$$Z_{\min}(i) = Z(N_{1c}, N_{2c}, \dots, N_{ic}, \dots, N_{nc}) = \frac{Q_1}{N_{1c}} + \frac{Q_2}{N_{2c}} + \dots + \frac{Q_i}{N_{ic}} + \dots + \frac{Q_n}{N_{nc}} =$$

$$= \frac{(\sqrt{Q_1} + \sqrt{Q_2} + \dots + \sqrt{Q_i} + \dots + \sqrt{Q_n})}{N} \quad (19)$$

Соотношение (16) и (19) позволяют назвать полученный подход к поиску $Z_{\min}(i)$ «методом п–ок» с учетом того, что множества N и Q разделяются изначально на n произвольных частей.

Изучим динамику применения «метода п–ок». Для этого рассмотрим возможный диапазон изменения мощности множеств Q и N . Предположим, что в множестве Q происходит перераспределение элементов подмножеств $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ соответственно на величины $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_i, \dots, \Delta Q_n$ при условии, что суммарная мощность множества Q сохраняется, т.е. имеем:

$$\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0, \quad (20)$$

причем, если $\Delta Q > 0$, то мощность множества Q_i возрастает, если $\Delta Q < 0$ – убывает, при $\Delta Q = 0$ – не меняется.

Используя формулы (15), исследуем баланс $\Delta N_1, \Delta N_2, \dots, \Delta N_i, \dots, \Delta N_n$ соответственно элементов множеств $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n$:

$$\Delta N_{1c} = \frac{N\sqrt{Q_1 + \Delta Q_1}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i + \Delta Q_i}} - \frac{N\sqrt{Q_1}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}} \quad (21)$$

$$\Delta N_{2c} = \frac{N\sqrt{Q_2 + \Delta Q_2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i + \Delta Q_i}} - \frac{N\sqrt{Q_2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}} \quad (22)$$

$$\Delta N_{ic} = \frac{N\sqrt{Q_i + \Delta Q_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i + \Delta Q_i}} - \frac{N\sqrt{Q_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}} \quad (23)$$

$$\Delta N_{nc} = \frac{N\sqrt{Q_n + \Delta Q_n}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i + \Delta Q_i}} - \frac{N\sqrt{Q_n}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{Q_i}} \quad (24)$$

Суммируя выражения (21)–(24), получим:

$$\sum_{i=1}^n \Delta N_{ic} = 0. \quad (25)$$

«Метод n -ок» можно распространить, «вглубь» для каждого из подмножеств ΔQ_i , проведя соответствующие разбиения каждого из них на конечное число частей. Это свойство позволяет считать предлагаемую модель многоуровневой.

Выводы

1. Получена функция цели n независимых переменных на основе двух независимых множеств.
2. Приведено исследование указанной функции на локальный минимум с помощью поиска условного экстремума посредством метода Лагранжа. Получена соответствующая стационарная точка и найден минимум функции цели в этой точке.
3. Предложенный подход получивший название «метода n -ок», можно применять как многоуровневый при разбиении указанных множеств на подмножества меньшей мощности.
4. «Метод n -ок» имеет практическое применение в задачах оптимального распределения материальных ресурсов (электроэнергии, электрического тока и т.п.) в массиве потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурилич, И.Н. «Метод троек» – как один из приемов использования математического анализа для оптимизации распределения получателей ресурса в сфере потребления И.Н. Бурилич, Тютюнов, Д.Н., Л.И. Студеникина // Научно-технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» – ОГУ им. Тургенева, № 6(326) 2017. – С.160–167.
2. Федоров, С.С. Оптимальное распределение тепловой энергии среди массива потребителей на основе математического анализа / С.С. Федоров, Д.Н. Тютюнов, Л.И. Студеникина. – Промышленное и гражданское строительство. 2017. №6. – С.71–75.
3. Тютюнов Д.Н. Применение методов вещественного анализа для оптимального распределения ресурсов в массиве потребителей – «Метод двоек» / Д.Н. Тютюнов, Л.И. Студеникина, Е.А. Бойцова, Н.К. Зарубина, Н.А. Конорева. – Фундаментальные исследования. 2017. №9. Ч.2. – С. 362–366.
4. Тютюнов Д.Н. Функции нескольких переменных [Электронный ресурс]: учебное пособие / Д.Н. Тютюнов, Л.И. Студеникина, Е.В. Скрипкина. – Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск: ЮЗГУ, 2016. – 176.
5. Тютюнов, Д.Н. Неопределённый интеграл. Техника интегрирования / Д. Н. Тютюнов, Л. И. Студеникина. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 115 с.
6. Студеникина, Л.И. О единой платформе различных математических дисциплин / Л.И. Студеникина, Т.В. Шевцова. // Актуальные проблемы и перспективы преподавания математики. – 2012. – С.73–80.
7. Конорева Н.А. О проблемах преподавания высшей математики студентами заочного отделения технического вуза / Н.А. Конорева. // Актуальные проблемы и перспективы преподавания математики. – 2016. – С.37–40.
8. Шевцова Т.В. Проблемы формирования математических понятий / Т.В. Шевцова. // Актуальные проблемы и перспективы преподавания математики. – 2012. – С.91–97.

Бурилич Ирина Николаевна
ФГБОУ «Курский
государственный университет» г.
Курск
Кандидат технических наук,
доцент кафедры алгебры,
геометрии и ТОМ
305000, г.Курск, ул.Радищева, 33
E-mail: burili4@yandex.ru

Тютюнов Дмитрий Николаевич
ФГБОУ «Юго-Западный
государственный университет»
г. Курск
Кандидат технических наук,
доцент кафедры высшей
математики
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября,
94
E-mail: tjutjunov@mail.ru

Студеникина Лариса Ивановна
ФГБОУ «Юго-Западный
государственный университет»
г. Курск
Кандидат педагогических наук,
доцент кафедры высшей
математики
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября,
94
E-mail: SLI-kursk@yandex.ru

Машков Евгений Юрьевич
ФГБОУ «Юго-Западный
государственный университет»
г. Курск
Кандидат физико-математических наук,
ст.преподаватель кафедры высшей математики
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94
E-mail: mashkovevgen@yandex.ru

Конорева Наталья Александровна
ФГБОУ «Юго-Западный
государственный университет»
г. Курск
преподаватель кафедры высшей математики
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94
E-mail: belyhka@yandex.ru

I.N. BURILICH, D.N. TYUTYUNOV, L.I. STUDENIKINA, E.Yu. MASHKOV, N.A. KONOREVA

ONE OF THE OPTIONS FOR THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF ELECTRICITY CONSUMERS BASED ON SPECIFIED LIMITS

Abstract. *In the article the problem of formation of the massif of consumers of the electric power on the basis of the offered limits is considered. The task of optimization of the process of distribution of the capacities given from network depending on a number of customers is set. The mathematical model based on the analysis and properties of function of several independent real variables, leading to search of a local extremum of this function is offered. The main provisions of the method which has received the name «N-method» are based on the distribution of consumers of the electric power to some groups and are based on the existence of restrictions on consumption limits. As a criterion of optimality the conditional local minimum of objective function which represents the sum of the attitudes of some values of limits of energy resource towards the corresponding number of his consumers in the received groups is chosen. The necessary working formulas for the optimal distribution of electricity limits in the massif of consumers are obtained by the authors.*

Keywords: *formation of the massif of consumers, mathematical model, local minimum of objective function, stationary point, differential of Lagrange function.*

BIBLIOGRAPHY

1. Burilich, I.N. «Metod troek» – kak odin iz priyomov ispolzovaniya matematicheskogo analiza dlya optimizatsii raspredeleniya poluhateley resursa v sfere potrebleniya / I.N. Burilich, D.N. Tyutyunov, L.I. Studenikina // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii–OGU them. Turgenev – №6(326) 2017 – S. 160–167.
2. Fedorov, S.S., Optimalnoe raspredelenie teplovoy energii sredi massiva potrebiteley na osnove matematicheskogo analiza / S.S. Fedorov, D.N. Tyutyunov, L.I. Studenikina // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2017. – № 6 – S. 71–75.
3. Tyutyunov, D.N. Primeneniye metodov veshchestvennogo analiza dlya optimalnogo raspredeleniya resursov v massive potrebiteley – «Metod dvoyek», Tyutyunov D.N., Fedorov S.S., Boytsova Ye.A., Studenikina L.I., Zarubina N.K., Konoreva N.A., Gnezdilova O.A., Shchedrina G.G. // Fundamentalnyye issledovaniya. – 2017. – № 9 (chast 2) – S. 362–366.
4. Tyutyunov, D.N. Funktsii neskol'kikh peremennykh: uchebnoye posobiye / D.N. Tyutyunov, L.I. Studenikina, Ye.V. Skripkina // Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga», 2016. – 158s.
5. Tyutyunov, D.N. Neopredelionnyy integral. Tekhnika integrirovaniya. / D.N. Tyutyunov, L.I. Studenikina // Staryy Oskol: TNT. – 2016. – 115s.
6. Studenikina, L.I. O edinoi platforme razlikhnykh matematicheskikh distsiplin. / L.I. Studenikina, T.V. Shevtsova // Aktualnyye problemy i perspektivy prepodavaniya matematiki. – 2012. – S. 73–80.
7. Konoreva, N.A. O problemakh prepodavaniya vysshey matematiki studentam zaonogo otdeleniya tekhnicheskogo vuza. / N.A. Konoreva // Aktualnyye problemy i perspektivy prepodavaniya matematiki. – 2016. – S. 37–40.
8. Shevtsova, T.V. Problemy formirovaniya matematicheskikh poniaty. / T.V. Shevtsova // Aktualnyye problemy i perspektivy prepodavaniya matematiki. – 2012. – S. 91–97.

