

## 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: tiostu@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

### Колонка главного редактора

Приветственное слово проректора по научной и инновационной работе СевГУ д.т.н., профессора Евстигнеева М.П. .... 3

### Секция «Теоретическая и прикладная механика»

Годжаев З.А., Хорошенков В.К., Гончаров Н.Т., Ильченко Е.Н. Тенденции развития средств механотроники, автоматизации и роботизации для синтеза новых высокопроизводительных технологий, и машин в сельском хозяйстве ..... 4  
Грязев М.В., Ларин С.Н., Пасынков А.А. Теоретическая оценка силы отбортовки заготовок из листовых материалов, характеризующихся анизотропией ..... 17  
Конева С.А. Анализ точности системы управления с распределенными параметрами при детерминированных возмущениях ..... 23

### Секция «Технологии и инструменты»

Бохонский А.И., Рыжков А.И. Использование телескопического манипулятора для оптимального перемещения объекта по прямой в пространстве ..... 29  
Осипов К.Н., Голикова В.В. Моделирование сложных машиностроительных изделий по результатам автоматизированных производственных испытаний ..... 35  
Федоровский К.Ю. Принципы построения замкнутых систем охлаждения судовых дизельных энергоустановок ..... 43

### Теоретическая механика и ее приложения

Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Определение допустимых положений центра масс шагающего робота, движущегося по пересеченной местности ..... 49  
Коробко В.И., Калашикова Н.Г. Экспериментальное определение основной частоты колебаний пластинок в виде ромба и равнобедренного треугольника ..... 57

### Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Леоненко Д.В. Колебания трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде под действием несимметричных динамических нагрузок ..... 64

### Машиностроительные технологии и оборудование

Барзов А.А., Галиновский А.Л., Голубев Е.В., Илюхина А.А., Коберник Н.К., Зарубина О.В. Анализ взаимосвязанности функционально-физических возможностей аддитивных и ультраструйных технологий ..... 73  
Пешехонов К.Ю., Тарапанов А.С. Прогнозирование шероховатости при формообразовании зубьев спиральных колес ..... 82  
Афонин А.Н., Ларин А.И., Макаров А.В. Расчет размеров заготовки при гетерогенном упрочнении режущо-деформирующей обработкой ППД ..... 88  
Яковлева Е.О., Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю. Влияние толщины исходной заготовки на толщину детали получаемой совмещением операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки ..... 94

### Машиноведение и мехатроника

Мищенко Е.В., Мищенко В.Я. Особенности преподавания курса «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» ..... 99  
Горин А.В., Токмаков Н.В., Просекова А.В., Горина М.А., Кравченко В.А. Мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода и влияние их на базовую машину ..... 103  
Кожухов М.А., Сытин А.В., Родичев А.Ю. Способы обеспечения минимального износа рабочей поверхности лепестковых подшипников в период пуска и останова ..... 109  
Корнеев А.Ю., Шенбо Ли Методика расчета динамики жесткого ротора на конических подшипниках жидкостного трения с металлорезиновыми демпферами ..... 117

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Малютин Д.М. Гиростабилизатор гравиметра с комбинированным управлением ..... 123  
Емельянова О.В., Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Якун С.Ф. Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания ..... 136  
Паничкин А.В., Трубин А.С., Бодров А.С. Исследование процесса очистки конвейеров в сложных климатических условиях ..... 142

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Арискин Е.О., Миннебаев М.Р., Никитин А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Построение и алгоритмы системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на борту вертолета с инерционно-методическими и аэроматрическими измерительными каналами ..... 150

## 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

### Editor's Note

Welcoming speech of the Vice-Rector for scientific and innovative work of SevGU Doc. Sc. Tech., Professor Evstigneev M.P. ....	3
--	---

### Section «Theoretical and Applied Mechanics»

Godzhayev Z.A., Khoroshenkov V.K., Goncharov N.T., Ilchenko Ye.N. Development trends of mechanotronics, automation and robotization for synthesis of new high productivity technologies, and machines in agriculture.....	4
Gryazev M.V., Larin S.N. Theoretical studies of power at the collection of training from sheet materials of characterized anisotropes .....	17
Koneva S.A. The analysis of accuracy of the control systems with the distributed parameters at the determined indignations .....	23

### Section «Technologies and Tools»

Bokhonsky A.I., Ryzhkov A.I. Using a telescopic manipulator for optimum movement of an object along the straight line .....	29
Osipov K.N., Golikova V.V. Modeling of complex engineering products by results of automated industry testing.....	35
Fedorovsky K.Yu. Principles of construction of closed cooling systems ship diesel energy installations.....	43

### Theoretical mechanics and its applications

Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Definition of allowable provisions center mass stocking robots, moving at the crossed country .....	49
Korobko V.I., Kalashnikova N.G. Experimental determination of the basic frequency of vibrations plates in the type of the rombe and the equal-free triangle .....	57

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

Leonenko D.V. Oscillations of cylindrical sandwich shell in elastic medium under action of axisymmetric dynamic loads.....	64
--	----

### Machine-building technologies and equipment

Barzov A.A., Galinovsky A.L., Golubev E.V., Ilyukhina A.A., Kobernik N.K., Zarubina O.V. Analysis of the correlation of the functional-physical opportunities of additive and ultra-jet technologies .....	73
Peshekhonov K.Yu., Tarapanov A.S. Prediction of roughness in the forming of the teeth spiroid gears .....	82
Afonin A.N., Larin A.I., Makarov A.V. Calculation of dimensions of workpiece for heterogeneous hardening of cutting-forming processing SPD .....	88
Yakovleva E.O., Evsyukov S.A., Artyukhovskaya T.A. The influence of the initial blank thickness on the part thickness obtained by the combination of such operations as expansion, crimping, drawing and flanging .....	94

### Machine Science and Mechatronics

Mishchenko E.V., Mishchenko V.Ya. Peculiarities of teaching the course details of mechatronic modules, robots and their design.....	99
Gorin A.V., Tokmakov N.V., Prosekova A.V., Gorina M.A., Kravchenko V.A. Mechatronic mechanisms based on pulsed hydraulic drive and influence on the basic machine .....	103
Kozhukhov M.A., Sytin A.V., Rodichev A.Yu. Means of provision of minimal wear of gas foil bearings surface during transition regime.....	109
Korneyev A.Yu., Li Shengbo The calculation procedure of the dynamics of rigid rotor on the conical liquid friction bearings with metal-rubber dampers.....	117

### Devices, biotechnical systems and technologies

Malyutin D.M. Gyrostabilizer of gravimeter with combined control.....	123
Yemelyanova O.V., Polyakov R.Yu., Yefimov S.V., Yatsun S.F. Mobile flying complex for early detection of focuses of fire fighters.....	136
Panichkin A.V., Trubin A.S., Bodrov A.S. Study of the conveyors cleaning process in complex climatic conditions .....	142

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Ariskin E.O., Minnebayev M.R., Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. The construction and algorithms of control system of aircraft flight parameters and environment on board the helicopter with the ion-tagging and aerometric measurement channels.....	150
---	-----

## Колонка главного редактора

Уважаемые читатели и авторы журнала! Уже не первый год наш журнал предоставляет свои страницы для публикации статей, написанных по материалам проходящей на базе Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» авторитетной международной научно-технической конференции. Для представления очередной конференции 2018 года предоставляем слово проректору по научной и инновационной работе СевГУ, доктору технических наук, профессору Максиму Павловичу Евстигнееву.

### Дорогие Друзья!

Я рад приветствовать на страницах журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» участников ежегодной XV международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», которая пройдет в г. Севастополе на базе Севастопольского государственного университета с 10 сентября по 14 сентября 2018 г.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов фундаментальных и прикладных научных проблем в области механических и биологических систем и процессов их управления. В докладах, представленных известными и молодыми учеными России и зарубежья, приведены решения задач динамики, прочности, устойчивости, оптимального управления, надежности и долговечности механических и биомеханических систем, термо- и гидродинамических процессов в различных средах; рассмотрены вопросы технологии и инструмента, материалов конструкций, организации управления процессами и диагностики состояния систем. Применение современных методов моделирования позволило исследовать широкий спектр актуальных проблем.

В организации конференции принимают участие:

Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь; ФГБУ ВО «Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана», г. Москва; ФГБУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск; ГНУ «Всероссийский научно – исследовательский институт механизации сельского хозяйства», г. Москва; ФГБУ ВО «Орловский государственный университет», г. Орел; ФГБУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула; ФГБУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева», г. Рыбинск; ФГБУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград; ФГАУ ВО «ФГУ им. В.И. Вернадского» Медицинская академия им. С.И. Георгиевского, г. Симферополь; ФГБУ ВО «Башкирский государственный университет, г. Уфа; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь; Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Республика Азербайджан; St. Cyril and St. Methodius University, Scopje, Rep. Macedonia; School of Environment, Beijing Normal University, China; Dokuz Eylul University of Izmir, Izmir, Turkey.

Вот уже несколько лет Орловский государственный университет в качестве соучредителя конференции тесно сотрудничает с Севастопольским государственным университетом. Ректорат Севастопольского государственного университета признателен руководству Орловского государственного университета, предоставившему страницы своего журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» XV международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем».

Желаю всем участникам конференции успешной работы, научных прорывов и радости открытий. Ждем Вас 10 сентября 2018 года в городе-герое Севастополе.



## **СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА»**

УДК629.3: 631.3:621.398

З.А. ГОДЖАЕВ, В.К. ХОРОШЕНКОВ, Н.Т. ГОНЧАРОВ, Е.Н.ИЛЬЧЕНКО

### **ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ МЕХАНОТРОНИКИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА НОВЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, И МАШИН В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

**Аннотация.** В статье представлены структурная и функциональная схемы роботизированного агрегата. Описаны требования необходимые для создания роботизированного агрегата и требования, предъявляемые к современному робототехническому средству. В связи с этим сделан обзор средств дистанционного управления роботизированным машинно–тракторным агрегатом. Рассмотрены преимущества и недостатки способов передачи информации о местоположении и состоянии агрегата. Даны краткие сведения в области передовых разработок высокопроизводительных сельскохозяйственных машин.

**Ключевые слова:** автоматизация, робототехнические комплексы, сельское хозяйство, глобальная спутниковая система, техническое зрение.

#### **Введение**

Современный уровень механизации и автоматизации, а также анализ мировых тенденций развития роботизированных устройств, позволяют сделать вывод, что робототехнические комплексы (РТК) и интеллектуальные машинные технологии, это предпочтительное направление повышения производительности сельскохозяйственного производства. Однако на пути решения этой задачи у нас в стране много факторов, которые необходимо учитывать. Это отсутствие квалифицированных специалистов в области робототехники, отсутствие собственных технологических решений, недостаток финансирования, отсутствие заказчиков на внутреннем рынке, затрудненность импорта технологических продуктов и их комплектующих, небольшой объем инвестиций внутри РФ, трудность в создании сети серверного обслуживания, отсутствие российской электронной базы, все современные комплектующие и технологии – зарубежные.

Перечисленные факторы создают барьеры для развития робототехники и организации массового производства во всех ее сегментах на территории России.

Для нейтрализации массового производства во всех этих негативных факторов необходима государственная продуманная система поддержки развития этой отрасли и, особенно в сельскохозяйственном секторе. В последние годы государство стало проявлять заметный интерес к робототехнике, что является обнадеживающим фактором и появилась необходимость изучения и нахождения оптимальных решений в создании робототехнических средств для сельскохозяйственного производства.

В настоящее время, в связи с развитием наукоемких технологий, активно используемых в различных аспектах деятельности человека, большой интерес вызывает создание роботов для сельскохозяйственного производства с целью облегчения тяжелого труда сельских тружеников. Так как, сельскохозяйственное производство характеризуется сжатыми сроками проведения полевых работ (вспашка, посев, уборка урожая) механизатору приходится работать длительное время в тяжелых условиях (шум, вибрация, запыленность, температурный режим, агрессивность среды при внесении ЖКУ и средств защиты растений). Поэтому создание роботов для проведения полевых работ является актуальной и сегодня, несмотря на большое внимание, уделяемое производителями тракторов, комбайнов и другой с/х техники вопросу обеспечения комфортности условий труда механизатора. [1]

### Основная часть

В связи с этим рассмотрим структурную схему РТК как робототехнического многомерного объекта, представленную на рисунке 1.

На этой схеме на основе анализа проведенных исследований обобщены с учетом перекрестных связей математические модели трех подсистем: подсистема управления энергетическими процессами, подсистема управления технологическими процессами и подсистема управления вождением (навигация с техникой безопасности).