Burilich Irina Nikolaevna

Kursk State University, Kursk
Candidate of technical Sciences,
associate Professor of the
Department of algebra, geometry and
theory of teaching mathematics
305000, Kursk, Radischeva St., 33
E-mail: burili4@yandex.ru

Tutunov Dmitry Nikolaevich

Southwest State University, Kursk
Candidate of technical Sciences,
associate Professor of mathematics
305040, Kursk, 50 years of October
St., 94
E-mail: sli-kursk@yandex.ru

Studenikina Larisa Ivanovna

Southwest State University, Kursk
Candidate of pedagogics, associate
Professor of mathematics
305040, Kursk, 50 years of October
St., 94
E-mail: sli-kursk@yandex.ru

Mashkov Evgeniy Yurievich

Southwest State University, Kursk
Lecturer
305040, Kursk, 50 years of October
St., 94
E-mail: mashkovevgen@yandex.ru

Konoreva Natalia Aleksandrovna

Southwest State University, Kursk
Lecturer
305040, Kursk, 50 years of October
St., 94
E-mail: belyhka@yandex.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 78.01.81

Я.Н. ГУСЕНИЦА, А.В. МАЛАХОВ, Д.И. СТАРОВОЙТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ КОЛИЧЕСТВЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Аннотация. Работа направлена на решение задачи оптимального управления реализации натурных экспериментов военно-технических систем и своевременного окончания испытательного процесса. Предложен новый подход к оцениванию характеристик военно-технических систем, основанный на использовании генетических алгоритмов. Проведен вычислительный эксперимент над вариантами реализации генетического алгоритма для оценивания производительности космического аппарата наблюдения. Определен вариант генетического алгоритма, который в отличие от других, позволяет наиболее оперативно отыскивать экстремум целевой функции характеристики военно-технической системы.

Ключевые слова: военно-технические системы, испытания, натурные эксперименты, оценивание характеристик, поиск экстремума, генетический алгоритм.

Введение

Внедрению современных военно-технических систем самого различного назначения в эксплуатацию предшествует ряд этапов, начиная от выбора и обоснования облика, проектирования, создания опытного образца и заканчивая испытаниями, позволяющими оценить характеристики военно-технической системы.

В связи с этим неоспорима роль испытаний, позволяющих не только выявить особенности взаимодействия военно-технической системы с окружающей средой, но и получить информацию о дефектах. Наличие и анализ такой информации является необходимым условием в принятии обоснованных решений о возможных сроках доработки военно-технической системы, а также нужном объеме экономических, временных и людских ресурсов на устранение в них дефектов.

Однако в настоящее время объем испытаний военно-технических систем значительно сокращается. Этому способствует высокая стоимость проведения натурных экспериментов, ограниченность полигонных испытаний и полная невозможность проведения боевых работ на местах размещения военно-технических систем. Особенно остро данный вопрос стоит при проведении натурных экспериментов над уникальными военно-техническими системами, т.к. реализация полного объема испытаний может привести к безвозвратному снижению требуемых значений характеристик военно-технических систем.

Поэтому, как указано в [17], работы, направленные на оптимальное управление реализации натурных экспериментов военно-технических систем и своевременного окончания испытательного процесса, являются весьма актуальными [1, 4, 9–11, 13, 15, 22–24].

Постановка задачи

Пусть дана некоторая военно-техническая система, состояние которой определяется значениями параметров $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$. Каждый из параметров является случайной величиной, которая принимает конечное множество значений $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i\beta}, \dots, x_{il_i}\}$. Число различных состояний военно-технической системы равно $N = \prod_{i=1}^n l_i$.

Значение характеристики военно-технической системы $F(x)$ для любого возможного ее состояния $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ определяется на основе натурального эксперимента.

Требуется найти такое состояние военно-технической системы $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*)$, при котором функция $F(x)$ принимала бы экстремальное значение.

В такой постановке задача, вообще говоря, может быть решена только путем полного перебора значений параметров военно-технической системы и анализом ее характеристики $F(x)$. Однако на практике такой перебор невозможен из-за временных и экономических ограничений на проведение эксперимента. Можно перебирать лишь ограниченное число M различных вариантов ($M \ll N$).

Другим способом решения задачи является применение аналитических методов оптимизации, основанных на поиске локального экстремума путем «продвижения» по график функции $F(x)$ в направлении, которое определяется градиентом [2, 3, 6, 7, 8, 14, 21, 26]. В то же время, одни параметры военно-технической системы могут быть дискретными величинами, а другие непрерывными, что существенно ограничивает возможности использования аналитических методов оптимизации.

Еще одним способом решения задачи является использование генетических алгоритмов, основанных на эвристическом подборе, комбинировании и вариации искомых параметров, аналогичных естественному отбору в природе. Генетические алгоритмы кодируют параметры, реализуют операции над вариантами кодовых последовательностей, используют наименьшее количество априорной информации, что обуславливает их значительное преимущество над классическими методами оптимизации в решении самых разнообразных прикладных задач [19, 20].

Вместе с тем, генетические алгоритмы так и не нашли широкого применения для решения задач, связанных с управлением реализацией натуральных экспериментов и своевременного окончания испытательного процесса.

Поэтому целью данной статьи является исследование генетических алгоритмов для оценивания характеристик военно-технических систем при ограниченном количестве натуральных экспериментов.

Структура базового генетического алгоритма

Базовый генетический алгоритм (также называемый элементарным или простым) разработан американским ученым Джоном Генри Холландом и состоит из следующих шагов, представленных на рисунке 1 [25].

Шаг 1. Формирование исходной популяции.

Популяция представляет собой конечное множество особей, т.е. альтернативных вариантов решения задачи. Каждая особь состоит из одной или нескольких хромосом, которые соответствуют исследуемым параметрам. Хромосомы являются упорядоченными последовательностями генов. Каждый ген представляет собой атомарный элемент хромосома и имеет определенное значение, которое называется аллель.

Формирование исходной популяции заключается в выборе заданного количества особей и отборе из них случайным образом тех, которые будут выступать в качестве родителей при формировании новой популяции.

Отбор родителей осуществляется следующим образом. Каждой особи сопоставляется случайное число на отрезке $[1, m]$, где m – количество особей в популяции. Затем с помощью датчика случайных чисел определяются искомые особи.

Шаг 2. Кодирование аллелей.

В базовом генетическом алгоритме применяется двоичное кодирование аллелей, которое основано на известном способе записи десятичных чисел в двоичной системе, где каждый бит двоичного кода соответствует очередной степени цифры «2». В общем виде произвольное неотрицательное число $a_n a_{n-1} \dots a_0 a_{-1} \dots a_{-m}$ может быть представлено следующим образом:

$$a_n a_{n-1} \dots a_0 a_{-1} \dots a_{-m} = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \dots + a_0 2^0 + \dots + a_{-m} 2^{-m}.$$

Кроме того, дополнительно используется первый разряд для представления знака числа. Если число отрицательное, то первый разряд равен «1». Если число положительное, то – «0».

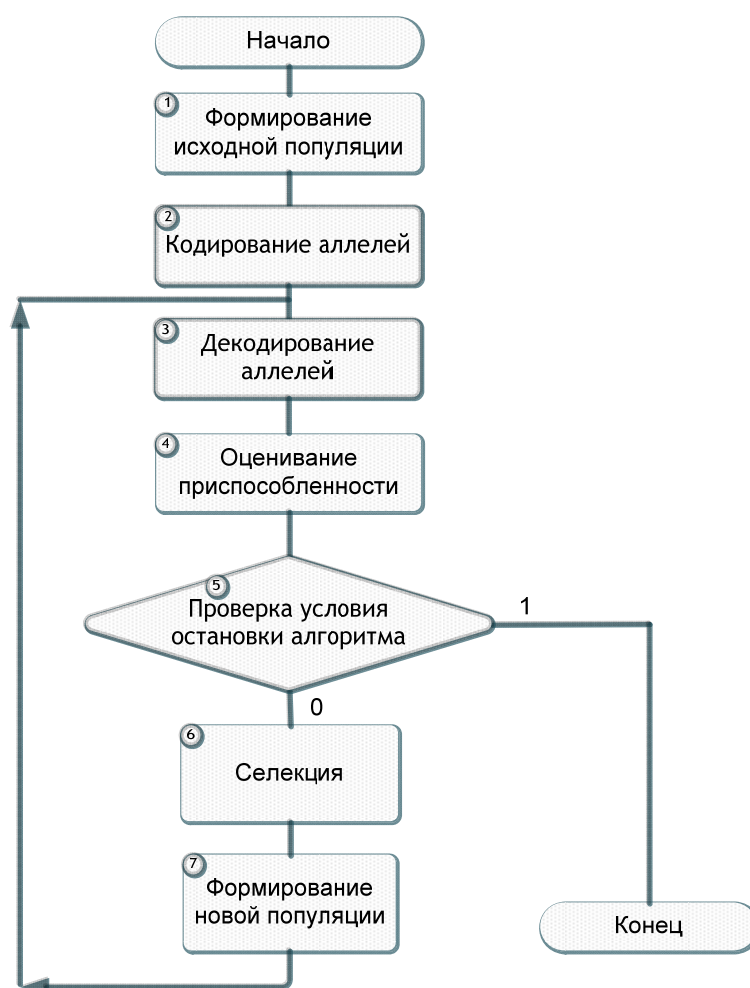


Рисунок 1 – Схема базового генетического алгоритма

Другим способом кодирования аллелей является применение кода Грея, который характеризуется тем, что двоичные последовательности, соответствующие двум последовательным целым числам, отличаются только одним битом.

Шаг 3. Декодирование аллелей.

Данный шаг основан на получении аллелей в десятичной системе счисления из двоичных чисел или кода Грея.

Шаг 4. Оценивание приспособленности.

Данный шаг сводится к расчету функции приспособленности для каждой особи в исходной популяции. В качестве функции приспособленности выступает целевая функции оптимизации. Чем больше значение этой функции, тем выше «значимость» особи. Форма функции приспособленности зависит от характера решаемой задачи. Предполагается, что функция приспособленности всегда принимает неотрицательные значения и, кроме того, для решения оптимизационной задачи требуется максимизировать или минимизировать эту функцию.

Оценивание приспособленности осуществляется совместно с масштабированием функции приспособленности, которая предохраняет популяцию от доминирования неоптимальной хромосомы и тем самым предотвращает преждевременную сходимость генетического алгоритма. Масштабирование заключается в соответствующем

преобразовании функции приспособленности f , в роли которой выступает целевая функция оптимизации, к форме f . Различают три основных метода масштабирования [16]:

- линейное масштабирование;
- сигма–отсечение;
- степенное масштабирование.