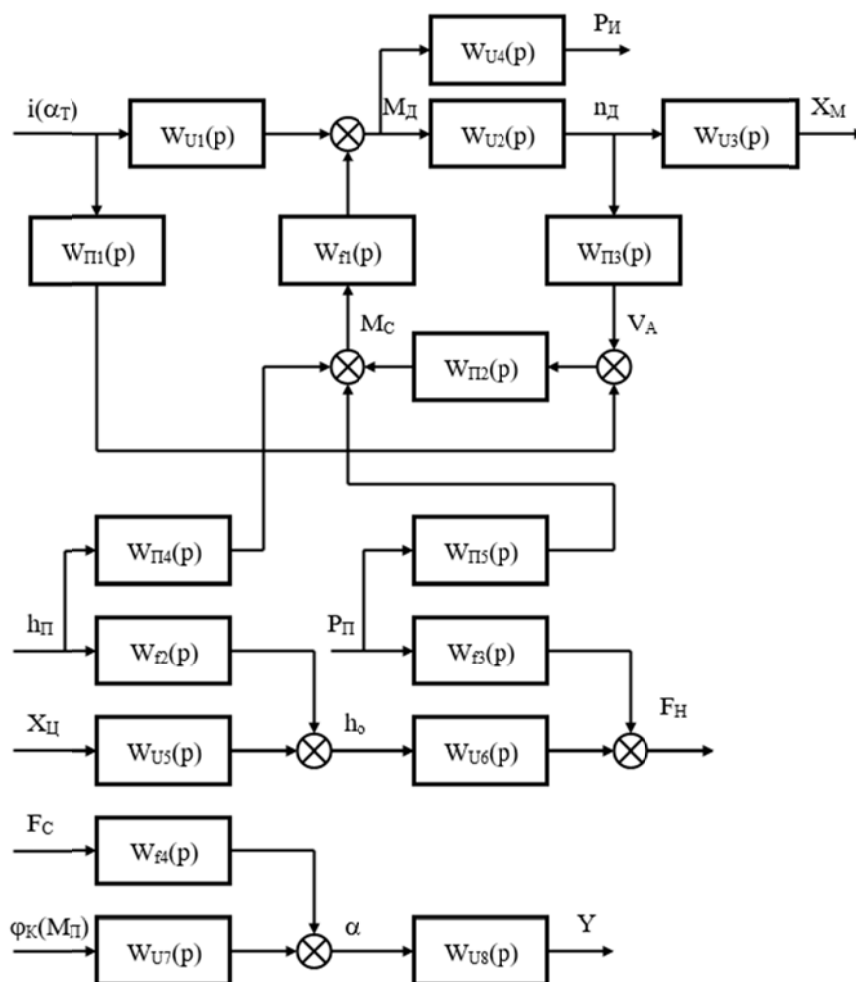


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема мобильного энергетического средства с автоматическим управлением и навесным оборудованием

К математической модели объекта управления энергетическими процессами относятся передаточные функции по каналу управления  $W_{U1}(p)$ ,  $W_{U2}(p)$ ,  $W_{U3}(p)$ ,  $W_{U4}(p)$ , по каналу возмущения  $W_{П1}(p)$ , по перекрестным связям внутри объекта –  $W_{П1}(p)$ ,  $W_{П2}(p)$ ,  $W_{П3}(p)$ , и между объектами  $W_{П4}(p)$  и  $W_{П5}(p)$ . В разработанных системах управления (САУ) использовались различные косвенные параметры: частота вращения вала двигателя  $n_D$ , управление подачей топлива  $X_M$ , задресселированное индикаторное давление в двигателе  $P_H$ , крутящий момент на валу двигателя  $M_D$ . Регулирующим воздействием в объекте в зависимости от вида агрегата являлись: изменение передаточного отношения  $i$  в коробке перемены передач (без разрыва потока мощности), в агрегате с колесным трактором (с бесступенчатой гидрообъемной трансмиссией) – перемещение  $\alpha_T$  регулирующего рычага гидрообъемной трансмиссии. Основное внешнее возмущение – это момент сопротивления, зависящий от скорости движения  $V_A$  (а, следовательно, и от частоты вращения  $n_D$  и выбранной передачи  $i$ ), рельефа поля, характеризующегося изменениями его вертикальной координаты  $h_{П}$ , плотность почвы по длине гона  $P_{П}$ .

К математической модели объекта автоматического управления технологическими процессами относятся передаточные функции по каналу управления  $W_{U5}(p)$ ,  $W_{U6}(p)$ , по каналам возмущения –  $W_{f2}(p)$ ,  $W_{f3}(p)$ , по перекрестным связям –  $W_{П4}(p)$ ,  $W_{П5}(p)$ . В разработанных моделях при выполнении основной обработки в качестве параметра регулирования использовано усилие в тягах навески плуга  $F_H$  (косвенный параметр), заглубление корпуса плуга  $h_0$  и совокупность двух параметров  $F_H$  и  $h_0$ . Регулирующим воздействием в объекте является перемещение  $X_y$  штока гидроцилиндра подъема и опускания навески. К внешним возмущениям относятся: изменения вертикальных координат  $h_{П}$  рельефа поля и изменения плотности почвы  $P_{П}$  по длине гона.

К математической модели объекта автоматического вождения РТК на схеме относятся передаточные функции по каналу управления  $W_{U7}(p)$ ,  $W_{U8}(p)$  и передаточная функция по каналу возмущения  $W_{f4}(p)$ . При разработке локальных систем автоматического вождения (САВ) РТК в большинстве случаев в качестве параметра регулирования использовалась совокупность двух параметров: курсового угла  $\alpha$  и поперечного смещения  $Y$  точки копирования агрегата от заданной траектории движения. Управляющими воздействиями в объекте в зависимости от типа РТК являлись: для агрегатов с колесными тракторами – угол поворота  $\varphi_K$  управляемых колес, и для агрегатов с гусеничными тракторами – поворачивающий момент  $M_{П}$ . Основное возмущение определяется действием совокупности сил  $F_C$ , обуславливающих сцепление движителей РТК с почвой.

Анализируя в целом структурную схему РТК (рис.1) с информационной точки зрения, можно отметить следующее. При разработке упомянутых локальных САВ на стадии НИР были определены аналитические выражения передаточных функций по каналам управления и числовые значения параметров этих передаточных функций (коэффициенты передачи и постоянные времени).

В процессе создания робототехнического комплекса для сельского хозяйства (РТКСХ) была разработана функциональная схема, представленная на рисунке 2, а также алгоритм выполнения работы автономным роботизированным агрегатом (рисунок 3).

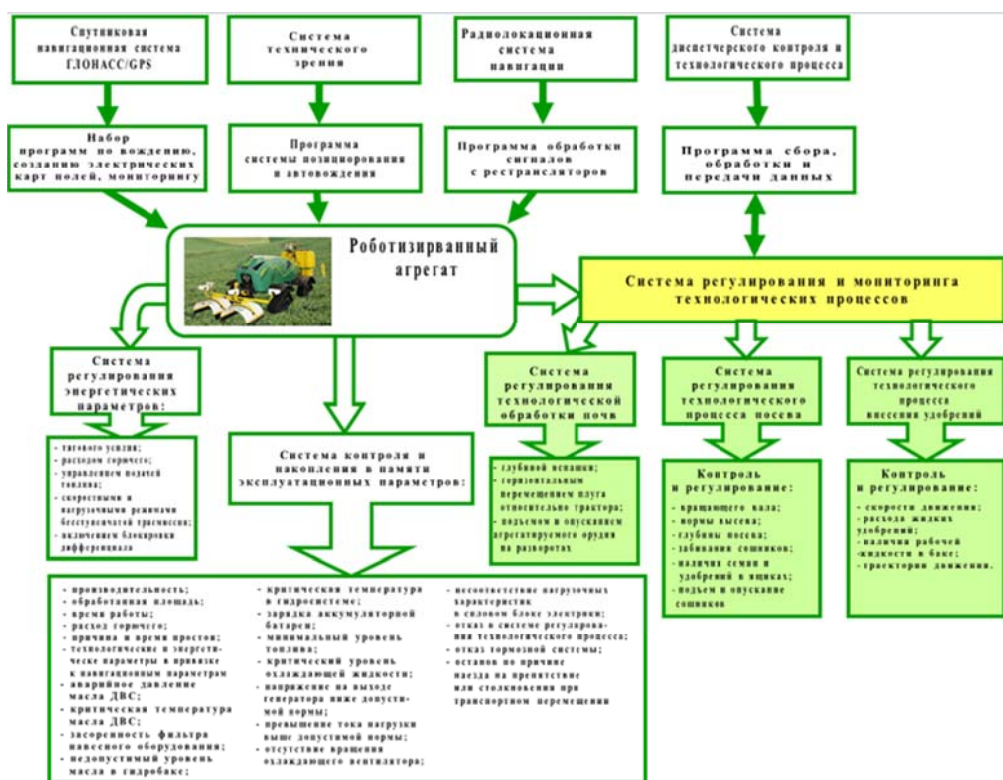


Рисунок 2 – Функциональная схема РТКСХ

Во время проведения полевых работ РТКСХ выполняются следующие операции: основная обработка почвы, посев, внесение удобрений и средств химической защиты растений, уборка урожая зерновых и пропашных культур.

Для создания РТКСХ необходимо:

- полная автоматизация технологического процесса;
- точное позиционирование агрегата на поле и автоматическое управление движением на оцифрованном поле по заданной программе;
- дистанционный контроль за передвижением агрегата и выполнением технологического процесса.

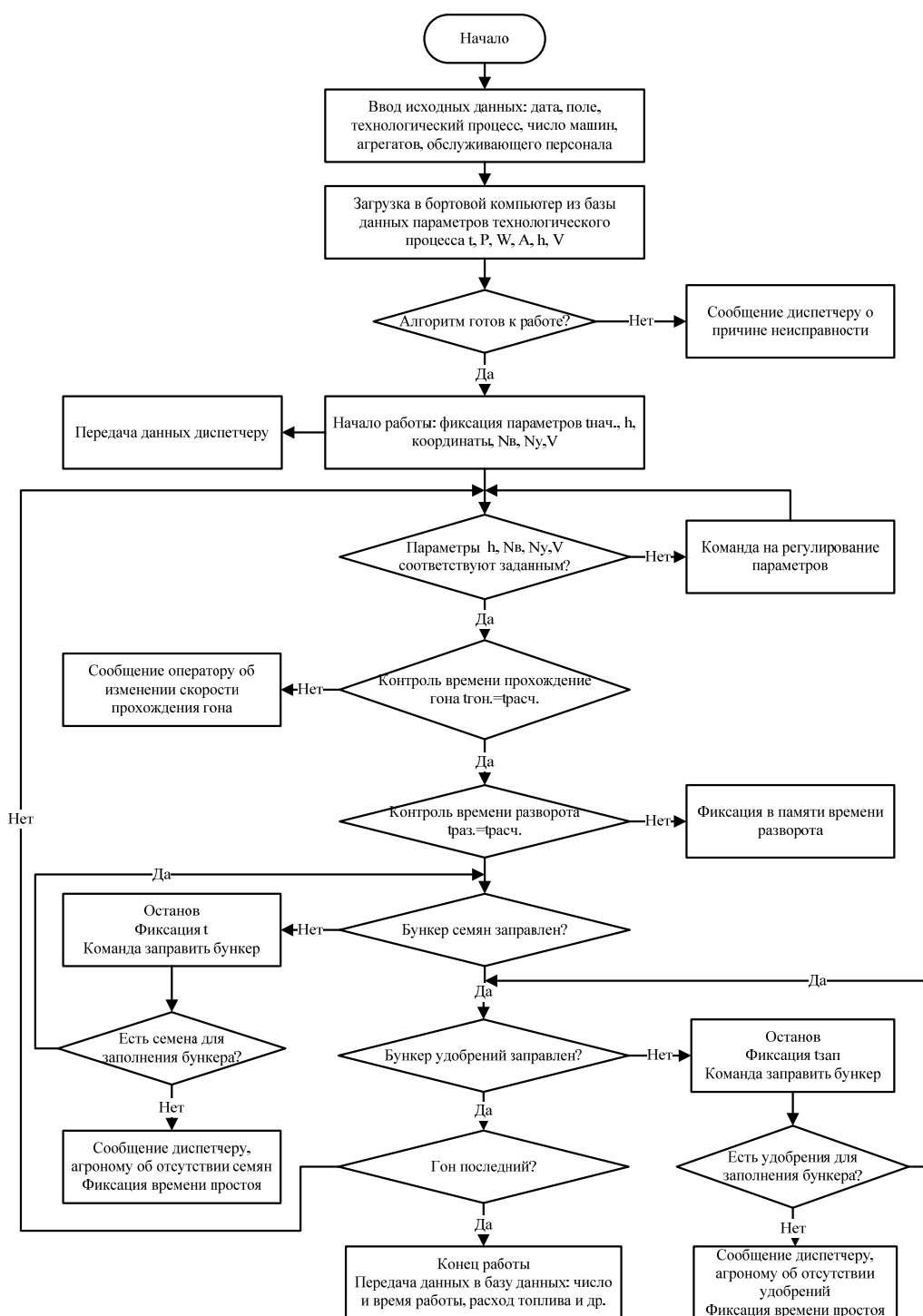


Рисунок 3 – Алгоритм контроля и управления посевом зерновых культур РТКСХ

Кроме того, робот должен быть универсальным. Однако при самом поверхностном рассмотрении этого вопроса получается, что только система позиционирования может быть общей для всех операций [2].

Требования, которые предъявляются к РТК это:

- востребованность производителями сельскохозяйственной продукции;
- безопасность, энергоэффективность и высокая надежность в работе;
- окупаемость;
- качество выполнения технологической операции должно соответствовать технологическим нормам;
- дистанционный контроль за выполнением работ и при необходимости дистанционного управления.

Решение задачи дистанционного управления РТКСХ на поле, выполняющего различные технологические операции в полеводстве наталкиваются на ряд трудностей.

Во-первых, это выбор частоты, на которой должна осуществляться связь с мобильным агрегатом. Для дистанционного контроля и управления технологическим процессом, кроме приема телеметрической информации необходима передача видеоизображения качества выполнения работы в реальном масштабе времени. В таблице 1 представлена общая классификация основных стандартов беспроводной передачи данных. При расстоянии между мобильным агрегатом и оператором, осуществляющим управление в пределах прямой видимости, эта задача решается на частотах 2,4 ГГц (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee). Из этих трех стандартов беспроводной передачи данных Wi-Fi имеет наибольшую дальность передачи данных до 1000 м и максимальную скорость 150–600 Мбит/с. Если же необходимо обеспечить управление агрегатом вне прямой видимости, то во всем мире существует группа радиочастотных диапазонов 434/868 МГц открытых для свободного использования, в которых не существуют стандартов беспроводной связи. На этих частотах можно обеспечить дальность связи до 10 км. При относительно невысокой скорости передачи данных 500 Кбит/с по сравнению с частотами 2,4 ГГц и выше, встает вопрос о невозможности работы нескольких объектов одновременно.[3]

Рассмотрим возможности передачи телеметрической и видеоинформации на частотах 434/868 МГц.

В реальном масштабе времени и в широком диапазоне частот порядка 6 МГц с помощью передатчика (как это делается при передаче телевизионного сигнала) передавать видеоизображение невозможно с одной стороны из помех, которые появляются при работе других таких же объектов. Остается передавать изображение видеосигнала в последовательном коде в узком диапазоне частот. Но при этом изображение видеосигнала получается плохого качества с мерцанием изображения в связи с низкой частотой кадра.

Ранее в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) прорабатывался вопрос автоматического вождения трактора, использующего индукционный метод ориентации на поле. В качестве ориентира для индукционной САВ использовалась напряженность магнитного поля (H) токнесущего провода помещенного в почву на глубину  $0,5 \div 1$  м. Жесткая матрица заложенных в земле проводов не давала возможности удовлетворительного вождения при смене орудий и различной шириной захвата, в связи с тем, что при удалении от токнесущего провода вектор магнитного поля поворачивается на угол, стремящийся к  $180^\circ$ , причем угол поворота зависит от проводимости и диэлектрической проницаемости почвы, которые, в свою очередь зависят от влажности, структуры, плотности и других характеристик. [4]

В настоящее время США развивает и внедряет спутниковую навигационную систему позиционирования NAVSTAR GPS. Принцип работы системы основан на измерении расстояния от исследуемого объекта до спутников, положение которых известно с очень большой точностью благодаря установке на них атомных часов и известной орбиты вращения вокруг земли. Расстояние вычисляется по времени задержки распространения

сигнала от послышки его спутником до получения приемником. Многолетний опыт использования GPS в сельскохозяйственном производстве дает хорошие результаты по определению точности позиционирования мобильных средств. ВИМ проводил работы по определению точности позиционирования системы GPS курсоуказателя Guide500 применительно к сельскохозяйственному производству.

Таблица 1 – Общая классификация основных стандартов беспроводной передачи данных

	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	434/868 МГц	GSM/GPRS/EDGE	3G
Частотный диапазон, МГц	2400–2483	2400–2483	2412–2484	434/868	900/1800	1885–2025; 2110–2200
Скорость передачи данных, кбит/с	250	721	11000/54000	500	144/171	144/384/2048
Дальность связи, м	200	Класс 1 – 100; Класс 2 – 10; Класс 3 – 1	100, С внешней антенной до 5000	1000 С внешней антенной до 10 000	Во всей зоне покрытия	Во всей зоне покрытия
Потребление тока, active мА/sleep мкА	30/1	70/20	450	30/1	350/3500	350/3500
Модуляция, доступ к среде	DSSS	FHSS	DSSS	FHSS	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA/CDMA
Топология системы	«точка–точка», «звезда», сеть	«точка–точка», «звезда», сеть	«точка–точка», «звезда»	«точка–точка», «звезда», сеть	Сотовая сеть	Сотовая сеть

В настоящее время в сельскохозяйственное производство внедряется технология точного земледелия, а для этого необходима точность позиционирования  $3 \div 5$  см. Поэтому сейчас продвигается идея совместного использования ГЛОНАСС/GPS, в связи с чем, появился термин – глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). Чтобы уменьшить погрешности определения координат, обусловленные атмосферными и многолучевыми эффектами, используются как инструментальные, так и вычислительные методы. В качестве основного инструментального метода, позволяющего увеличить точность вычислений координат, применяется дифференциальный режим работы ГНСС,

В дифференциальном режиме используются базовые станции (БС), на которых устанавливаются высокоточные приемники ГНСС. Координаты этих БС известны с высокой точностью. При приеме сигнала спутника вычисляются поправки между вычисленными мгновенными значениями координат и известными координатами БС. Эти поправки по каналу радиосвязи передаются на мобильный объект для уточнения его положения, что позволяет повысить точность позиционирования до  $2 \div 5$  см.

Чтобы обеспечить наилучшие точностные характеристики для однодиапазонной односистемной навигационной аппаратуры требуется 12 каналов приема. Дополнительная система требует прибавки еще 12 каналов приема. Для дальнейшего улучшения точностных характеристик посредством приема и учета корректирующей информации также требуются отдельные каналы приема излучаемых этими системами сигналов. [5, 6]

Одним из наиболее интересных и бурно развивающихся направлений в современной электронике является так называемое SoftwareDefinedRadio (SDR).

Суть этой концепции заключалась в том, чтобы создать универсальное устройство, способное работать с максимально возможным количеством различных радиостандартов, в широком диапазоне частот с различными принципами модуляции и кодировки. При этом

предполагалось предельно упростить аналоговую часть устройства, а все задачи по декодированию и обработке сигналов возложить на компьютер.

Базовой частью всех SDR является микроэлектронные чипы. Лидерами в их производстве признаны американские компании Qualcomm, Broadcom, TexasInstruments, Trimble. Эти фирмы выпускают современные чипы с поддержкой GSM/GPRS/3G/4G, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, GPS/GLONASS/Galileo. В качестве примера последних разработок можно привести такие чипы, как TIWL187x, Qualcomm–Snapdragon, BroadcomBCM47521, ST–EricssonCG1950. В их производстве используются самые современные технологии. Основное отличие этих моделей заключается в низком энергопотреблении, малых габаритных размерах и современных математических методах обработки сигнала.

В последнее время наблюдается значительный интерес к разработке и внедрению лазерных систем позиционирования, которые начинают применять в автоматизации, робототехнике, беспилотниках, автономного и полуавтономного управления автомобилем, инженерной геодезии. Такая технология позволяет дистанционно измерять расстояние до объекта и широко применяется в задачах картирования и разводки с борта наземных транспортных средств, воздушных судов, космических кораблей и искусственных спутников, как в гражданских, так и в военных целях. Эта технология применяется в области машинного зрения для распознавания объектов, реализации человеко–машинного интерфейсов и трехмерного воссоздания пространства. Существует несколько физических принципов и связанных с ними технологий, используемых при разработке датчиков расстояния. Одним из типов измерителей расстояний является так называемый LIDAR. Это аббревиатура образована от слов LightandraDAR. LIDAR представляет собой технологию дистанционного зондирования для оценки расстояния (дистанции, глубины) путем облучения объекта лучом лазера, а затем получения отраженного излучения на фотодетектор. Это принцип измерения расстояния известен как измерение времени пролета (Time-of-Flight, TOF). Оценка расстояний получается с очень высокой точностью всех объектов за исключением объектов с высокой (зеркальной) отражательной поверхностью или сильной поглощающей поверхностью. В этом случае отраженный сигнал не вернется на фотодетектор. [7, 8, 9].

На рисунке 4 представлен внешний вид некоторых моделей LIDARов. В таблице 2 представлены характеристики этих устройств. Из анализа характеристик представленных образцов можно сделать вывод, что качество изображения (четкость, разрешающая способность) значительно уступают видеокамерам. Преимуществом, конечно, является возможность видеть изображение окружающего пространства в ночное время суток. Однако, цена такого устройства составляет сотни тысяч рублей, что для использования в сельскохозяйственном производстве пока малопривлекательно.

Робот должен обладать собственным техническим зрением для предотвращения столкновений с различными объектами, а также для транспортного перемещения к обрабатываемому полу и обратно. В настоящее время зарубежные производители выпускают датчики, трехмерные камеры, а также системы технического зрения. [10]

Комбинированный навигационный комплекс относится к навигационным системам и может быть использован для навигации наземных роботов в практически любых условиях окружающей среды. Примерами таких роботов могут быть автоматические сельскохозяйственные роботы.

В настоящее время зарубежные производители выпускают датчики, трехмерные камеры, а также системы технического зрения. На рисунке 5 представлен датчик технического зрения IFM Electronic O2D2. Принцип его действия основан на архитектуре CMOS. Датчик работает при постоянном напряжении и может эксплуатироваться при температуре от –10 до 50 °С. Размеры его поля зрения от 15 x 11 мм до 1280 x 960 мм.



*Рисунок 4 – Датчики кругового обзора 3D ЛИДАР Velodyne*



*Рисунок 5 – Датчики технического зрения IFM Electronic серии O2D2*



*Рисунок 6 – Система технического зрения со сверхбыстрой локализацией объектов*

*Рисунок 7 – «ВИМ» – ЭЛЕКОМ 6,0*

Kodak ISS недавно представила многофункциональный сенсор КАС-0 040 0 для решения задач технического зрения. Датчик отличается увеличенным на 20% по сравнению со стандартным VGA количеством пикселей (768x488), большим полем зрения для лучшего распознавания образов и удвоенной частотой кадров (до 60 Гц) для скоростной съемки. В программное обеспечение датчика входят алгоритмы детектирования изображений. Чувствительный и малошумящий датчик идеально подходит для приложений с низкими условиями освещенности.

Таблица 2 – Характеристики датчиков кругового обзора 3D ЛИДАР Velodune

Характеристика	HDL-64E	HDL-32E	VLP-16
Число каналов (лучей)	64	32	16
Максимальный диапазон	100-120 м	80-100 м	100 м
Регистрация второго прихода	да	да	да
Доп. характеристика	интенсивность	калиброванная отражательная способность	калиброванная отражательная способность
Точность	+/- 2 см	+/- 2 см	+/- 3 см
Скорость вращения (программируемая)	5-20 об./сек	5-20 об./сек	5-20 об./сек
Угол обзора (гориз. х верт.)	360°х 26,9° (от +2° до -24,9°)	360°х 41,33° (от +10,67° до -30,67°)	360°х 30° (от +15° до -15°)
Угловое разрешение по горизонтали (зависит от скорости вращения)	0,08°- 0,35°	0,08°- 0,35°	0,1°- 0,4°
Угловое разрешение по вертикали	0,4°	1,33°	2°
Выход	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Поток выходных данных	1,3 млн. точек/сек при рег. только 1-го прихода, 2,2 млн. точек/сек при рег. 2-го прихода	0,7 млн. точек/сек	0,3 млн. точек/сек
Диапазон рабочих температур	от -10° до +65° C	от -10° до +60° C	от -10° до +60° C
Температура хранения	от -10° до +85° C	от -10° до +105° C	от -10° до +105° C
Защита от влаги	IP67	IP67	IP67
Устойчивость к ударным нагрузкам		амплитуда 500 м/сек <sup>2</sup> продолжительность 11 мсек	амплитуда 500 м/сек <sup>2</sup> продолжительность 11 мсек
Устойчивость к вибрации		5-2000 Гц 3g	5-2000 Гц 3g
Напряжение питания	12-32 В	12-32 В	12-32 В
Электропотребление	60 Вт	12 Вт	8 Вт
Вес	12,3 кг	1 кг	0,83 кг

Наибольший интерес представляют системы технического зрения. Так на рисунке 6 представлена система технического зрения F250.

Несмотря на сложности в создании робота для сельскохозяйственного производства, эта тема относится к приоритетному направлению в связи с тем, что она может сыграть роль локомотива в развитии всей отечественной науки и техники, как когда-то космонавтика дала мощный толчок научному прогрессу во всех сферах промышленного производства. За рубежом выделяется много средств на разработку роботов для сельскохозяйственного производства. Пока формат разработок ограничен решением небольших роботов для узкоспециализированных задач. Отрабатывается автоматическое вождение трактора по заданной программе, поскольку система позиционирования и вождение агрегата является общей для всех технологических операций. Лидерами в этих вопросах являются США. В связи с появлением систем машинного зрения роботы для использования в сельском хозяйстве демонстрируют быстрый прогресс, несмотря на то, что большинство продуктов – это прототипы или опытные образцы на фазе тестирования. [11]

На рисунке 7 представлен РТКСХ разработанный в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Он предназначен для внесения жидких удобрений и средств химической защиты, транспортировки груза, мониторинг почвы и растений и др. Двигатель ЭЛЕКОМ 6,0 состоит из двух электромоторов мощностью 3000 Вт. Тип движителей – гусеничный, а масса агрегата 400 кг. Он способен развивать скорость до 8 км/час и управляется через систему ГЛОНАСС. Использование гусениц вместо колес снижает давление ходовой части на почву и растительный покров, а также увеличивает тяговые свойства и проходимость агрегата.

В настоящее время наиболее сложной задачей является роботизация мощных мобильных средств, выполняющих технологические операции от подготовки почвы до уборки урожая. В этом сегменте мобильных роботов пока разработок очень мало.

Компания Case IH представила концептуальное автономное оборудование – безкабинный трактор Case IH, который способен автономно работать в поле с разнообразным прицепным оборудованием (рисунок 8).