Линейное масштабирование заключается в линейном преобразовании функции приспособленности f к форме f' :

$$f' = af + b,$$

где a, b – константы, которые подбираются таким образом, чтобы среднее значение функции приспособленности после масштабирования было равно ее среднему значению функции приспособленности до масштабирования, а максимальное значение функции приспособленности после масштабирования было кратно ее среднему значению.

Сигма–отсечение – метод преобразования функции приспособленности согласно выражению

$$f' = f + (\bar{f} - c \cdot \sigma),$$

где $\bar{f}$ – среднее значение функции приспособленности по всей популяции;

c – малое натуральное число (как правило $[1 \dots 5]$);

σ – стандартное отклонение функции приспособленности популяции.

Степенное масштабирование представляет собой метод масштабирования, при котором функции преобразовывается согласно выражению

$$f' = f^r,$$

где r – число близкое 1.

Значение r обычно подбирается эмпирически с учетом специфики решаемой задачи.

Шаг 5. Проверка условия останова алгоритма.

Критерием окончания процесса может служить получение такой особи, функция приспособленности у которой находится в области некоторого экстремума. Между тем следует понимать, что области экстремума может быть лживой и тогда увеличение количества итераций не приведет к достижению сходимости с установленной точностью. В такой ситуации бывает полезным использование в качестве критерия окончания процесса заданное количество итераций. Если условие останова выполнено, то происходит окончание генетического алгоритма. В противном случае осуществляется переход на шаг 6.

Шаг 6. Селекция.

На данном шаге осуществляется выбор тех особей, которые будут участвовать в создании потомков для следующей популяции. Такой выбор осуществляется согласно принципу естественного отбора и теореме Холланда, по которому шансы на участие в создании новой популяции имеют особи с наибольшими значениями функции приспособленности.

Существует несколько методов селекции. Наиболее распространенными из них являются:

- турнирный отбор;
- метод рулетки.

При турнирном отборе из популяции, содержащей L особей, выбираются случайным образом l особей, и лучшая из них записывается в промежуточный массив. Эта операция повторяется T раз. Преимуществом данного метода является то, что он не требует дополнительных вычислений.

В методе рулетки особи отбираются с помощью K «запусков» рулетки. Колесо рулетки содержит по одному сектору для каждой k -й особи. Размер k -го сектора пропорционален вероятности попадания в новую популяцию $P(k)$, вычисляемой по формуле:

$$P(k) = \frac{f(k)}{\sum_{k=1}^K f(k)},$$

где $f(k)$ – значение функции приспособленности k -й особи.

Таким образом, при использовании метода рулетки особи с более высоким значением функции приспособленности будут чаще выбираться, чем особи с низким значением функции приспособленности.

Шаг 7. Формирование новой популяции.

Данный шаг основан на применении генетических операторов к отобранным на предыдущем шаге хромосомам. На практике применяются два основных генетических оператора:

- оператор скрещивания;
- оператор мутации.

Оператор скрещивания заключается в том, что особи случайным образом объединяются в пары и обмениваются частями аллель. Существуют следующие методы скрещивания [18]:

- одноточечный кроссинговер;
- двухточечный кроссинговер;
- однородный кроссинговер;
- триадный кроссинговер;
- перетасовочный кроссинговер.

Одноточечный кроссинговер моделируется следующим образом. Пусть имеются две родительские особи. Случайным образом определяется точка внутри хромосомы. Данная точка определяет разрыв, в котором обе хромосомы делятся на две части и обмениваются ими.

В двухточечном кроссинговере рассматриваются как циклы, которые формируются соединением концов линейной хромосомы вместе. Для замены сегмента одного цикла сегментами другого требуется выбор двух точек разреза. В этом представлении, одноточечный кроссинговер рассматривается кроссинговером с двумя точками, но с одной зафиксированной точкой разреза. Следовательно, двухточечный кроссинговер решает ту же самую задачу, что и одноточечный, но более полно.

Однородный кроссинговер, в отличие от представленных выше методов, создает маску особи. Маска содержит потенциальную точку кроссинговера и имеет ту же длину, что и скрещиваемые особи. Маска создается путем выбора натурального числа, входящего в диапазон всевозможных значений особи. Однородный кроссинговер очень похож на многоточечный, но строка случайных битовых значений в нем длиннее. Это гарантирует, что в потомках будут чередоваться короткие строки особей, которые выступают в роли родителей.

Триадный кроссинговер отличается от однородного тем, что после отбора пары родителей из остальных членов популяции случайным образом выбирается особь, используемая в дальнейшем в качестве маски. Затем гены первого родителя сравниваются с генами маски. Если гены одинаковы, то они передаются первому потомку, в противном случае на соответствующие позиции хромосомы потомка переходят гены второго родителя. Хромосома второго потомка отличается от хромосомы первого тем, что на тех позициях, где у первого потомка стоят гены первого родителя, у второго потомка стоят гены второго родителя и наоборот.

Перетасовочный кроссинговер предполагает, что особи случайным образом обмениваются генами. Затем выбирают точку для одноточечного кроссинговера и проводят обмен частями хромосом. После скрещивания созданные потомки вновь тасуются. Таким образом, при каждом кроссинговере создаются не только новые потомки, но и модифицируются родители, что позволяет сократить число операций по сравнению с однородным кроссинговером. По сути перетасовочный кроссинговер можно представить, как случайное скрещивание случайным методом.

Таким образом, методы скрещивания позволяют генерировать новое решение на основе имеющихся, комбинируя их части. Поэтому число различных решений, которые могут быть получены оператором скрещивания при использовании одной и той же пары

готовых решений, ограничено. Соответственно, пространство, которое генетический алгоритм может «покрыть», используя лишь оператор скрещивания, жестко зависит от состава популяции. Чем разнообразнее популяция, тем больше пространства «покрытия». При обнаружении локального экстремума соответствующий ему набор хромосом будет стремиться занять все позиции в популяции, и алгоритм может сойтись к ложному оптимуму. Поэтому в генетических алгоритмах важную роль играют мутации.

Оператор мутации с определенной вероятностью вносит произвольное изменение в гены хромосомы. Это приводит к инвертированию значений отобранных генов. В результате популяция становится более разнообразной, что позволяет расширить область поиска решения экстремума целевой функции. Значение вероятности оператора мутации играет важную роль в оперативности генетического алгоритма. Слишком большое значение вероятности может привести к исключению какого-либо значимого гена из популяции. Слишком малое значение вероятности может привести к увеличению времени поиска экстремума целевой функции [5].

Различают следующие виды мутации:

- с заменой случайного гена противоположным;
- с удалением случайного гена из хромосомы;
- с обменом местами соседних генов.

Особь, полученная в результате применения генетических операторов к исходной популяции, включается в состав новой популяции, которая становится текущей для данной итерации генетического алгоритма.

После применения генетических операторов осуществляется переход на шаг 3.

Генетический алгоритм оценивания характеристик военно-технических систем

Допустим, необходимо оценить производительность космического аппарата наблюдения, в качестве показателя которого выступает среднее количество потенциальных объектов съемки, появляющихся в единицу времени в полосе обзора за один виток. Математическая модель расчета производительности имеет следующий вид [12]:

$$f = \frac{N \cdot V \cdot \sqrt{R_3} \cdot e^{-0,5\left(\frac{\varphi}{D}\right)^2}}{\sqrt{2\pi D} (R_3 + H)^{1,5}},$$

где N – количество объектов на одном витке;
 V – первая космическая скорость, 7 910 м/с;
 R_3 – радиус Земли, 6 357 000 м;
 φ – среднее значение широты участка полосы обзора;
 D – дисперсия широты потенциальных объектов съемки;
 H – высота орбиты.

Пусть количество объектов на одном витке равно $N=50$, дисперсия широты потенциальных объектов съемки $D=0,16$ м². Необходимо найти такую высоту орбиты и среднее значение широты участка полосы обзора космического аппарата, если H может изменять в пределах от 360 до 640 км, а φ – от 4,7 до 28,3 км

Решение сформулированной задачи может быть реализовано с помощью генетического алгоритма. При этом успех выполнения генетического алгоритма зависит от методов реализации его отдельных этапов.

На рисунке 2 представлена схема методов реализации этапов генетического алгоритма.

Анализ данной схемы позволяет определить все возможные варианты реализации генетического алгоритма, число которых достигает 180.

Для сравнительного анализа данных вариантов разработана программа, диалоговое окно которой представлено на рисунок 3.

В качестве критерия сравнения в программе используется среднее относительное количество итераций, за которое осуществляется поиск экстремума тестовой функции.

Результаты применения программы приведены в виде графиков. На рисунке 4 приведены зависимости среднего относительного количества итераций, за которые найден экстремум целевой функции, относительно числа родителей для каждого варианта реализации генетического алгоритма.