Эта машина оснащена полностью интерактивным интерфейсом, который позволяет осуществлять дистанционный контроль выполнения запрограммированных операций. Бортовая система автоматически учитывает ширину прицепного оборудования и составляет карту наиболее эффективных маршрутов в зависимости от рельефа, имеющихся препятствий и другой техники, работающей на том же поле. Оператор имеет возможность дистанционно отслеживать и изменять маршруты через рабочий интерфейс своего настольного компьютера или планшета. [12, 13]



Рисунок 8 – Автономный трактор CaseIH с системой автоматического вождения и телематики

Благодаря использованию радара, лидара (прибора светового выявления и установления дальности) и бортовых видеокамер машина способна определять наличие неподвижных и подвижных объектов на своем пути и самостоятельно останавливаться, пока оператор не задаст новый маршрут движения после получения звуковых и визуальных уведомлений. Трактор немедленно останавливается в случае потери сигнала GPS или данных о текущих координатах, а также при нажатии кнопки остановки вручную. Задачи робота можно изменять в реальном времени с помощью дистанционного интерфейса.

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и компания «КБ Аврора» разрабатывают робототехническое беспилотное средство сельскохозяйственного назначения Робтрак «ВИМ 0,6(0,9)–36» на базе трактора Беларус 320.4, представленное на рисунке 9. Оно оснащено стеклопластиковым корпусом вместо кабины и съемными гусеничными ходовыми системами. [14]



*Рисунок 9 – Роботрак «ВИМ 0,6(0,9)–36» в агрегате с опрыскивателем для внесения в почву жидких минеральных удобрений*

### **Заключение**

В последние годы темпы по разработке, производству и продажи РТКСХ увеличиваются. Особенно быстрое развитие рынка робототехнических устройств происходит для животноводческих ферм, полеводческих хозяйств, а также для садоводства.

ВСША, Японии, Южной Кореи и многих других странах РТК уже широко используются в сельском хозяйстве.

Научно–технический прогресс в автоматизации и механизации сельскохозяйственного производства, направленный на повышение производительности труда и, как следствие, увеличение выпускаемой продукции, дает возможность переходить в развитых странах к роботизированному производству.

Так, например, по прогнозу экономических служб Японии рынок робототехники к 2020 году составит для сельскохозяйственной и пищевой промышленности 121 млрд. йен. В 2014 году он был 1 млрд. йен.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жалнин Э.В., Годжаев З.А., Флоренцев С.Н. Концептуальные принципы интеллектуальных сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочного комбайна // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 6. – С. 9–16.
2. Гончаров Н.Т., Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Афонина И.И., Лужнова Е.С., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Основные направления внедрения роботов в сельскохозяйственное производство России // Автоматизация в промышленности. – 2017. – Т. 01. – С. 38–40.

3. Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Ключевые технологии и прогноз развития сельскохозяйственной робототехники // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 6 (21). – С. 35–41.
4. Измайлов А.Ю., Афанасьев Р.А. Перспективы роботизации агрохимических работ // Журнал "Плодородие" – 2016 – № 5 (92) – С. 9–12.
5. Смирнов И.Г., Артюшин А.А., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырёв А.И., Цымбал А.А. Робототехнические средства в растениеводстве // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2016. №118(04). Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/archive.asp?n=118>
6. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 3. – С. 15–20.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Лужнова Е.С., Хорошенков В.К. Автоматизированная система управления вождением сельскохозяйственного агрегата с использованием GPS/ГЛОНАСС // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сб. науч. докл. Межд. науч.–техн. конф. – М.: ВИМ, 2015. – С. 133–137.
8. Гришин А.П., Гришин А.А. Перспективы развития роботизированных технологий в растениеводстве // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 12. – С. 42–45.
9. Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Гришин А.П., Гришин А.А. Робототехника и агрохимическое обеспечение растениеводства // Журнал "Тракторы и сельхозмашины" – 2016 – № 9 – С. 40–43.
10. Grants Modernization 2013/ <http://nifa.usda.gov/grants-modernization>
11. Донник И. М. Воронин Б. А. Направления развития аграрной экономики в современной России // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 11
12. The Massachusetts robotics revolution: inspiring innovation, driving growth and competitiveness in leading industries. URL: [http://c.mcdn.com/sites/www.masstlc.org/resource/resmgr/annual\\_reports.masstlc\\_robotics\\_final\\_web.pdf](http://c.mcdn.com/sites/www.masstlc.org/resource/resmgr/annual_reports.masstlc_robotics_final_web.pdf)
13. Baerdemaeker J. De, Ramon H., Anthonis J., Speckmann H. and Munack A. Advanced Technologies and Automation in Agriculture // Control systems, robotics, and automation – Vol. XIX
14. Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения // Журнал "Тракторы и сельхозмашины" – 2016 – №10 – С. 41–44.

**Годжаев Захид Адегизалович**

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

доктор технических наук, профессор, заместитель  
директора по инновационной деятельности;

Клязьминская ул., д. 11, к. 1, кв. 25;

Тел.: 8(499) 174–81–82

E-mail: [fic51@mail.ru](mailto:fic51@mail.ru)

**Хорошенков Вячеслав Кузьмич**

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией;

3-я Институтская ул., д. 17, кв. 107, Москва, Россия;

Тел.: 8(495)657–16–74

E-mail: [vim-avtomatic@rambler.ru](mailto:vim-avtomatic@rambler.ru)

**Гончаров Николай Тимофеевич**

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

старший научный сотрудник;

Новокосинская ул., д.20, к.4, кв. 110, Москва, Россия;

Тел.: 8 (925) 833–19–18

E-mail: [vim-avt@rambler.ru](mailto:vim-avt@rambler.ru)

**Ильченко Екатерина Николаевна**

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

инженер;

Старая Басманная ул., д.21/4, к. 2, кв. 21, Москва,

Россия;

Тел.: 8(985) 192–85–59

E-mail: [kat-sama@mail.ru](mailto:kat-sama@mail.ru)

Z.A. GODZHAYEV, V.K. KHOROSHENKOV, N.T. GONCHAROV, Ye.N. ILCHENKO

## DEVELOPMENT TRENDS OF MECHANOTRONICS, AUTOMATION AND ROBOTIZATION FOR SYNTHESIS OF NEW HIGH PRODUCTIVITY TECHNOLOGIES, AND MACHINES IN AGRICULTURE

**Abstract.** *The article presents the structural and functional diagrams of the robotic unit. The requirements necessary for creating a robotic unit and the requirements for a modern robotics facility are described. In this connection, an overview of the remote control means of the robotic machine and tractor unit is made. Advantages and disadvantages of methods for transmitting information about the location and condition of the unit are considered. Brief information is given in the field of advanced development of high-performance agricultural machines.*

**Keywords:** *automation, robotic complexes, agriculture, global satellite system, technical vision.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Zhalnin E.V., Godzhayev Z.A., Florentsev S.N. Kontseptualnyye printsipy intellektualnykh selskokhozyaystvennykh mashin na primere zernouborochnogo kombayna // Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. – 2017. – № 6. – S. 9–16.
2. Goncharov N.T., Izmaylov A.YU., Khoroshenkov V.K., Smirnov I.G., Afonina I.I., Luzhnova Ye.S., Alekseyev I.S., Lonin S.E. Osnovnyye napravleniya vnedreniya robotov v selskokhozyaystvennoye proizvodstvo Rossii // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. – 2017. – T. 01. – S. 38–40.
3. Godzhayev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Klyuchevyye tekhnologii i prognoz razvitiya selskokhozyaystvennoy robototekhniki // Innovatsii v selskom khozyaystve. – 2016. – № 6 (21). – S. 35–41.
4. Izmaylov A.YU., Afanasyev R.A. Perspektivy robotizatsii agrokhimicheskikh rabot // Zhurnal "Plodorodiye" – 2016 – № 5 (92) – S. 9–12.
5. Smirnov I.G., Artyushin A.A., Khort D.O., Filippov R.A., Kuturov A.I., Tsymbal A.A. Robototekhnicheskiye sredstva v rasteniyevodstve // Nauchnyy zhurnal KubGAU [Elektronnyy resurs]. Krasnodar: KubGAU, 2016. №118(04). Rezhim dostupa: <http://www.ej.kubagro.ru/archive.asp?n=118>
6. Izmaylov A.YU., Khoroshenkov V.K., Luzhnova Ye.S. Upravleniye selskokhozyaystvennymi mobilnymi agregatami s ispolzovaniyem navigatsionnoy sistemy GLONASS/GPS // Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. – 2015. – № 3. – S. 15–20.
7. Izmaylov A.YU., Lobachevskiy YA.P., Luzhnova Ye.S., Khoroshenkov V.K. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya vozhdeniyem selskokhozyaystvennogo agregata s ispolzovaniyem GPS/GLONASS // Intellektualnyye mashinnyye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya selskogo khozyaystva: Sb. nauch. dokl. Mezhd. nauch.–tekhn. konf. – M.: VIM, 2015. – S. 133–137.
8. Grishin A.P., Grishin A.A. Perspektivy razvitiya robotizirovannykh tekhnologiy v rasteniyevodstve // Traktory i selkhoz mashiny. – 2015. – № 12. – C. 42–45.
9. Sychev V.G., Afanasyev R.A., Grishin A.P., Grishin A.A. Robototekhnika i agrokhimicheskoye obespecheniye rasteniyevodstva // Zhurnal "Traktory i selkhoz mashiny" – 2016 – № 9 – C. 40–43.
10. Grants Modernization 2013/ <http://nifa.usda.gov/grants-modernization>
11. Donnik I. M. Voronin B. A. Napravleniya razvitiya agrarnoy ekonomiki v sovremennoy Rossii // Agrarnyy vestnik Urala. – 2015. – № 11
12. The Massachusetts robotics revolution: inspiring innovation, driving growth and competitiveness in leading industries. URL: [http://c.mcdn.com/sites/www.masstlc.org/resource/resmgr/annual\\_reports.masstlc\\_robotics\\_final\\_web.pdf](http://c.mcdn.com/sites/www.masstlc.org/resource/resmgr/annual_reports.masstlc_robotics_final_web.pdf)
13. Baerdemaeker J. De, Ramon H., Anthonis J., Speckmann H. and Munack A. Advanced Technologies and Automation in Agriculture // Control systems, robotics, and automation – Vol. XIX
14. Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Bespilotnoye mobilnoye energosredstvo selskokhozyaystvennogo naznacheniya // Zhurnal "Traktory i selkhoz mashiny" – 2016 – №10 – C. 41–44.

**Gojayev Zahid Adegizalovich**

FGBNU FNAC VIM;  
 Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director  
 for Innovation;  
 Klyazminskaya Str., 11, building 1, apt. 25 Moscow,  
 Russia;  
 Ph.: 8 (499) 174–81–82  
 E-mail: fic51@mail.ru

**Khoroshenkov Vyacheslav Kuzmich**

FGBNU FNAC VIM;  
 Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory;  
 3-ya Institutskaya ul., 17, apt. 107, Moscow, Russia;  
 Ph.: 8 (495) 657–16–74  
 E-mail: vim-avtomatik@rambler.ru

**Goncharov Nikolay Timofeevich**

FGBNU FNAC VIM;  
 Senior Researcher;  
 Novokosinskaya Street, 20, building 4, apt. 110, Moscow,  
 Russia;  
 Ph.: 8 (925) 833–19–18  
 E-mail: vim-avt@rambler.ru

**Ilchenko Ekaterina Nikolaevna**

FGBNU FNAC VIM;  
 Engineer;  
 Old Basmannaya Str., 21/4, building 2, apt. 21, Moscow,  
 Russia;  
 Ph.: 8 (985) 192–85–59  
 E-mail: kat-sama@mail.ru

М.В. ГРЯЗЕВ, С.Н. ЛАРИН, А.А. ПАСЫНКОВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИЛЫ ОТБОРТОВКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ АНИЗОТРОПЕЙ

**Аннотация.** Операция отбортовки достаточно активно применяется при изготовлении изделий с горлом. Ее распространённость на производстве обуславливает огромное число отечественных и иностранных работ в области исследования данной операции, которые с сожалением не учитывают влияние механических свойств заготовки. В связи с этим исследование данного процесса с учетом анизотропии является актуальной задачей. В статье рассмотрена отбортовка листового полуфабриката с отверстием на промежуточном этапе деформирования на радиальной матрице. Выполнено исследование влияния таких важных параметров как коэффициента отбортовки и радиуса закругления рабочего инструмента на максимальную величину силы, возникающую при реализации отбортовки. Полученные результаты теоретических исследований могут быть использованы при создании новых технологий получения обработкой давлением листовых фланцевых деталей, основной штамповочной операцией которых может быть отбортовка плоских заготовок, которые учитывали бы анизотропию.

**Ключевые слова:** вытяжка, деформирование, напряжения, деформации, сила, разрушение.

### Введение.

Для изготовления изделий с горлом самым применяемым является метод листовой штамповки, основанный на втягивании пуансоном внутреннего контура отверстия листовой заготовки в рабочую поверхность матрицы, и называемый отбортовкой. Данная операция очень широко используется на предприятиях машиностроения, в связи, с чем ей было посвящено огромное число отечественных и иностранных работ [1–10]. Однако эти исследования не учитывают влияние механических свойств заготовки, в частности, анизотропию. В связи с этим исследование данного процесса с учетом развивающейся и начальной анизотропии является актуальной задачей. При создании прогрессивных технологий штамповки тонкостенных фланцевых изделий посредством отбортовки, необходимо определить силовые режимы, предельные возможности деформирования, а также геометрические размеры изготавливаемой детали.