Рисунок 2 – Схема методов реализации этапов генетического алгоритма

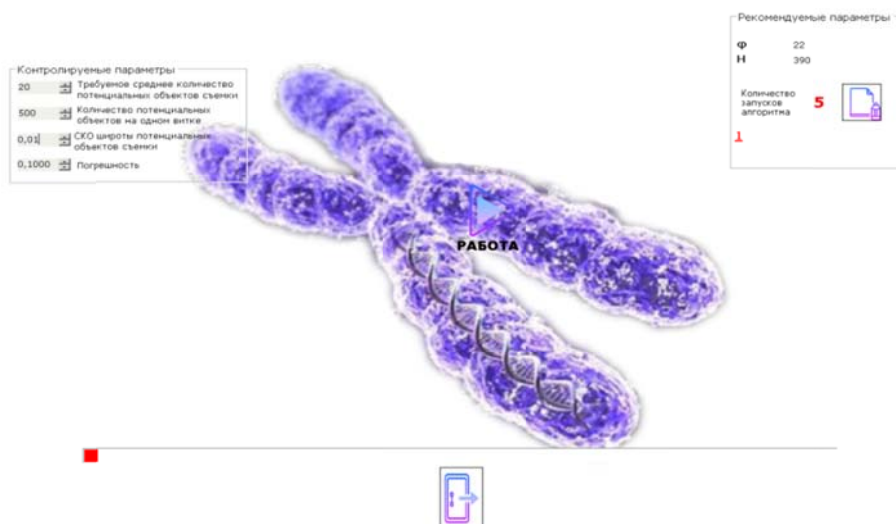


Рисунок 3 – Программа анализа вариантов реализации генетического алгоритма

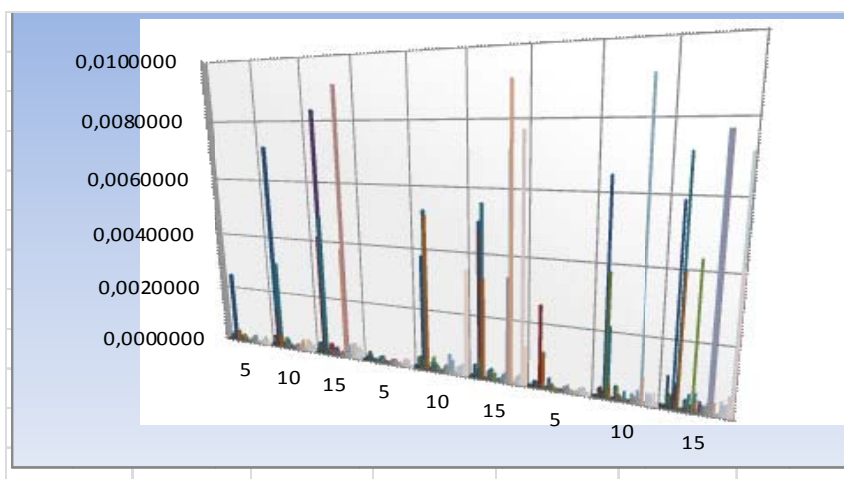


Рисунок 4 – Зависимости относительного количества итераций, за которые найден экстремум целевой функции, относительно числа родителей для каждого варианта реализации генетического алгоритма

Аналогично на рисунке 5 представлены зависимости относительного количества итераций, за которые найден экстремум целевой функции, относительно вероятностей мутации для каждого варианта реализации генетического алгоритма.

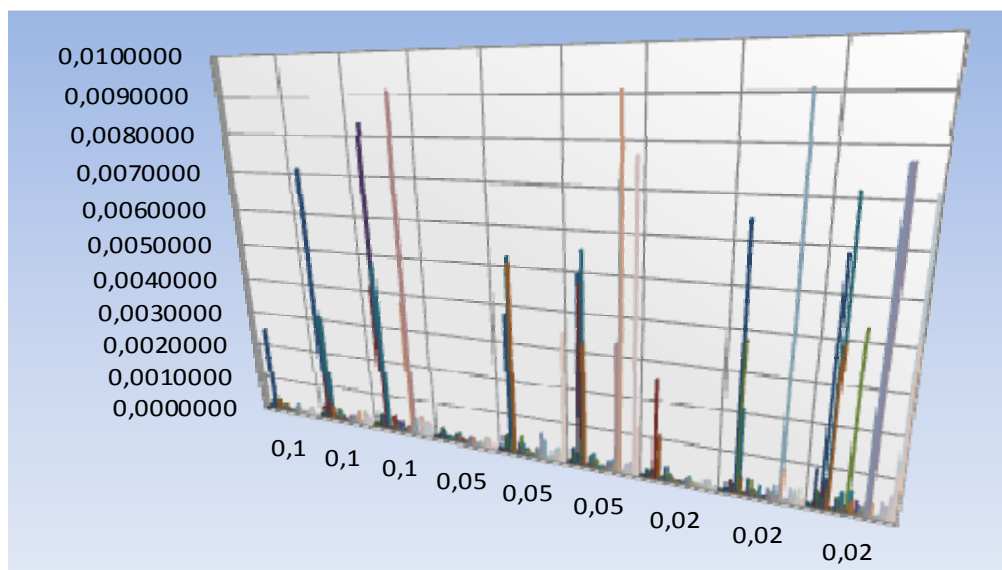


Рисунок 5 – Зависимости относительного количества итераций, за которые найден экстремум целевой функции, относительно вероятностей мутации для каждого варианта реализации генетического алгоритма

Анализ представленных данных показывает, что среди всех вариантов реализации генетического алгоритма наиболее оперативным является следующий:

Шаг 1. Формирование исходной популяции из 15 особей.

Шаг 2. Двоичное кодирование аллелей.

Шаг 3. Получение аллелей в десятичной системе счисления из двоичных чисел.

Шаг 4. Оценивание приспособленности с использованием сигма-отсечения. При этом коэффициент s в функции масштабирования равен 3.

Шаг 5. Проверка условия остановки алгоритма.

Шаг 6. Селекция с использованием турнирного отбора.

Шаг 7. Формирование новой популяции с использованием одноточечного кроссинговера и мутацией с вероятностью 0,1.

Заключение

Таким образом, в работе представлен новый подход к оцениванию характеристик военно-технических систем, основанный на использовании генетических алгоритмов. Проведен вычислительный эксперимент над вариантами реализации генетического алгоритма для оценивания производительности космического аппарата наблюдения. Определен вариант генетического алгоритма, который в отличие от других, позволяет наиболее оперативно отыскивать экстремум целевой функции характеристики военной технической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ардашов А.А., Арсеньев В.Н., Силантьев С.Б. Оценивание характеристик надежности сложной системы при ограниченном объеме экспериментальных данных / А.А. Ардашов, В.Н. Арсеньев, С.Б. Силантьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 197–201.
2. Витюк В.Л., Миронов Е.А., Севастьянов Д.А., Шестопалова О.Л. Определение оптимального варианта развития систем телекоммуникационного обеспечения эксплуатации и применения ракетно-космических комплексов в нечетко заданных условиях // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 132.

3. Гусеница Я.Н., Смагин В.А., Масленников С.А., Чернов И.В. Оптимальное гарантированное вероятностное квантование окружности равными дугами для перспективной аэрофотосъемки // *Информация и космос*. 2018. № 1. С. 106–110.
4. Гусеница Я.Н. Метод оценивания стохастического подобию систем на основе энтропийного анализа // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2017. № 9–10 (111–112). С. 13–17.
5. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 312 с.
6. Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // *Труды СПИИРАН*. 2012. № 1 (20). С. 165–185.
7. Дмитриев А.К., Кравцов А.Н. Синтез программы распознавания информационных сообщений на основе принципа согласованного оптимума // *Авиакосмическое приборостроение*. 2008. № 6. С. 50–57.
8. Евстигнеев Н.А., Емельянов В.М., Дорохов А.Н. Оптимальное оценивание квазисистематических составляющих ошибок навигационных систем // *Информация и космос*. 2010. № 2. С. 22–27.
9. Затылкин А.В., Голушко Д.А., Лысенко А.В. Методика исследования радиоэлектронных средств опытно-теоретическим методом на ранних этапах проектирования // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2012. № 7 (38). С. 91–96.
10. Козлов Н.Н. Особенности современной методологии испытаний систем вооружения воздушно-космической обороны / Н.Н. Козлов, В.П. Красный, А.В. Решетников // *Военная мысль*. 2015. № 6. С. 42–50.
11. Кузнецов В.В., Трухачев В.И. Особенности современной методологии испытаний систем вооружения воздушно-космической обороны // *Сборник научных трудов «Теория, постановка и результаты агроинженерного эксперимента» Воронежского государственного аграрного университета*. 1999. С. 9–15.
12. Куренков В.И. Методы исследования эффективности ракетно-космической техники: электрон. учеб. пособие / В.И. Куренков, М.Ю. Гоголев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012.
13. Любарчук Ф.Н., Елисеев А.П. Концепция научно-методических положений испытаний реактивных снарядов в условиях ограниченности временных и финансовых ресурсов // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2017. № 1 (96). С. 130–135.
14. Малахов А.В., Гусеница Я.Н., Сысоев Д.О., Сыроватский Д.В. Научно-методический подход к оптимальному распределению мобильных метрологических комплексов для метрологического обслуживания средств измерений в местах штатной эксплуатации // материалы научно-методических трудов II Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники Войск противовоздушной и противоракетной обороны, Космических войск Воздушно-космических сил». 2017. С. 128–131.
15. Маслов Г.А., Митенков В.Б. Оценка вибрационных характеристик летательного аппарата с помощью высокомоментной статистики при ограниченном объеме экспериментов // *Вестник Московского авиационного института*. 2014. Т. 21. № 2. С. 13–17.
16. Матвеев М.Г., Свиридов А.С., Алейникова Н.А. Методы и модели искусственного интеллекта. Применение в экономике: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2008. – 448 с.
17. Найденов В.Г., Крупский К.А., Бочкарев А.В. Методический подход к оценке потребного количества натурных экспериментов при проведении испытаний сложных образцов вооружения, военной и специальной // *Вооружение и экономика*. 2015. № 1 (30). С. 4–11.
18. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
19. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
20. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
21. Смагин В.А., Шерстобитов С.А., Ширямов О.А. Определение гарантированной функции распределения величины кванта в задаче квантования информации // *Информация и космос*. 2016. № 2. С. 72–76.
22. Слатин В.В. Метод оценки сходимости процессов системы наведения и ее математической модели в условиях ограниченного числа натурных испытаний // *Сборник докладов «Авиационные системы в XXI веке»*. 2017. С. 182–189.
23. Шаракшанэ А.С., Жедезнов И.Г. Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974. – 184 с.
24. Шестихин В.И., Салтанов П.Я., Якубовский С.В. Опыт-теоретический метод испытаний системы предупреждения о ракетном нападении // *Военная мысль*. 2015. № 6. С. 37–41.
25. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. – Cambridge: MIT Press, 1992. – 225 p.
26. Soldatenko V.S. Model of optimum planning of civil engineering in the settlement territory // *Advanced Materials Research*. 2014. Т. 945–949. С. 3069–3077.

Гусеница Ярослав Николаевич
ФГБВОУ ВО «Военно–
космическая академия имени
А.Ф.Можайского», г. Санкт–
Петербург
Кандидат технических наук,
преподаватель кафедры
метрологического обеспечения
ВВСТ
197198, г. Санкт–Петербург, ул.
Ждановская, д.13
Тел. 8 (981) 831–50–29
E–mail: yaromir226@mail.ru

**Малахов Александр
Владимирович**
ФГБУ «Главный научный
метрологический центр»
Минобороны России, 1 филиал,
г. Москва
Кандидат технических наук,
начальник отдела
123007, г. Москва, Хорошевское
шоссе, д. 76 В
Тел. 8 (919) 722–12–02
E–mail: sanya–mall@yandex.ru

Старовойтов Дмитрий Игоревич
ФГБВОУ ВО «Военно–
космическая академия имени
А.Ф.Можайского», г. Санкт–
Петербург
Курсант
197198, г. Санкт–Петербург, ул.
Ждановская, д.13
Тел. 8(999)536–27–51
E–mail: trall.95@mail.ru

Ya.N. GUSENITSA, A.V. MALAKHOV, D.I. STAROVOYTOV

RESEARCH OF GENETIC ALGORITHMS FOR ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF MILITARY AND TECHNICAL SYSTEMS AT LIMITED NUMBER OF NATURAL EXPERIMENTS

Abstract. *Work is directed on solution of problem of optimum control of implementation of natural experiments of military and technical systems and the timely end of test process. The new approach to estimation of characteristics of military and technical systems based on use of genetic algorithms is offered. Computing experiment with options of implementation of the genetic algorithm for estimation of productivity of the spacecraft of supervision is made. The version of the genetic algorithm which unlike others, allows to find most quickly extremum of target function of the characteristic of military and technical system is defined.*

Keywords: *military and technical systems, tests, natural experiments, estimation of characteristics, search of an extremum, genetic algorithm.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ardashov A.A., Arsenev V.N., Silantev S.B. Ocenivanie harakteristik nadezhnosti slozhnoj sistemy pri ogranichenom ob»eme ehksperimentalnyh dannyh / A.A. Ardashov, V.N. Arsenev, S.B. Silantev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. 2016. T. 59. № 3. S. 197–201.
2. Vityuk V.L., Mironov E.A., Sevastyanov D.A., SHestopalova O.L. Opredelenie optimalnogo varianta razvitiya sistem telekommunikacionnogo obespecheniya ehkspluatatsii i primeneniya raketno–kosmicheskikh kompleksov v nechetko zadannyh usloviyah // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. № 1–1. S. 132.
3. Gusenica YA.N., Smagin V.A., Maslennikov S.A., CHernov I.V. Optimalnoe garantirovannoe veroyatnostnoe kvantovanie okruzhnosti ravnymi dugami dlya perspektivnoj aehrofotos»emki // Informaciya i kosmos. 2018. № 1. S. 106–110.
4. Gusenica YA.N. Metod ocenivaniya stohasticheskogo podobiya sistem na osnove ehntropijnogo analiza // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2017. № 9–10 (111–112). S. 13–17.
5. Dzhons M.T. Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyah. – M.: DMK Press, 2013. – 312 s.
6. Dorozhko I.V., Osipov N.A. Metodika sinteza optimalnyh strategij diagnostirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ob»ektami s ispolzovaniem apriornoj informacii // Trudy SPIIRAN. 2012. № 1 (20). S. 165–185.
7. Dmitriev A.K., Kravcov A.N. Sintez programmy raspoznavaniya informacionnyh soobshchenij na osnove principa soglasovannogo optimuma // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2008. № 6. S. 50–57.
8. Evstigneev N.A., Emelyanov V.M., Dorohov A.N. Optimalnoe ocenivanie kvazisistematicheskikh sostavlyayushchih oshibok navigacionnyh sistem // Informaciya i kosmos. 2010. № 2. S. 22–27.
9. Zatylnik A.V., Golushko D.A., Lysenko A.V. Metodika issledovaniya radioehlektronnyh sredstv opytно–teoreticheskim metodom na rannih etapah proektirovaniya // Vestnik Samarskogo universiteta. Aehrokozmoshicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie. 2012. № 7 (38). S. 91–96.
10. Kozlov N.N. Osobennosti sovremennoj metodologii ispytaniy sistem vooruzheniya vozdušno–kosmicheskoy oborony / N.N. Kozlov, V.P. Krasnyj, A.V. Reshetnikov // Voennaya mysl. 2015. № 6. S. 42–50.

11. Kuznecov V.V., Truhachev V.I. Osobennosti sovremennoj metodologii ispytaniy sistem vooruzheniya vozdušno–kosmicheskoy oborony // Sbornik nauchnykh trudov «Teoriya, postanovka i rezul'taty agroinzhenerenogo ehksperimenta» Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 1999. S. 9–15.
12. Kurenkov V.I. Metody issledovaniya ehffektivnosti raketno–kosmicheskoy tekhniki: ehlektron. ucheb. posobie / V.I. Kurenkov, M.YU. Gogolev. – Samara: Samar. gos. aehrokosm. un–t im. S.P. Koroleva (nac. issled. un–t), 2012.
13. Lyubarchuk F.N., Eliseev A.P. Konceptiya nauchno–metodicheskikh polozheniy ispytaniy reaktivnykh snaryadov v usloviyakh ogranichenosti vremennykh i finansovykh resursov // Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artillerijskikh nauk. 2017. № 1 (96). S. 130–135.
14. Malahov A.V., Gusenitsa YA.N., Sysoev D.O., Syrovatskiy D.V. Nauchno–metodicheskij podhod k optimalnomu raspredeleniyu mobilnykh metrologicheskikh kompleksov dlya metrologicheskogo obsluzhivaniya sredstv izmereniy v mestakh shtatnoj ehkspluatacii // materialy nauchno–metodicheskikh trudov II Vserossiyskoy nauchno–prakticheskoy konferencii «Aktualnye voprosy razvitiya vooruzheniya, voennoj i specialnoj tekhniki Vojsk protivovozduшной i protivoraketnoj oborony, Kosmicheskikh vojsk Vozdušno–kosmicheskikh sil». 2017. S. 128–131.
15. Maslov G.A., Mitenkov V.B. Ocenka vibracionnykh harakteristik letatel'nogo apparata s pomoshchyu vysokomomentnoj statistiki pri ogranichenom ob»eme ehksperimentov // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. 2014. T. 21. № 2. S. 13–17.
16. Matveev M.G., Sviridov A.S., Alejnikova N.A. Metody i modeli iskusstvennogo intellekta. Primenenie v ehkonomike: ucheb. posobie. – M.: Finansy i statistika; INFRA–M, 2008. – 448 s.
17. Najdenov V.G., Krupskij K.A., Bochkarev A.V. Metodicheskij podhod k ocenke potrebnogo kolichestva naturnykh ehksperimentov pri provedenii ispytaniy slozhnykh obrazcov vooruzheniya, voennoj i specialnoj // Vooruzhenie i ehkonomika. 2015. № 1 (30). S. 4–11.
18. Panchenko T.V. Geneticheskie algoritmy: uchebno–metodicheskoe posobie; pod red. YU.YU. Tarasevicha. – Astrahan: Izdatelskij dom «Astrahanskij universitet», 2007. – 87 s.
19. Rutkovskij L. Metody i tekhnologii iskusstvennogo intellekta. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2010. – 520 s.
20. Rutkovskaya D., Pilinskij M., Rutkovskij L. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2006. – 452 s.
21. Smagin V.A., SHerstobitov S.A., SHiryamov O.A. Opredelenie garantirovannoj funkcii raspredeleniya velichiny kvanta v zadache kvantovaniya informacii// Informaciya i kosmos. 2016. № 2. S. 72–76.
22. Slatin V.V. Metod ocenki skhodimosti processov sistemy navedeniya i ee matematicheskoy modeli v usloviyakh ogranichenogo chisla naturnykh ispytaniy // Sbornik dokladov «Aviacionnye sistemy v XXI veke». 2017. S. 182–189.
23. SHarakshaneh A.S., ZHedeznov I.G. Ispytaniya slozhnykh sistem. – M.: Vysshaya shkola, 1974. – 184 s.
24. SHestihin V.I., Saltanov P.YA., YAkubovskij S.V. Opytno–teoreticheskij metod ispytaniy sistemy preduprezhdeniya o raketnom napadenii // Voennaya mysl. 2015. № 6. S. 37–41.
25. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence. – Cambridge: MIT Press, 1992. – 225 p.
26. Soldatenko V.S. Model of optimum planning of civil engineering in the settlement territory // Advanced Materials Research. 2014. T. 945–949. C. 3069–3077.

Gusenitsa Yaroslav Nikolaevich

FSBEI HPE «Military space Academy named after A. F. Mozhaisky», Saint–Petersburg
Candidat of Technical Sciences, lecturer of the Department of metrological support of VVT
197198, Saint–Petersburg, Zhdanovskaya str., 13
Phone: 8 (981) 831–50–29
E–mail: yaromir226@mail.ru

Malakhov Alexander Vladimirovich

Fgbu «Main scientific metrological center» Ministry of defense of Russia, 1 branch, Moscow
Candidat of Technical Sciences, head of Department
123007, Moscow, Khoroshevskoe sh, d. 76 B
Phone. 8 (919) 722–12–02
E–mail: sanya–mall@yandex.ru

Starovoitov Dmitry Igorevich

FSBEI HPE «Military space Academy named after A. F. Mozhaisky», Saint–Petersburg
Cadet
197198, Saint–Petersburg, Zhdanovskaya str., 13
Phone. 8(999)536–27–51
E–mail: trall.95@mail.ru

УДК 621.3

В.Г. ЛИСИЧКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ АНАЛИЗА

Аннотация. Статья посвящена исследованиям в области совершенствования частотных методов резонансного контроля. Для повышения универсальности приборов резонансного контроля используется линейная частотная модуляция сигнала, возбуждающего измерительный преобразователь. Выполнены аналитические и экспериментальные исследования процессов контроля, позволяющие оценить дополнительную погрешность измерений, возникающую от «сноса» резонансной частоты, и намечены пути уменьшения этой погрешности.

Ключевые слова: резонансный контроль, точность измерений, линейная частотная модуляция, «снос» резонансной частоты.