### Основная часть.

На рисунке 1 приведена схема отбортовки листовой заготовки с круглым отверстием с коэффициентом  $m_0 = r_0 / R_0$  на том этапе деформирования, при котором максимальны силы и напряжения. В исследуемом процессе в одно и то же время реализуется как рост значения периметра отверстия, так и изгиб формоизменяемой части заготовки по рабочему контуру матрицы. В дальнейшем происходит выравнивание формоизменяемой части по форме цилиндрической части матрицы и пуансона.

Материала формоизменяемой заготовки считаем несжимаемым, имеющим начальную анизотропию. В процессе отбортовки он изотропно упрочняется. Для исследуемого процесса справедливо условие текучести Мизеса–Хилла и ассоциированный закон течения. Моделирование ведем с предположением, что напряженное состояние – плоское. Трение на границах инструмента и заготовки учитываем, и считаем, что реализуется закон трения Кулона.

В качестве метода расчета исследуемого процесса применялся метод оценки энергосиловых параметров, в основе которого лежит одновременное решение приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности. Зона 1 заготовки, лежащая напротив нижней части торца пуансона, всегда не сильно отклоняется от него, и поэтому, значения изгибающего момента на зоне между первым и вторым участками зоны 2 незначительны.

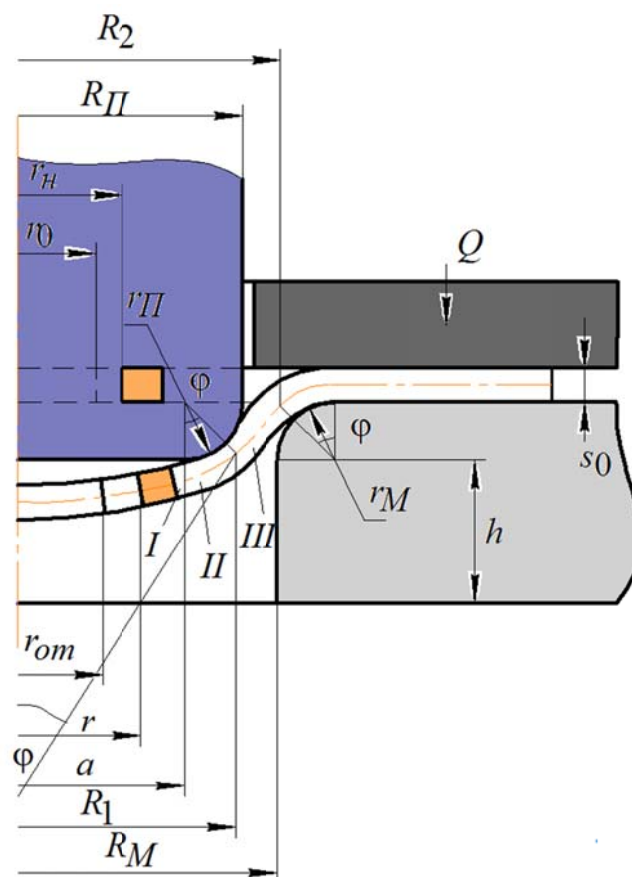


Рисунок 1 – К теоретической оценке отбортовки листовых заготовок

В заготовке на первом участке зоны 1 отсутствуют внешние напряжения, и поэтому напряженное состояние заготовки на этом участке может быть установлено путем решения дифференциального уравнения равновесия [1–4] параллельно с условием текучести для  $r = r_0$ ,  $\sigma_r = 0$ .

Определим состояние заготовки на участке 1 зоны I. Скорости деформации в различных направлениях на поверхности по толщине заготовки можно определить по зависимостям, представленным в работе [3].

С учетом уравнения  $\xi_r + \xi_\theta + \xi_z = 0$  и уравнения позволяющего установить связь скоростей деформаций и напряжений [1–4], получим

$$\frac{dV_r}{dr} = \frac{V_r(\sigma_r + \sigma_\theta)}{\sigma_\theta r(1+R) - Rr\sigma_r} - \frac{V_r}{r}. \quad (1)$$

С учетом дифференциального уравнения равновесия, после интегрирования представим формулу (1) в виде:

$$\sigma_{rn} = \sigma_{rn-1} - \frac{r_n - r_{n-1}}{r_{n-1}} \left[ \sigma_{rn-1} \left( 1 - \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_\theta(1+R) - R\sigma_r} \right) - \sigma_{\theta n-1} \right]. \quad (2)$$

Затем аналогично определим  $\sigma_{\theta n}$  из условия текучести при  $r = r_0$ ,  $\sigma_r = 0$ . Участок 2 зоны 2 взаимодействует с деформирующим инструментом. На внутреннюю часть изделия на участке 2 действуют напряжения, обусловленные силами трения.

Для того чтобы определить напряжения в меридиональных и окружном направлениях на скругленной поверхности пуансона (участок 2) решаем совместно условие равновесия и условие пластичности при  $\phi = \phi_0$   $\sigma_r = \sigma_{r1} \Big|_{r=a} + \sigma_s \Big|_{r=a} \cdot \frac{s}{4r_{nc}}$ , где  $\phi$  – угол,

определяющий положения исследуемого участка заготовки;;  $r_{nc} = r_n + 0,5s_0$ ;  $\sigma_{r1}$  – величина напряжения в меридиональном направлении, действующего на поверхности расположенной противоположно плоской части торцевой поверхности деформирующего инструмента (участок 1) и вычисленная при  $r=a$ ;  $\sigma_s$  – сопротивление материала пластическому деформированию с учетом его упрочнения при  $r=a$ ;  $r_n$  – радиус закругления пуансона. Интегрирование уравнения выполняем численно методом конечных разностей от границы между вторым и первым участками очага деформации.

Участок 3 очага деформации 3 формоизменяется без участия силы инструмента. Напряженное состояние на участке конической формы найдем проинтегрировав дифференциальное уравнение равновесия параллельно с условием текучести для  $r = R_1$ . Максимально возможное значение напряжений, формирующихся в зоне разделения очага деформации может быть определена при  $r = R_2$ , то есть когда фрагменты заготовки изгибаются на кромке матрицы. Степень влияния данного изгиба на  $\sigma_r$  определяется:

$$\sigma_r = \left( \sigma_{r2} \Big|_{r=R_1} + \sigma_s \Big|_{r=R_1} \cdot \frac{s}{4r_{nc}} \right) \Big|_{r=R_2} + \sigma_s \Big|_{r=R_2} \frac{s}{4(r_M + 0,5s_0)}, \quad (4)$$

где  $r_M$  – радиус закругления матрицы.

В уравнении (4) величина после знака равенства позволяет выполнить учет приращения напряжений в меридиональном направлении, которое возникает при выпрямлении заготовки. В этом выражении значение радиуса отбортовываемого отверстия в текущий момент времени  $r_{om}$  зависит от угла, который оценивается по величине перемещения пуансона. По мере продвижения пуансона этот угол изменяется от  $\pi/2$  в начальный момент формоизменения до 0, в конечный момент, когда сила максимальна, т.е. радиусы формоизменяющего инструмента находятся на одном уровне. Вместе с падением значения величины угла, наблюдается рост радиуса отверстия.

Как описано в работе [4], если учесть, что значение длины образующей заготовки в процессе отбортовки не меняется, то судя по геометрии можно получить выражение, разрешающее нам выявить связь между значением радиуса отверстия и углом  $\varphi$  для того момента, при котором зазор между инструментами приблизительно одинаков с толщиной заготовки:

$$r_{om} = r_0 + (r_M + r_n + s_0)[0,57 + \lg(\varphi/2) - \varphi], \quad (5)$$

где  $r_{om}$  – величина радиуса отбортовываемого отверстия в текущий момент, достигаемое при величине угла  $\varphi$ , а  $r_0$  – радиус отверстия в заготовке.

При  $r_{om} \leq a$  (в самом начале процесса)

$$r_{om} = r_0 + 0,57(r_M + r_n + s_0). \quad (6)$$

Величина силы операции отбортовки определяется по соотношению:

$$P_{om} = 2\pi R_2 s \left( \sigma_{r2} \Big|_{r=R_1} + \sigma_s \Big|_{r=R_1} \cdot \frac{s}{4r_{nc}} \right) \Big|_{r=R_2} + \sigma_s \Big|_{r=R_2} \frac{s}{4(r_M + 0,5s_0)} \cos \varphi. \quad (7)$$

В процессе формоизменения в один и то же момент реализуется уменьшение величины толщины детали и упрочнение материала заготовки. Все это противоположно влияет на значение напряжений в меридиональном направлении. В итоге можно сказать, что изменение толщины заготовки, и в частности утонение уменьшает значения напряжений в меридиональном направлении, а упрочнение, наоборот – увеличивает.

В итоге можно сказать что для того чтобы учесть упрочнение материала нужна информация о деформированном состоянии заготовки.

На рисунках 2 и 3 представлены графические зависимости изменения относительной максимальной величины силы операции отбортовки  $\bar{P}$  от коэффициента  $R$  при постоянных

значениях коэффициентов трения  $\mu$  и отбортовки  $m_f$  для материала со следующими характеристиками:  $\sigma_{0,2}=29,20$  МПа;  $B=2,368$ ;  $n=0,440$ .

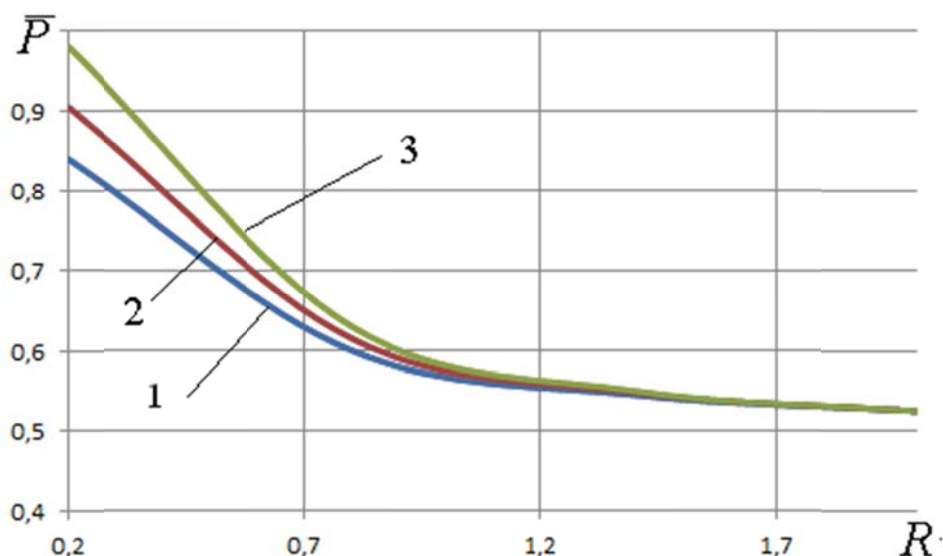


Рисунок 2 – Графические зависимости изменения  $\bar{P}$  от  $R$ : 1 –  $\mu = 0,1$ ; 2 –  $\mu = 0,2$  3 –  $\mu = 0,3$

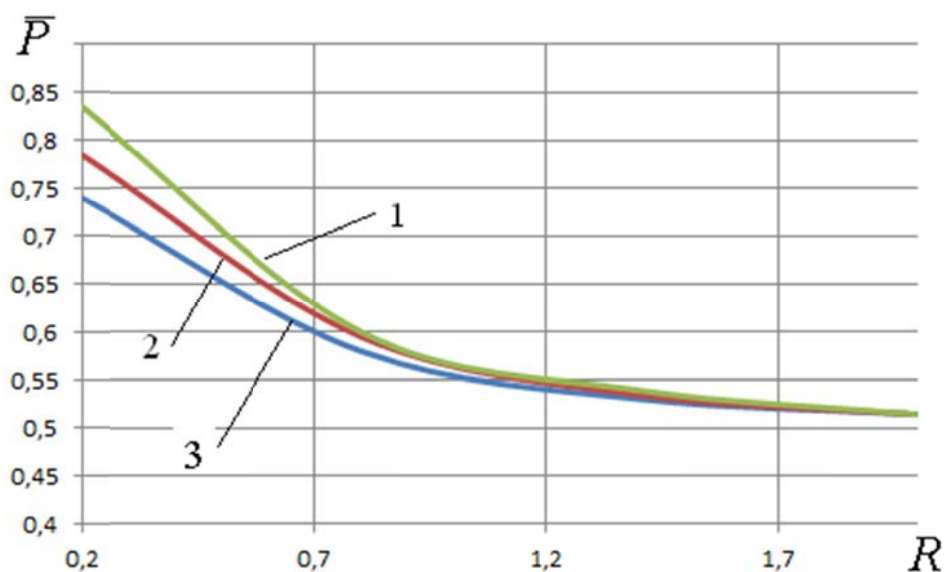


Рисунок 3 – Графические зависимости изменения  $\bar{P}$  от  $R$ : 1 –  $m_0 = 0,6$ ; 2 –  $m_0 = 0,7$  3 –  $m_0 = 0,8$

Анализ графических зависимостей, приведенных на рисунках 2 и 3, показывает, что увеличение коэффициента нормальной анизотропии  $R$  от 0,2 до 2 приводит уменьшению относительной максимальной силы процесса более чем в 2 раза.

#### Выводы.

В данной статье представлены результаты исследования отбортовки листового полуфабриката с отверстием на промежуточном этапе деформирования через матрицу с радиальной формой рабочей кромки с радиусом листового материала, характеризующегося анизотропными свойствами. Проанализировано влияние таких параметров, как коэффициент анизотропии, параметры трения и степень деформации на силу вытяжки с фланцем для

разных видов металлических материалов и размеров заготовок. Полученные результаты можно использовать как рекомендации при проектировании технологических процессов.

*Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Листовая штамповка: Расчет технологических параметров: Справочник / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин и др. М.: изд-во МАИ, 1999. 516 с.
3. Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула: ТулГУ, 2000. 195 с.
4. Пилипенко О.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И. Вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. – №1. 30–35.
5. Евсюков С.А. Отбортовка горловин на заготовках, имеющих анизотропное упрочнение // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. № 11С. 17–19.
6. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Нечепуренко Ю.Г. Глубокая вытяжка анизотропного упрочняющегося материала // Заготовительные производства. 2005. № 4. С. 38 – 44.
7. Mousavia A., Kunzeb T., Rochb T., Lasagnib A., Brosius A. Deep drawing process without lubrication – an adapted tool for a stable, economic and environmentally friendly process // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, Pages 48–53.
8. Jennifer Tennera, Kolja Andreasa, Adrian Radiansa, Marion Merklein Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, Pages 2245–2250
9. Senyong Chena, Yi Qina, Chenb J.G., Chee–MunChoy A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners // International Journal of Mechanical Sciences. 29 December 2017.
10. Junsong Jin, Xinyun Wang Lei, Deng Jiancheng Luo A single–step hot stamping–forging process for aluminum alloy shell parts with nonuniform thickness // Journal of Materials Processing Technology. Volume 228, February 2016, Pages 170–178.
11. Dongbin Wei, Liang Luo, Hideki Satoc ZhengyiJiang, Kenichi Manabec Simulations of hydro–mechanical deep drawing using Voronoi model and real microstructure model // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, P. 1033–1038.
12. WeiqinTang, ShiyaoHuang, DayongLi, YinghongPeng Mechanical anisotropy and deep drawing behaviors of AZ31 magnesium alloy sheets produced by unidirectional and cross rolling // Journal of Materials Processing Technology. Volume 215, January 2015, Pages 320–326
13. Abea Y., Ohmia T.,Moria K., Masudab T. Improvement of formability in deep drawing of ultra–high strength steel sheets by coating of die // Journal of Materials Processing Technology. Volume 214, Issue 9, September 2014, Pages 1838–1843

**Грязев Михаил Васильевич**  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,  
доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ  
ВПО «Тульский государственный университет»,  
адрес: 300028, ГСП, пр. Ленина, д. 92, ТулГУ,  
т. 8(4872) 35 14 82.

**Ларин Сергей Николаевич**  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,  
доктор технических наук, профессор, кафедры  
«Механика пластического формоизменения»,  
адрес: 300012, ГСП, пр. Ленина, д. 92, ТулГУ,  
т. 8(4872) 73 44 91.

---

M.V. GRYAZEV, S.N. LARIN

## THEORETICAL STUDIES OF POWER AT THE COLLECTION OF TRAINING FROM SHEET MATERIALS OF CHARACTERIZED ANISOTROPE

**Abstract.** *The flanging operation is quite actively used in the manufacture of products with a throat. Its prevalence in production causes a huge number of domestic and foreign works in the field of investigation of this operation, which unfortunately do not take into account the influence of the mechanical properties of the billet. In connection with this, the investigation of this process with allowance for the anisotropy is an actual problem. The article deals with the flanging of a sheet semi-finished product with a hole at the intermediate stage of deformation on a radial matrix. The influence of such important parameters as the flanging coefficient and the radius of curvature of*

*the working tool on the maximum force that occurs when flanging is realized is investigated. The obtained results of theoretical studies can be used to create new technologies for production by pressure treatment of sheet flange parts, the main stamping operation of which can be flanging flat pieces that take into account anisotropy.*

**Keywords:** *drawing, deformation, stress, deformation, force, destruction.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet punching. – Moscow: Mechanical Engineering, 1977. – 278 p.
2. Sheet stamping: Calculation of technological parameters: Reference book / V.I. Ershov, O.V. Popov, A.S. Chumadin and others. Moscow: Izd-vo MAI, 1999. 516 p.
3. Nechepurenko Yu.G., Yakovlev SP, Yakovlev SS. Deep drawing of cylindrical products from an anisotropic material. Tula: Tula State University, 2000. 195 pp.
4. Pilipenko OV, Yakovlev SS, Tregubov VI Extraction with thinning of the wall of cylindrical parts from two-layer anisotropic materials // Blank production in mechanical engineering. 2008. – №1. 30–35.
- 5.. Evsyukov S.A. Flanging the necks on workpieces that have anisotropic hardening // Forging–stamping production. 1994. № 11C. 17–19.
6. Yakovlev SS, Tregubov VI, Nechepurenko Yu.G. Deep drawing of an anisotropic hardening material // Procurement industries. 2005. № 4. P. 38 – 44.
7. Mousavia A., Kunzeb T., Rochb T., Lasagnib A., Brosius A. Deep drawing process without lubrication – an adapted tool for a stable, economic and environmentally friendly process // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, Pages 48–53.
8. Jennifer Tennera, Kolja Andreas, Adrian Radiusa, Marion Merklein Numerical and experimental investigation of a dry drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, Pages 2245–2250
9. Senyong Chena, Yi Qina, Chenb J.G., Chee–MunChoy A forging method for reducing process in the formation of automotive fasteners. International Journal of Mechanical Sciences. 29 December 2017.
10. Junsong Jin, Xinyun Wang Lei, Deng Jiancheng Luo A single–step hot stamping–forging process for the aluminum alloy shell with nonuniform thickness // Journal of Materials Processing Technology. Volume 228, February 2016, Pages 170–178.
11. Dongbin Wei, Liang Luo, Hideki Satoc ZhengyiJiang, Kenichi Manabec Simulations of hydro–mechanical deep drawing using Voronoi model and real microstructure model // Procedia Engineering. Volume 207, 2017, P. 1033–1038.
12. WeiqinTang, ShiyaoHuang, DayongLi, YinghongPeng Mechanical anisotropy and deep drawing behaviors of AZ31 magnesium alloy produced by unidirectional and cross rolling // Journal of Materials Processing Technology. Volume 215, January 2015, Pages 320–326
13. Abea Y., Ohmia T., Moria K., Masudab T. Improvement of the formability in the deep drawing of ultra–high strength steel sheets by coating of die. // Journal of Materials Processing Technology. Volume 214, Issue 9, September 2014, Pages 1838–1843

### Gryazev, Mikhail Vasilievich

Doctor of Technical Sciences, Prof., Rector of the State Tula State University, address: 300028, GSP, 92 Lenina Ave., TulGU,  
8 (4872) 35 14 82.

### Larin Sergey Nikolaevich

FGBOU VO "Tula State University",  
Ph.D., Assoc., Professor of the Department of Mechanics of Plastic Forming,  
address: 300012, GSP, Lenin Avenue, 92, Tula State University,  
8 (4872) 73 44 91.

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

**Аннотация.** Рассматривается модель управляемого теплообменного аппарата конвективного типа в классе систем с распределенными параметрами. Преобразование Лапласа уравнений конвективного теплообмена позволяет построить модель теплообменного аппарата как объекта управления в области изображений. На этой основе предлагаются методы анализа динамических характеристик (весовой и единичной переходной функций) аппарата на строгой основе, полностью учитывающей аналитический характер изображений динамических характеристик.

**Ключевые слова:** теплообмен, динамические характеристики, передаточная функция, объект управления, преобразование.

### Введение

Методы исследования систем автоматического управления (САУ) теплообменными аппаратами (ТОА), сложных по своей природе (они относятся к классу систем с распределенными параметрами в силу свойств самого процесса теплообмена) известные в литературе (см., например, [1]), серьезно упрощают математические модели САУ ТОА и в недостаточной степени охватывают проблему анализа точности систем. Это обстоятельство делает актуальным разработку проблемы анализа точности с достаточно полным отражением характерных особенностей модели САУ ТОА как системы с распределенными параметрами. В настоящей работе продолжена разработка подхода к анализу САУ ТОА, представленного в [2,3], акцентируя внимание на задаче анализа точности системы.

### Постановка задачи

В [2] для температуры подогреваемого в ТОА теплоносителя, рассматриваемой в виде  $T(x,t)$  – функции безразмерной координаты  $x$  и времени  $t$  соответственно, получены изображения  $T(x,p)$  по Лапласу как в произвольном ( $0 \leq x \leq 1$ ), так и в выходном сечении ( $x=1$ ) ТОА ( $x$  – относительная координата). Определяя ошибку управления как

$$\varepsilon(t) = T_3(t) - T(1,t),$$

где  $T_3(t)$  – заданная температура на выходе ТОА, представим САУ структурной схемой, изображенной на рисунке 1.

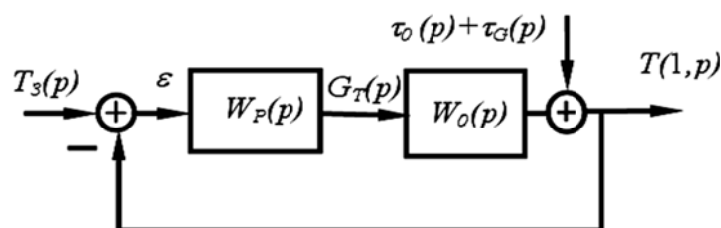


Рисунок 1 – Структурная схема САУ теплообменом

В соответствии с полученными в [2,3] результатами передаточная функция объекта управления имеет вид

$$W_O(p) = \frac{a_2 b_3 (1 - e^{-A(p)})}{q_0},$$

где  $q_0(p) = \nu b p^2 + (+b_2 \nu + b_1)p + b_2 - b_3$  – характеристический многочлен объекта управления  $A(p) = b_1 p + b_2 - \frac{b_3}{\nu p + 1}$ , а  $\tau_0(p) = e^{-A(p)} T_0(p)$ ,  $\tau_G(p) = \frac{-b_4}{A(p)} [1 - e^{-A(p)}] G(p)$  – приведенные возмущения.

Передаточную функцию регулятора будем рассматривать в виде  $W_p(p) = b(p)/a(p)$ , где заданные многочлены  $a(p)$ ,  $b(p)$  удовлетворяют условию  $\lim_{p \rightarrow \infty} \frac{b(p)}{pa(p)} \neq \infty$ . Определим теперь передаточную функцию прямой цепи контура как

$$W(p) = W_p(p)W_o(p) = \frac{c(p)}{q(p)} [1 - e^{-A(p)}], \quad (1)$$

где

$$c(p) = a_2 b_3 b(p), \quad q(p) = [v b_1 p^2 + (b_2 v + b_1) p + b_2 - b_3] a(p). \quad (2)$$

Рассмотрим далее вход – выходные соотношения замкнутой системы

$$T_3(1, p) = \Phi(p)T_3(p), \quad T_G(1, p) = \Phi_G(p)G(p), \quad T_0(1, p) = \Phi_0(p)T_0(p) \quad (3)$$

– ее реакции на задающее и возмущающие воздействия. Для передаточных функций замкнутой системы находим:

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{c(p)}{Q(p)} [1 - e^{-A(p)}], \quad (4)$$

$$\Phi_G(p) = -\frac{b_4 [1 - e^{-A(p)}]}{[1 + W(p)]A(p)} = -\frac{b_4 (vp + 1)a(p)}{Q(p)} [1 - e^{-A(p)}], \quad (5)$$

$$\Phi_0(p) = \frac{e^{-A(p)}}{1 + W(p)} = \frac{q(p)}{Q(p)} e^{-A(p)}. \quad (6)$$

В этих соотношениях  $Q(p) = q(p) + c(p)[1 - e^{-A(p)}]$  аналитическая функция, нули которой определяют полюсы передаточных функций (3)–(5). Для изображения ошибки  $\varepsilon(t)$  с помощью вход–выходных соотношений (3) находим

$$\varepsilon(t) = \Phi_\varepsilon(p)T_3(p) - \Phi_G(p)G(p) - \Phi_0(p)T_0(p), \quad (7)$$

где

$$\Phi_\varepsilon(p) = 1 - \Phi(p) = \frac{1}{1 + W(p)} = \frac{q(p)}{Q(p)}. \quad (8)$$

Равенство (7) представляет собой вход–выходное соотношение для ошибки регулирования в виде суммы трех составляющих ошибки: задающего воздействия  $T_3(p)$ , возмущения от расхода  $G(p)$  и возмущения от температуры топлива  $T_0(1, p)$  на входе ТОА. Рассмотрим задачу анализа ошибки регулирования на примере ее первой составляющей – ошибки от задающего воздействия  $T_3(t)$ . Интересно и важно выяснить, возможны ли традиционные методы анализа ошибки в рассматриваемой системе с распределенными параметрами.