Введение

В условиях интенсификации производства и необходимости постоянного совершенствования технологических процессов существенно возрастает значение измерений электрических и неэлектрических параметров, определяющих свойства различных сред, веществ и материалов. Современные методы контроля, основанные на применении высокочастотных сигналов, подаваемых на индуктивные и емкостные измерительные преобразователи с использованием явления резонанса в электрических цепях, занимают значительное место среди других видов измерений. Применение емкостных преобразователей позволяет реализовать измерения диэлектрических свойств и влажности сыпучих материалов и различных веществ, а также контроль уровня жидкости и толщины изделий [1]. С помощью вихретоковых и индуктивных преобразователей можно проводить измерения толщины покрытий материалов и изделий, электропроводности и магнитной проницаемости различных сред, реализовать контроль скоростей, угловых и линейных перемещений, выполнять дефектоскопию изделий из металла и других материалов [2].

Для уменьшения влияния мешающих факторов, влияющих на достоверность резонансного контроля, применяют различные методы, большинство из которых основаны на применении многопараметровых подходов и использовании линейной частотной модуляции. Однако точность таких устройств ограничивается тем, что при линейном изменении частоты возбуждающего сигнала возникает погрешность от сдвига максимума резонансной кривой колебательной системы относительно ее истинного значения. Данное явление «сноса» резонансной частоты возникает при быстрой перестройке и зависит от скорости развертки частоты и постоянной времени измерительного преобразователя, определяемой добротностью резонансной системы [3]. Для определения способов компенсации этой дополнительной погрешности необходимо проведение исследований, направленных на повышение точности резонансных измерений с использованием цифровых методов обработки и параметрической модуляции в приборах контроля.

Аналитическая модель

Рассмотрим аналитическое описание процессов, происходящих в резонансной измерительной системе при осуществлении в ней параметрической модуляции.

В качестве модели резонансной системы принят колебательный контур с обобщенной передаточной функцией [4]

$$H_K(p) = k_K p T_1 / (p^2 T_1 T_0 + p T_1 + 1), \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа; $k_K = R_2 / (R_1 + R_2)$; $T_0 = L_K / (R_1 + R_2)$; $T_1 = (R_1 + R_2) C_K$ – значения параметров для последовательного колебательного контура; $k_K = R_2 / (R_1 + R_2)$;

$T_0 = R_1 R_2 C_K / (R_1 + R_2)$; $T_1 = (R_1 + R_2) L_K / R_1 R_2$ – значения параметров для параллельного колебательного контура; R_1, R_2 – соответственно эквивалентные сопротивления потерь в колебательной системе и нагрузки;

L_k, C_k – эквивалентные индуктивность и емкость контура.

Параметрическая модуляция в измерительной системе заключается в воздействии на резонансный измерительный преобразователь с передаточной характеристикой (1) высокочастотного сигнала $x(t)$ с частотой $\omega(t)$, изменяющейся по линейному закону:

$$x(t) = X_m \cos(\omega_1 t + V_\omega t^2 / 2) \text{ при } t \geq 0; \quad (2)$$

$$\omega(t) = \omega_1 + V_\omega t, \quad (3)$$

где V_ω – скорость изменения частоты.

Практически требуется найти сигнал $y(t)$ на выходе избирательной цепи, обладающей заданными значениями резонансной частоты и полосы пропускания. Поскольку сигнал (2) представляет собой сложную функцию времени, для которой спектральную плотность затруднительно выразить аналитически, представляется целесообразным для нахождения выходного сигнала использовать временной метод анализа. Импульсную характеристику анализируемой электрической цепи можно записать в следующем виде [5]:

$$g(t) = \sqrt{1 + (1/2Q)^2} (k_k / T_0) e^{-\delta t} \sin \omega_p t,$$

где $\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - (1/2Q)^2}$ – частота свободных колебаний в контуре с потерями;

$\delta = T_1 / 2T_0$ – коэффициент затухания контура;

$\omega_0 = 1 / \sqrt{L_k C_k}$ – резонансная частота в LC-контуре без потерь.

В соответствии с временным методом анализа, когда реакция электрической цепи $y(t)$ находится в виде свертки воздействия $x(t)$ и импульсной характеристики цепи $g(t)$, можно, задаваясь единичной амплитудой входного сигнала, выразить выходной сигнал резонансной системы при развертке частоты следующим образом:

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_0^t x(\tau) g(t-\tau) d\tau = (k_k / T_0) \int_0^t \cos(\omega_1 \tau + V_\omega \tau^2 / 2) e^{-\delta(t-\tau)} \sin \omega_0 (t-\tau) d\tau = \\ &= \frac{(k_k / T_0)}{2} e^{-\delta t} \int_0^t e^{\delta \tau} \sin[(\omega_1 - \omega_0) \tau + V_\omega \tau^2 / 2 + \omega_0 t] d\tau - \\ &- \frac{(k_k / T_0)}{2} e^{-\delta t} \int_0^t e^{\delta \tau} \sin[(\omega_1 + \omega_0) \tau + V_\omega \tau^2 / 2 - \omega_0 t] d\tau = \\ &= \frac{(k_k / T_0)}{2} e^{-\delta t} \int_0^t e^{\delta \tau} \sin[V_\omega \tau^2 / 2 - \omega_0 \tau + \omega_1 \tau + \omega_0 t] d\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Интеграл произведения «медленной» функции $\exp(\delta \tau)$ на множитель, быстро изменяющийся с частотой $\omega_1 + \omega_0$, может быть отброшен из-за близости его к нулю, так как площади положительных и отрицательных полувольт взаимно уничтожаются.

Перепишем выражение (4) в форме, более подходящей для последующего интегрирования:

$$y(t) = \frac{(k_k / T_0)}{2} e^{-\delta t} \operatorname{Im} \left\{ e^{j\omega_0 t} \int_0^t e^{jV_\omega \tau^2 / 2 + [\delta - j(\omega_0 - \omega_1)] \tau} d\tau \right\}. \quad (5)$$

Показатель степени в этом подынтегральном выражении целесообразно преобразовать к следующему виду:

$$jV_{\omega}\tau^2/2 + [\delta - j(\omega_0 - \omega_1)]\tau = \left(\tau\sqrt{jV_{\omega}/2} + d\right)^2 - d^2 = \chi^2 - d^2,$$

где коэффициенты уравнения d и χ определяются выражениями:

$$d = \frac{\alpha - j(\omega_0 - \omega_1)}{\sqrt{2jV_{\omega}}}; \quad \chi = \tau\sqrt{jV_{\omega}/2} + d.$$

Тогда выражение (5), служащее для вычисления выходного сигнала контура, приводится к следующему виду [6]:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{(k_k/T_0)}{2} e^{-\alpha t} \operatorname{Im} \left\{ e^{j\omega_0 t - d^2} \int_0^t e^{\left(\tau\sqrt{jV_{\omega}/2} + d\right)^2} d\tau \right\} = \\ &= \frac{(k_k/T_0)}{2} e^{-\delta t} \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{\sqrt{jV_{\omega}/2}} e^{j\omega_{\text{сб}} t - d^2} \int_d^{t\sqrt{jV_{\omega}/2} + d} e^{\chi^2} d\chi \right\} = \\ &= \frac{(k_k/T_0)}{2} e^{-\delta t} \operatorname{Im} \left\{ \frac{e^{j\omega_0 t - d^2}}{\sqrt{jV_{\omega}/2}} \left[\int_0^{t\sqrt{jV_{\omega}/2} + d} e^{\chi^2} d\chi - \int_0^d e^{\chi^2} d\chi \right] \right\}. \end{aligned}$$

Это выражение сводится к функциям следующего вида [7]:

$$W(Z) = e^{-Z^2} \left(1 + \frac{2j}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{\chi^2} d\chi \right),$$

если выполнить некоторые преобразования:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{(k_k/T_0)}{2} e^{-\delta t} \operatorname{Im} \left\{ \frac{e^{j\omega_0 t}}{\sqrt{jV_{\omega}/2}} \left[e^{-d^2} e^{\left(\sqrt{jV_{\omega}t} + d\right)^2} e^{-\left(\sqrt{jV_{\omega}t} + d\right)^2} \int_0^{t\sqrt{jV_{\omega}/2} + d} e^{\chi^2} d\chi - e^{-d^2} \int_0^d e^{\chi^2} d\chi \right] \right\} = \\ &= \frac{(k_k/T_0)}{2} e^{-\delta t} \operatorname{Im} \left\{ \frac{e^{j\omega_0 t}}{\sqrt{j2V_{\omega}}} \frac{\sqrt{\pi}}{2j} \left[e^{Z_2^2 - Z_1^2} W(Z_2) - W(Z_1) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где значения коэффициентов Z_1, Z_2 определяются следующими соотношениями:

$$Z_1 = d = \frac{\delta - j(\omega_0 - \omega_1)}{\sqrt{j2V_{\omega}}};$$

$$Z_2 = t\sqrt{jV_{\omega}/2} + d = t\sqrt{jV_{\omega}/2} + \frac{\delta - j(\omega_0 - \omega_1)}{\sqrt{j2V_{\omega}}}.$$

Для упрощения анализа примем частоту $\omega_1 = 0$, тогда получится

$$Z_1 = d = \frac{\delta - j\omega_0}{\sqrt{jV_{\omega}/2}}; \quad Z_2 = t\sqrt{jV_{\omega}/2} + \frac{\delta - j\omega_0}{\sqrt{jV_{\omega}/2}}.$$

Выражение (6) может быть приведено к следующему виду [3]:

$$y(t) = Y(t) \cos(\omega_1 t + V_{\omega} t^2 / 2 + \phi(t)), \quad (7)$$

где огибающая амплитуд $Y(t)$, мгновенная частота и фаза зависят не только от параметров измерительного двухполюсника, но и от скорости изменения частоты V_{ω} .

Сложность аналитического описания процессов, происходящих в резонансной системе при возбуждении ее высокочастотным сигналом с изменяющейся частотой, не позволяет непосредственно по выражению (7) оценить влияние линейной частотной модуляции измерительного сигнала на точность резонансных измерений. Представляется

целесообразным выполнить экспериментальные исследования на основе полученных аналитических выражений.