**Анализ точности САУ при детерминированных возмущениях. Метод системных коэффициентов**

Одним из них является метод разложения установившейся ошибки в ряд по производным воздействия, или метод системных коэффициентов – коэффициентов ошибки. Покажем, что в нашем случае также возможно представление

$$\varepsilon(t) = c_0 T_3(t) + c_1 \dot{T}_3(t) + c_2 \ddot{T}_3(t) + \dots, \quad (9)$$

$$\text{где } c_0 = \Phi_\varepsilon(0), \quad c_1 = \left. \frac{d\Phi_\varepsilon(0)}{dp} \right|_{p=0}, \quad c_2 = \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 \Phi_\varepsilon(0)}{d^2 p} \right|_{p=0}, \dots$$

Представление (9) называется разложением ошибки в ряд по производным воздействия (в данном случае – задающего). Оно имеет, как известно, асимптотический характер при  $t \rightarrow \infty$ . Итак, будем считать рассматриваемую систему регулирования конвективного теплообмена устойчивой. Пусть

$$g(t) = L^{-1}\{\Phi(p)\} \quad (10)$$

– оригинал передаточной функции (5) замкнутой системы. Введем в рассмотрение интеграл свертки

$$T(1,t) = \int_0^t g(\tau) T_3(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

– оригинал изображения выхода замкнутой системы. Функция  $g(t)$  имеет смысл весовой функции замкнутой системы для ее реакции  $T(1,t)$  на задающее воздействие  $T_3(t)$ . Примем, что  $T_3(t)$  является полиномиальным воздействием. Тогда при всяком фиксированном  $t$  справедливо разложение

$$T_3(t-\tau) = \sum_{k=0}^r \frac{1}{k!} T_3^{(k)}(t) (-\tau)^k, \quad (12)$$

где  $T_3^{(k)}(t) = \frac{d^k T_3(t)}{dt^k}$  и  $r$ –степень полинома, описывающего воздействия  $T_3(t)$ . Подставляя (12) в (10), получаем

$$T(1,t) = \sum_{k=0}^m m_k(t) T_3^{(k)}(t), \quad (13)$$

где

$$m_k(t) = \frac{1}{k!} \int_0^t (-\tau)^k g(\tau) d\tau \quad (14)$$

– моменты весовой функции (10). Теперь заметим, что по доказанному выше, устойчивая система устойчива экспоненциально. Это положение справедливо и для весовой функции как оригинала изображения (4). Другими словами

$$|g(t)| < \gamma e^{-\alpha t}, \quad 0 < \alpha \leq -\operatorname{Re} \lambda_m < \ell, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (15)$$

где  $\gamma$  – подходящая константа.

Поэтому справедливо утверждение.

**Утверждение.** Если рассматриваемая система устойчива, то существуют пределы при  $t \rightarrow \infty$  для моментов (14)

$$C_k = \lim_{t \rightarrow \infty} m_k(t) = \frac{1}{k!} \int_0^\infty g(\tau) (-\tau)^k d\tau. \quad (16)$$

Действительно, из равенства (14) в силу неравенства (15) следует

$$|m_k(t)| \leq \gamma \mu_k(t), \quad (17)$$

где  $\mu_k(t) = \frac{1}{k!} \int_0^t \tau^k e^{-\alpha \tau} d\tau$ . Интегрируя по частям, находим

$$\mu_k(t) = -\frac{1}{\alpha k!} (-t)^k e^{-\alpha t} + \frac{1}{\alpha} \mu_{k-1}(t), \quad k \geq 1. \quad (18)$$

При  $k=0$  имеем  $\mu_0(t) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t})$ ,  $\mu_0(\infty) = \frac{1}{\alpha}$ .

Из (18) следует, что если существует предел  $\mu_{k-1}(\infty)$ , то существует и предел  $\mu_k(\infty) = \frac{1}{\alpha} \mu_{k-1}(\infty)$ . Но при  $k=0$  предел существует. Следовательно, он существует и при  $k=1, 2, \dots$ , а значит, в силу неравенства (17) существует и предельное значение (16).

**Утверждение доказано.**

Теперь заметим, что равенство (16) можно записать в виде

$$C_k = \int_0^\infty e^{-pt} g(t) (-t)^k dt \Big|_{p=0} = \frac{d^k}{dp^k} \int_0^\infty e^{-pt} g(t) dt \Big|_{p=0}.$$

Под знаком производной стоит передаточная функция  $\Phi(p)$  замкнутой системы (см. соотношение (10)). Таким образом, окончательно получаем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m_k(t) = C_k = \frac{1}{k!} \frac{d^k \hat{O}(p)}{dp^k} \bigg|_{p=0}. \quad (19)$$

Из этого следует, что в устойчивой системе при больших  $t$  (формально при  $t \rightarrow \infty$  в коэффициентах представления (13)) справедливо асимптотическое представление выхода замкнутой системы

$$T(1, t) = \sum_{k=0}^r C_k T_3^{(k)}(t), \quad (20)$$

где коэффициенты разложения можно вычислить по соотношениям (19).

Заметим, что если изображение полиномиального задающего воздействия  $T_3(t)$  степени  $r$  записать в виде  $T_3(p) = \frac{1}{p^{r+1}} \tau_3(p)$ , где  $\tau_3(p)$  – многочлен степени  $r$ , коэффициенты которого определяются по коэффициентам многочлена  $T_3(t)$ , то в устойчивой системе согласно полученным выше результатам будем иметь представление выхода системы следующим выражением:

$$T(1, t) = \frac{1}{r!} \frac{d^r}{dp^r} \tau_3(p) \hat{O}(p) \bigg|_{p=0} + \gamma e^{-\alpha t}, \quad \alpha = \min(\lambda, l) > 0. \quad (21)$$

Первое слагаемое в этом представлении является тем же многочленом, что и многочлен (20). Поэтому, сравнивая эти представления, видим, что равенство (20) имеет место с точностью до экспоненциально исчезающего слагаемого.

Соотношения (20), (21) принципиально в равной степени эффективны при анализе установившегося выхода замкнутой системы, обусловленного задающим воздействием полиномиального типа. Вместе с тем, соотношение (20) полезно для обобщений анализа установившегося выхода на случай и неполиномиальных задающих воздействий с ограниченными высшими производными. Кроме того, как в обычных системах, оно наглядно показывает влияние уровня воздействия, скорости его изменения, ускорения и т.д., что при расчетах и проектировании системы имеет свое значение. Полученное разложение (20) позволяет записать и соответствующее разложение для ошибки системы, обусловленной задающим воздействием. При  $t \rightarrow \infty$  в устойчивой системе имеем

$$\varepsilon(t) = T_3(t) - T(1, t) = T_3(t) - \sum_{k=0}^r C_k T_3^{(k)}(t),$$

или

$$\varepsilon(t) = (1 - C_0) T_3(t) - \sum_{k=1}^r C_k T_3^{(k)}(t). \quad (22)$$

Соотношение (22) перепишем в виде

$$\varepsilon(t) = c_0 T_3(t) + \sum_{k=1}^r c_k T_3^{(k)}(t). \quad (23)$$

Теперь легко находим в силу (22) и (7)

$$c_0 = 1 - \Phi(0) = \Phi_{\varepsilon}(0), \quad c_k = -C_k = -\frac{1}{k!} \frac{d^k \Phi(p)}{dp^k} \bigg|_{p=0} = \frac{1}{k!} \frac{d^k \Phi_{\varepsilon}(p)}{dp^k} \bigg|_{p=0}.$$

Отметим наглядность (23) в анализе таких структурных свойств системы, как статизм и астатизм. Например, для первого коэффициента ошибки имеем в соответствии с (1), (8)

$$c_0 = \Phi_{\varepsilon}(0) = \frac{1}{1 + W(0)} = \begin{cases} \frac{1}{1 + k}, & a(0) \neq 0 \\ 0, & a(0) = 0, \end{cases}$$

где  $W(0) = k = \frac{a_2 b_3 b(0)}{(b_2 - b_3) a(0)} \cdot [1 - e^{(b_2 - b_3)}]$  имеет место для систем статического типа, и  $W(0) = \infty$  – для систем астатического типа.

Как и для обычных систем, в последнем случае установившаяся ошибка равна нулю при постоянном задающем воздействии. Нетрудно установить более общее утверждение.

Пусть  $W_p(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \frac{b(p)}{p^\ell a_0(p)}$ , где  $\ell \geq 1$  и  $b(0) \neq 0$ ,  $a_0(0) \neq 0$ . Тогда в соответствии с

$$(1) \quad W(p) = \frac{1}{p^\ell} \widehat{W}(p), \text{ где } \widehat{W}(p) = \frac{c(p)[1 - e^{-A(p)}]}{[v b_1 p^2 + (b_2 v + b_1)p + b_2 - b_3] a_0(p)}, \text{ следовательно,}$$

$$\Phi_\varepsilon(p) = \frac{p^\ell}{p^\ell + \widehat{W}(p)}. \quad (24)$$

В этом случае  $\ell$  коэффициентов ошибки равны нулю (аналогично обычным системам). Действительно, записав выражение (24) в виде

$$\Phi_\varepsilon(p) = p^\ell \varphi(p),$$

где  $\varphi(p) = \frac{1}{p^\ell + \widehat{W}(p)}$  – аналитическая в точке  $p=0$  функция (т.е. имеющая все производные  $\varphi^{(k)}(p)$  при  $p=0$ ) и дифференцируя  $\Phi_\varepsilon(p)$ , получаем

$$\dot{\Phi}_\varepsilon^{(1)}(p) = \ell p^{\ell-1} \varphi(p) + p^\ell \varphi^{(1)}(p).$$

Дифференцируя еще раз, найдем

$$\dot{\Phi}_\varepsilon^{(2)}(p) = \ell(\ell-1)p^{\ell-2}\varphi(p) + 2\ell p^{\ell-1}\varphi^{(1)}(p) + p^\ell \varphi^{(2)}(p), \text{ и т.д.}$$

Таким образом,

$$\dot{\Phi}_\varepsilon^{(\ell-1)}(p) = \ell(\ell-1)(\ell-2)\dots 1 \cdot p \varphi(p) + p^2 \Psi(p).$$

При  $\ell=1$  имеем

$$c_0 = 0, \text{ и } c_1 = \varphi(0) = \frac{1}{\widehat{W}(0)} = \frac{c(0)[1 - e^{-A(0)}]}{(b_1 - b_3)a_0(0)} \neq 0,$$

так как  $c(0) = a_2 b_3 b(0)$  в силу (2). При  $\ell > 1$  получаем:

$$\Phi_\varepsilon(0) = 0; \quad \Phi_\varepsilon^{(1)}(0) = 0; \quad \Phi_\varepsilon^{(\ell-1)}(0) = 0, \text{ но, } \Phi_\varepsilon^{(\ell)}(0) \neq 0.$$

Следовательно,  $c_0 = 0, c_1 = 0, \dots, c_{\ell-1} = 0$ . Это означает, что при полиномиальном воздействии  $T_3(t)$  со степенью полинома равной  $\ell-1$ , установившаяся ошибка равна нулю. Это положение обычно имеет практическое значение при  $\ell=1$ , поскольку в случае  $\ell \geq 2$  практически сложно обеспечить устойчивость системы.

### Заключение

Выполненный анализ свидетельствует: если регулятор САУ ТОА астатического типа со степенью астатизма  $\ell=1$ , ошибка в установившемся режиме для устойчивой системы равна нулю. Заметим также, что выполненное исследование может быть с точностью до обозначения повторено и для случаев двух других возмущающих воздействий в соотношениях (3).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов А.Т. Об одной одномерной задаче теплообмена/А.Т. Барабанов, С.А. Конева //Динамические системы. – Симферополь. – 2001. Вып.17. – С.190 – 195.
2. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел/ Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука. 1964. – 488 с.
3. Конева С.А. Анализ динамических характеристик теплообменного аппарата как одного класса объекта управления / С. А. Конева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева». – 2016. – С. 17–24.

4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена /С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
6. Нелепин Р.А. Автоматическое управление судовыми энергетическими установками /Р.А. Нелепин.– Л.: Судостроение, 1986. – 296 с.
7. Себиси Т. Конвективный теплообмен /Т. Себиси, П. Брэдшоу.– М.: Мир, 1987. – 589 с.
8. Сыромятников В.Ф. Настройка автоматики судовых энергетических установок / В.Ф. Сыромятников. – Л.: Судостроение, 1980. – 352 с.
9. Шевяков А.А. Управление тепловых объектов с распределенными параметрами / А.А. Шевяков, Р.В. Яковлева. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
10. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер. – М.: 1980. – 478 с.

**Конева Светлана Андреевна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». г. Севастополь,

Кандидат технических наук, доцент

кафедры «Судовое электрооборудование»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: info@sevsu.ru

---

S.A. KONEVA

**THE ANALYSIS OF ACCURACY OF THE CONTROL SYSTEMS  
WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS  
AT THE DETERMINED INDIGNATIONS**

**Abstract.** Examines the object model with the exchange of heat by convection in the class of systems with distributed parameters. The Laplace transformation of equations of convective heat transfer allows to build a model of the control object in the field images. On this basis the proposed methods of analysis of dynamic characteristics of the device, where full account of the analytical nature of the images the dynamic characteristics.