Экспериментальная модель

С целью получения количественных оценок точности измерений при осуществлении линейной частотной модуляции проведено имитационное моделирование с помощью математического пакета программ «MathCAD».

Во временной области система (1) описывается неоднородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка [8]:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1}{T_0} \frac{dy}{dt} + \frac{y}{T_1 T_0} = \frac{k_k}{T_0} \frac{dx}{dt}. \quad (8)$$

Если на цепь воздействует сигнал (2) с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ–сигнал), то с учетом выражения (3) и условия $V_f = \Delta\omega / T$ можно описать круговую частоту равенством:

$$\omega(t) = \omega_1 + \Delta\omega t / T, \quad (9)$$

где $\Delta\omega$ – девиация частоты;

T – длительность ЛЧМ–сигнала.

С учетом (9), для входного сигнала получаем выражение:

$$x(t) = X_0 \sin\left(\int \omega(t) dt\right) = X_0 \sin\left(\omega_1 t + \Delta\omega t^2 / 2T\right) = X_0 \sin\left[\omega_1 t + \frac{\Delta\omega/\omega_1}{2T\omega_1} (\omega_1 t)^2\right].$$

Преобразуем уравнение (8) с учетом параметров ЛЧМ–сигнала:

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + \frac{1}{T_0 f_1} \frac{dy}{d\tau} + \frac{y}{f_1^2 T_1 T_0} - \frac{k_k}{f_1 T_0} \frac{dx}{d\tau} = 0, \quad (10)$$

где $\tau = \omega_1 t$ – текущая фаза ЛЧМ–сигнала.

Решение дифференциального уравнения (10) было выполнено методом Рунге – Кутты 4–го порядка с помощью математического пакета программ «MathCAD» путем обращения к функции *rkfixed* [9]. По результатам решения дифференциального уравнения построены графики функции выходного сигнала $y(t)$, представленные на рисунке 1. Статические АЧХ и ФЧХ показаны на рисунке 1, а – б, а на рисунке 1, в – д – выходной сигнал при $X_0 = 1$, $f_1 = \omega_1 / 2\pi = 500$ кГц, $\Delta f = \Delta\omega / 2\pi = 1000$ кГц, $f_0 = 1000$ кГц, $Q = 100$ и различных значениях скорости изменения или развертки частоты ЛЧМ–сигнала, указанных в подписях к рисунку.

Согласно построенным графикам, с ростом скорости перестройки частоты входного сигнала амплитуда выходного сигнала деформируется вправо и ее максимум уменьшается, а на заднем фронте выходного сигнала появляются осцилляции.

На рисунке 2 представлены графики функций входного и выходного сигналов в области резонанса при перестройке частоты входного сигнала со скоростью $V_f = 100$ кГц/мс. Масштаб представления выбран исходя из удобства определения амплитудных и фазовых параметров.

Из рисунка 2, а видно, что амплитудному резонансу (максимуму напряжения на контуре) соответствует достижение текущей фазой значения $\tau = \omega_0 t = 1.585 \cdot 10^4$ рад.

Однако фазы сигналов при амплитудном резонансе не совпадают (рисунок 2, б). Фазовый резонанс (рисунок 2, в) возникает несколько раньше, при $\tau = \omega_0 t = 1.5775 \cdot 10^4$ рад. Частоты резонансов можно определить, выделяя время достижения текущего значения фазы

$t_n = \tau / \omega_0$ и определяя мгновенное значение круговой частоты: $\omega(t_n) = \omega_0 + 2\pi\Delta f \cdot t_n / T$, а затем и циклической частоты $f_n = \omega(t_n) / 2\pi$.

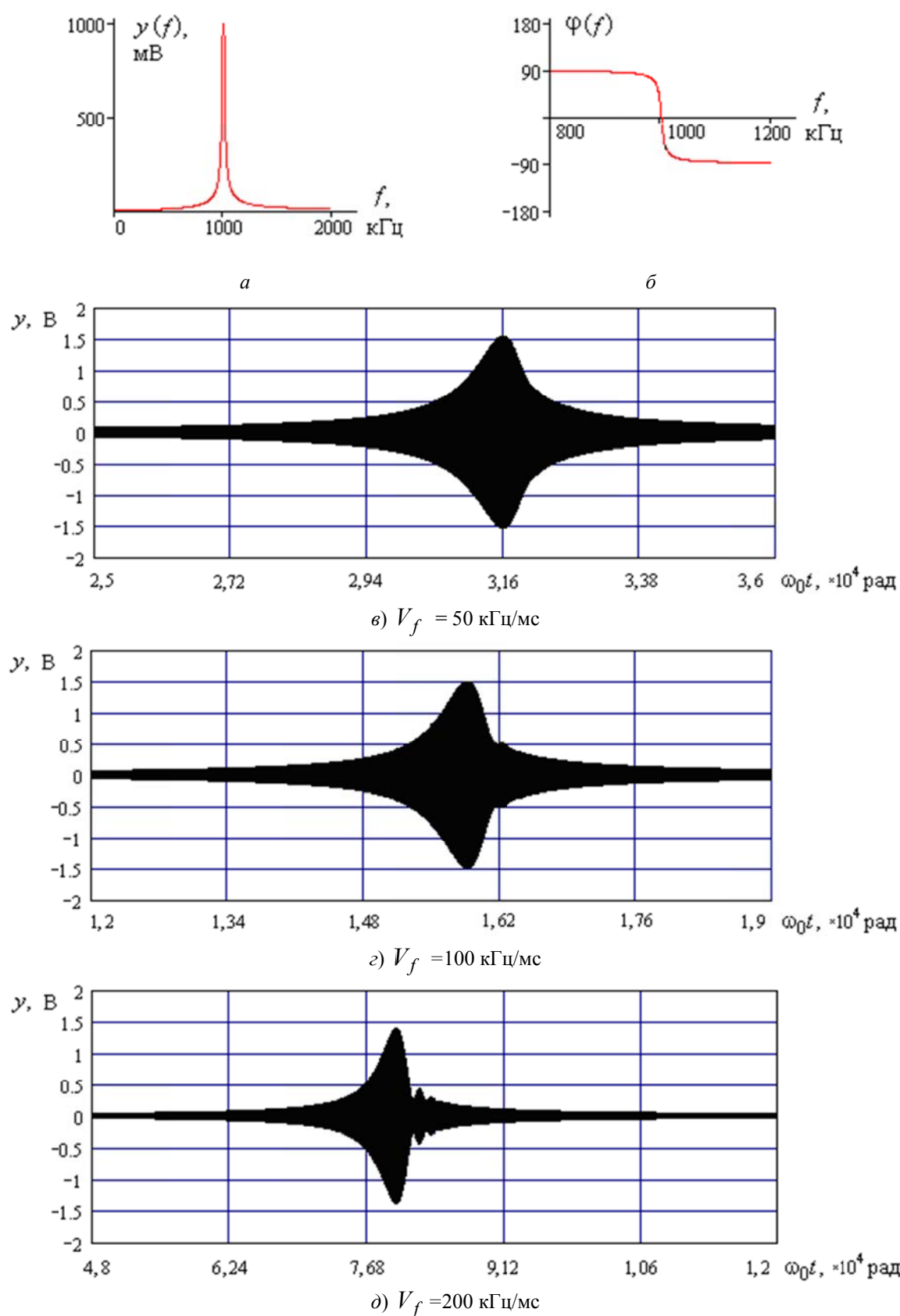


Рисунок 1 – Статические характеристики (а, б) и диаграммы выходного сигнала (в, г, д) параллельного колебательного контура при быстрой перестройке частоты возбуждающего сигнала

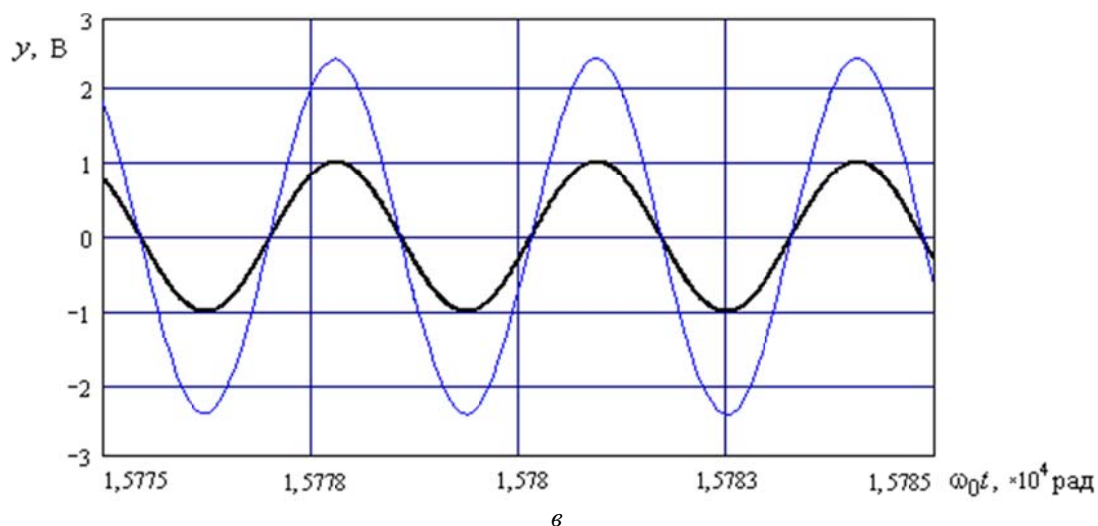
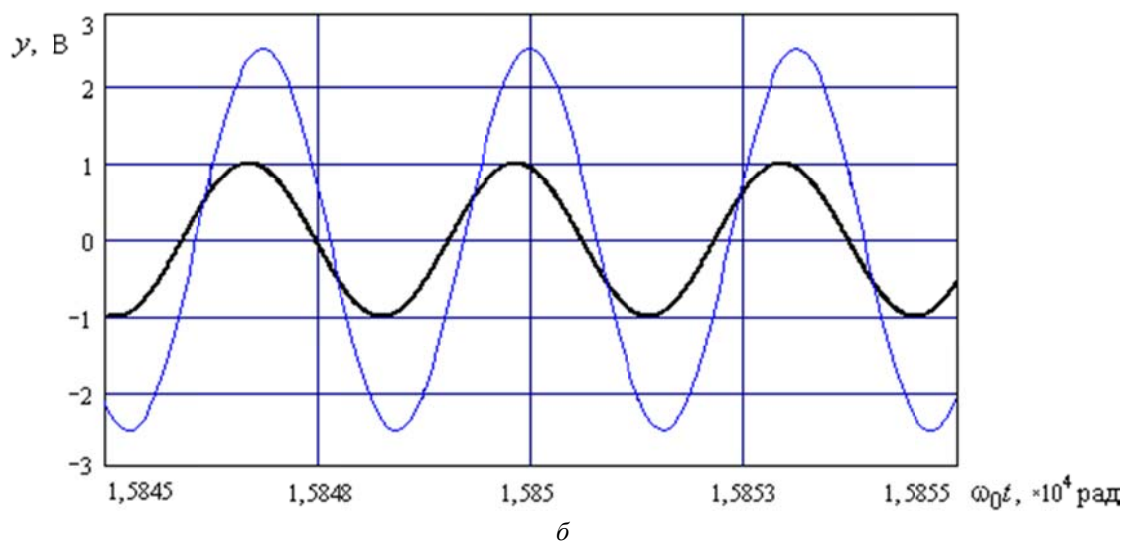
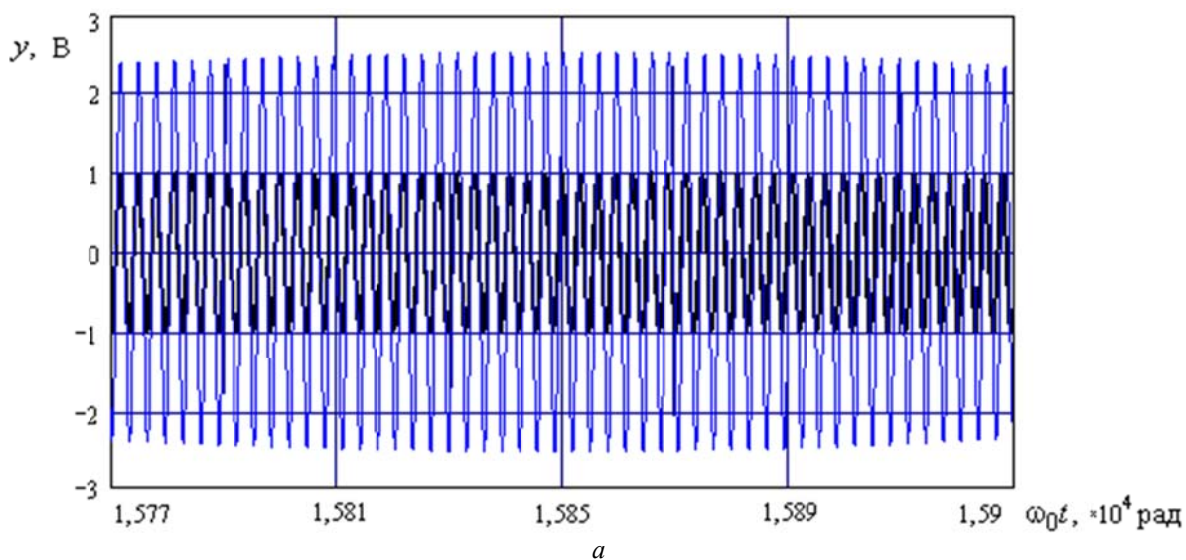


Рисунок 2 – Амплитудный (а, б) и фазовый (в) резонансы в параллельном контуре при повышении частоты сигнала со скоростью $V_f = 100$ кГц/мс

Вычисленные таким образом частоты амплитудного и фазового резонансов составляют $f_{pA} \approx 1004$ кГц, $f_{p\phi} \approx 1002$ кГц. Это вполне соответствует теоретическим данным о наличии так называемого «сноса» резонансной частоты [10], возникающего по

причине инерционности резонансной измерительной системы и приводящего к дополнительной погрешности измерений.

Таким образом, можно утверждать, что в условиях быстрой перестройки частоты возбуждающего сигнала при осуществлении линейной параметрической модуляции возникает дополнительная погрешность от «сноса» резонансной частоты, которая может быть достаточно заметной, при этом использование фазового параметра может значительно уменьшить погрешность определения резонанса в системе по сравнению с амплитудным.

Заключение

Результаты аналитических и экспериментальных исследований, выполненных во временной области анализа, показывают, что ошибка измерений от «сноса» резонансной частоты, возникающая при реализации линейной развертки частоты возбуждающего сигнала в приборах резонансного контроля, реально существует и носит методический характер. Величина этой ошибки, в зависимости от параметров резонансной системы и скорости перестройки частоты, может достигать существенных значений, поэтому необходимо принимать меры по компенсации этой погрешности.

В качестве одной из мер, позволяющей уменьшить погрешность от «сноса» резонансной частоты, может быть применение многопараметровых методов измерений. В этом случае для оценки резонансной частоты, в значении которой скрыта контролируемая величина, используются не только амплитудные, но и фазовые параметры измерительного сигнала. Дополнительной мерой может быть использование двухтактной развертки частоты в многопараметровых приборах резонансного контроля с изменением скорости и направления развертки в разных тактах. Это позволит значительно увеличить точность измерений параметров различных материалов и веществ частотными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арш, Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений / Э.С. Арш. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.
2. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
3. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1971. – 672 с.
4. Арш, Э.С. Автогенераторные измерения / Э.С. Арш. – М.: Энергия, 1976. – 136 с.
5. Лисичкин, В.Г. Раздел 4. Исследование процесса резонансного контроля толщины покрытий с использованием цифровых методов обработки / В.Г. Лисичкин // Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий. Коллективная монография. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 150–184.
6. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1967. – 780 с.
7. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
8. Винокуров, М.В. Моделирование процессов резонансного контроля с линейной частотной импульсной модуляцией / М.В. Винокуров, В.Г. Лисичкин, С.Н. Шведов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, ОрелГТУ, № 1 (291), 2012. – С. 111 – 117.
9. Дьяконов, В.П. Mathcad 8–12 для студентов. Серия «Библиотека студента» / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 632 с.
10. Лисичкин, В.Г. Модель информационно-измерительной системы резонансного типа с развертывающим частотным преобразованием / В.Г. Лисичкин // Информационные системы и технологии «Госуниверситет–УНПК», № 2 (94), 2016. – С. 22 – 29.

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орёл

Доктор технических наук, доцент, сотрудник отдела

ул. Приборостроительная, 35

E-mail: lisichkin-vg@rambler.ru

V.G. LISICHKIN

RESEARCH OF THE RESONANT CONTROL IN TIME AREA OF THE ANALYSIS

Abstract. *The article is devoted to perfection of resonant control frequency methods. It is offered to use linear frequency modulation of the exciting measuring converter signal to increase the universality of resonant control devices. Analytical and experimental researches are executed, to estimate an additional error of measurements. This error arises by the reason of resonant frequency «pulling down» and the ways of its reduction are planned.*

Keywords: *resonant control, accuracy of measurements, linear frequency modulation, «pulling down» of resonant frequency.*

BIBLIOGRAPHY

1. Arsh, E.S. Avtogeneratornye metody i sredstva izmereniy / E.S. Arsh. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 256 s.
2. Nerazrushajushiy kontrol metallov i izdeliy. Spravochnik / Pod red. G.S. Samoylovicha. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 456 s.
3. Gonorovskiy, I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly / I.S. Gonorovskiy. – M.: Sov. radio, 1971. – 672 s.
4. Arsh, E.S. Avtogeneratornye izmereniy / E.S. Arsh. – M.: Energija, 1976. – 136 s.
5. Lisichkin, V.G. Razdel 4. Issledovanie processa rezonansnogo kontrolja tolshiny pokrytiy s ispolzovaniem cifrovyyh metodov obrabotki / V.G. Lisichkin // Kontrol i diagnostika pri obespechenii kachestva mashinostroitelnyh izdeliy. Kollektivnaya monografiya. – M.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2012. – S. 150–184.
6. Ango, A. Matematika dlja elektro– i radioinzhenerov. – M.: Nauka, 1967. – 780 s.
7. Bronshteyn, I.N. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashihsja vtuzov / I.N. Bronshteyn, K.A. Semendjaev. – M.: Nauka, 1986. – 544 s.
8. Vinokurov, M.V. Modelirovanie processov rezonansnogo kontrolja s lineynoy chastotnoy impulsnoy moduljaciey / M.V. Vinokurov, V.G. Lisichkin, S.N. Shvedov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, OrelGTU, № 1 (291), 2012. – S. 111 – 117.
9. Djakonov, V.P. Mathcad 8–12 dlja studentov. Seriya «Biblioteka studenta» / V.P. Djakonov. – M.: SOLON–Press, 2005. – 632 s.
10. Lisichkin, V.G. Model informacionno–izmeritelnoy sistemy rezonansnogo tipa s razvertyvajushim chastotnym preobrazovaniem / V.G. Lisichkin // Informacionnye sistemy i tehnologii «Gosuniversitet–UNPK», № 2 (94), 2016. – S. 22 – 29.

Lisichkin Vladimir Georgievich

Russian Academy of FSO (Federal Protect (Guard) Service), Oryol
Dr.Sci.Tech., the senior lecturer, the employee of department
Street Priborostroitel'naja, 35
E–mail: lisichkin–vg@rambler.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- Водном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК;

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуночные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуночной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте <http://oreluniver.ru/public/file/science/journal/fipptt/>

Плата за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. (4862) 75–13–18
<http://oreluniver.ru>
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
+7(920)2806645, +7(906)6639898

<http://oreluniver.ru>
E-mail: tlostu@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 20.07.2018 г.
Дата выхода в свет
Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 12,375
Цена свободная. Тираж 600 экз.
Заказ _____

Отпечатано с готового оригинал–макета
на полиграфической базе ИП Синяев В.В.
302001, г. Орел, ул. Розы Люксембург, 10а