**Keywords:** heat exchange, dynamic characteristics, transitive function, object of management, transformation of Laplace.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Barabanov, A.T. Ob odnoi odnomernoy zadache teploobmena /A.T. Barabanov, S.A. Koneva// Dinamicheskiye sistemy. – 2001. – №17. – S. 190–195.
2. Karslou, G. Teploprovodnost tverdyh tel /G. Karslou, D. Eger. – М.: Nauka. – 1964. – 488 s.
3. Koneva, S.A. Analiz dinamicheskikh harakteristik teploobmennogo apparata kak odnogo klassa objekta upravleniya /S. A. Koneva // Fundamentalnye i prikladnye problem tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU im. I.S. Turgeneva». – 2016. – S. 17–24.
4. Kutateladze, S.S. Osnovy teoryi teploobmena / S.S. Kutateladze. – М.: Atomizdat. – 1997. – 415 s.
5. Lykov, A.V. Teoriya teploprovodnosti / A.V. Lykov. – М.: Vyshaya shkola. 1967. – 599 s.
6. Nelepin, R.A. Avtomaticheskoe upravlenie sudovymi energeticheskimi ustanovkami / R.A. Nelepin. – Л.: Sudostroenie, 1986. – 296 s.
7. Sebisi, T. Konvektivnyi teploobmen / T. Sebisi, P. Bredshou. – М.: Mir. – 1987. – 589 s.
8. Syromyatnikov, V.F. Naladka avtomatiki sudovykh energeticheskikh ustanovok/ V.F. Syromyatnikov. – Л.: Sudostroenie, 1980. – 352 s.
9. Shevyakov, A.A. Upravlenie teplovykh obektov s raspredelennymi parametrami / A.A. Shevyakov? R.V. Jakovleva. – М.:– Energoatomizdat, 1986. – 208 s.
10. Shnejder, P. Injenernye problemy teploprovodnosti / P. Shnejder. – М.: Nauka. – 1964, – 478 s.

**Koneva Svetlana Andreevna**

Sevastopol State University

Ph.D., assistant professor of marine electrical equipment,

299053 Sevastopol, Universitetskaya, 33

Ph.: (+7978)85–35–702

## **ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.852.

А.И. БОХОНСКИЙ, А.И. РЫЖКОВ

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО ПРЯМОЙ В ПРОСТРАНСТВЕ**

**Аннотация.** *С использованием телескопической руки манипулятора (в сферической системе координат) реализовано оптимальное транспортирование объекта по траектории в виде отрезка прямой в пространстве. Для реверсионно сконструированного оптимального управления при его непосредственном приложении к объекту с привлечением алгоритма решения обратной задачи динамики найдены усилия в приводах.*

**Ключевые слова:** *телескопическая рука манипулятора, оптимальное управление, обратная задача динамики, усилия в приводах.*

#### **Введение**

В интенсивно развивающихся современных технологиях, в которых используются манипуляторы, реализующие 3D печать, известны актуальные задачи оптимального управления исполнительными органами для воспроизведения рабочих траекторий при создании широкого ассортимента изделий.

Методам оптимального управления системами посвящены работы [1–4] и другие.

Реверсионное конструирование управляемого движения [5–9] может приводить в отдельных случаях к некоторому снижению энергетических затрат на транспортирование объектов. В результате конструирования появляются функционалы–критерии, отличающиеся от обычно применяемых в ряде типовых задач синтеза оптимальных управлений.

#### **Основная часть**

На рисунке 1 изображена траектория движения объекта в виде отрезка АВ прямой в декартовой системе координат. Телескопический манипулятор должен реализовать оптимальное движение при изменении координат руки в сферической системе координат соответственно движению схвата с объектом по заданному отрезку прямой.

**Цель исследований**– на основании алгоритма обратной задачи динамики определить усилия в приводах телескопического манипулятора, работающего в сферической системе координат, для воспроизведения оптимального движения объекта по траектории в виде отрезка прямой в пространстве.

Траектория, по которой оптимально перемещается объект, – прямая линия в пространстве. Уравнение прямой, проходящей через две точки [10], в канонической форме:

$$\frac{x - x_1}{m} = \frac{y - y_1}{n} = \frac{z - z_1}{p}, \quad (1)$$

где  $x_2 - x_1 = m$ ,  $y_2 - y_1 = n$ ,  $z_2 - z_1 = p$ .

Направляющие косинусы для отрезка прямой (АВ) определяются так:

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}, \\ \cos \beta &= \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}, \\ \cos \gamma &= \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}.\end{aligned}\quad (2)$$

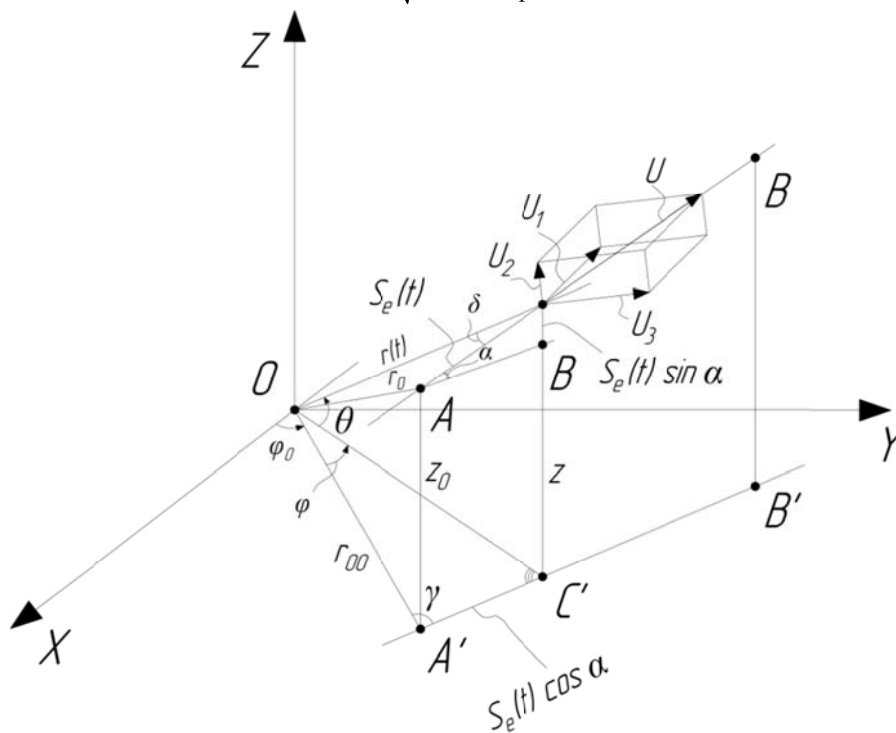


Рисунок 1 – Перемещение объекта по прямой AB в пространстве с использованием руки манипулятора в сферической системе координат

В произвольный момент времени косинус угла между прямой  $r(t)$  (телескопическая рука) и траекторией AB, по которой движется объект, находится по формуле:

$$\cos \delta = \frac{mm_1 + nn_1 + pp_1}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2} \cdot \sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}, \quad (3)$$

где  $m_1, n_1, p_1$  – параметры прямой  $r(t)$ .

При определении координат  $\varphi, \theta, r$  сферической системы в зависимости от пройденного пути по отрезку прямой общего положения, как функций времени, не исключается достаточно простой путь.

Для движения по отрезку прямой используется управление (ускорение), сконструированное на основании реверсионного принципа оптимальности (РПО) [2–4] в соответствии с целью движения, свойствами кососимметричного управления и ограничениями:

$$\begin{aligned}S_e(t) &= \frac{Lt^2}{T^5} (5T^3 - 10tT^2 + 10t^2T - 4t^3), \\ V_e(t) &= \frac{10Lt}{T^3} (T - t) (2t^2 - 2tT + T^2), \\ U_e(t) &= \frac{10L}{T^5} (T - 2t)^3.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $L$  – общее перемещение по прямой;  $T$  – общее время движения. Управление  $U_e(t)$  является решением дифференциального уравнения Эйлера–Пуассона

$$\frac{d^4 U_e}{dt^4} = 0, \quad (4)$$

как необходимого условия экстремума восстановленного реверсионно функционал-критерия  $I = \int_0^T \ddot{U}_e dt$ .

В качестве исходных данных приняты параметры:  $z_0$ ,  $r_{oo}$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ , и  $A'C' = S_e(t) \cdot \cos \alpha$ . Из  $\triangle OA'C'$  согласно теореме синусов (рисунок 1) следует зависимость:

$$\frac{\sin \varphi}{S_e \cos \alpha} = \frac{\sin [\pi - (\varphi + \gamma)]}{r_{oo}}. \quad (5)$$

После преобразований, получено выражение для угла поворота:

$$\varphi(t) = \arctg \left( \frac{r_{oo}}{S_e \cos \alpha \cdot \sin \gamma} - \tg \gamma \right). \quad (6)$$

Координата точки  $B$  в произвольный момент времени равна:

$$z(t) = z_0 + S_e \sin \alpha. \quad (7)$$

Из  $\triangle OA'C'$  согласно теореме косинусов следует зависимость:

$$OC' = \sqrt{r_{oo}^2 + (S_e \cos \alpha)^2 - 2r_{oo} \cdot S_e \cos \alpha \cdot \cos \gamma}. \quad (8)$$

Поэтому угол поворота равен

$$\theta(t) = \arctg \left( \frac{z}{OC'} \right), \quad (9)$$

а длина руки в произвольный момент времени

$$r(t) = \sqrt{z^2 + (OC')^2}. \quad (10)$$

Графики кинематических параметров движения руки изображены на рисунке 2; они построены для исходных данных:  $L=0,3\text{ м}$ ;  $T=2\text{ с}$ ;  $r_{oo}=0,5\text{ м}$ ;  $\gamma=\pi/3$ ;  $\alpha=\pi/6$ . Начальная длина руки телескопического манипулятора равна  $r_0 = \sqrt{r_{oo}^2 + z_0^2} = 0,71\text{ м}$ .

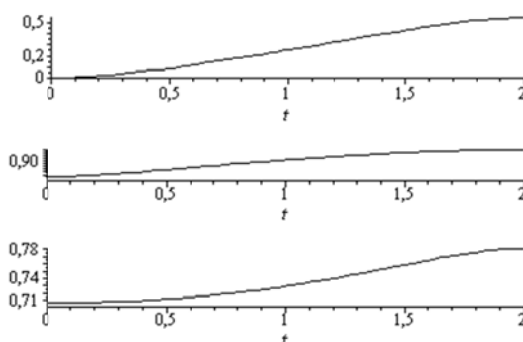


Рисунок 2– Графики сферических координат

Интересно, что при  $t = T$  скорости  $\dot{\varphi}(T) = 0$ ,  $\dot{\theta}(T) = 0$  и  $\dot{r}(T) = 0$ , т.е., как и следовало ожидать, при  $S_e(T) = L$  в конечном состоянии наступает покой схвата с грузом.

Усилия в приводах найдены в результате решения обратной задачи динамики [5] –при известных геометрических свойствах оптимального движения и физических параметрах руки усилия в приводах, как обобщенные силы, являются правыми частями уравнений Лагранжа второго рода:

$$\begin{aligned}
Q_\phi &= M_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\partial T}{\partial \phi}, \\
Q_\theta &= M_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial T}{\partial \theta}, \\
F &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial T}{\partial r},
\end{aligned}
\tag{11}$$

где  $T$  – кинетическая энергия руки вместе с перемещаемым объектом в произвольный момент времени.

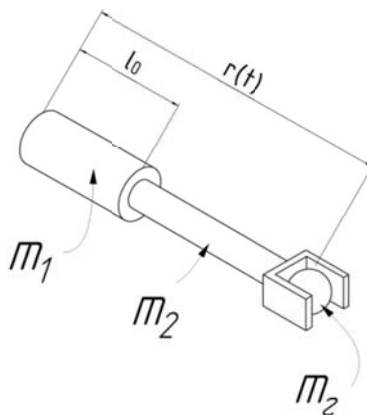


Рисунок 3 – Рука телескопического манипулятора

Выражение для кинетической энергии руки (рисунок 3) вместе с перемещаемым объектом в обобщенных сферических координатах и скоростях имеет вид:

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{6} m_1 l_0^2 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_2 (r(t) \cdot \dot{\phi})^2 + \frac{1}{8} m_2 (l_0 + r(t))^2 \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{1}{6} m_1 l_0^2 \dot{\theta}^2 + \\
&+ \frac{1}{2} m_2 (r(t) \cdot \dot{\theta})^2 + \frac{1}{8} m_2 (l_0 + r(t))^2 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} (m_2 + m_e) \cdot (\dot{r}(t))^2,
\end{aligned}
\tag{12}$$

где  $m_1, m_2$  – массы элементов телескопической руки, приведенные к сосредоточенным;  $m_e$  – масса перемещаемого объекта;  $l_0$  – длина неизменяющейся части руки.

Согласно (12) и (13), после преобразований, получены выражения для усилий в приводах, реализующие оптимальное движение объекта по заданной траектории:

$$\begin{aligned}
M_1(t) &= \frac{1}{3} m_1 l_0^2 \ddot{\phi} + 2m_e r(t) \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\phi} + m_e (r(t))^2 \cdot \ddot{\phi} + \\
&+ m_2 (l_0 + r) \dot{r} \dot{\phi} + m_2 \frac{(r + l_0)^2}{4} \cdot \ddot{\phi}, \\
M_2(t) &= \frac{1}{3} m_1 l_0^2 \ddot{\theta} + 2m_e r(t) \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\theta} + m_e (r(t))^2 \cdot \ddot{\theta} + \\
&+ m_2 (l_0 + r) \dot{r} \dot{\theta} + m_2 \frac{(r + l_0)^2}{4} \cdot \ddot{\theta}, \\
F &= (m_2 + m_e) \cdot \ddot{r}(t)
\end{aligned}
\tag{13}$$

При построении графиков, изображенных на рисунке 4, использовались следующие дополнительные исходные данные:  $m_1=5$  кг;  $m_2=8$  кг;  $m_e=8$  кг;  $l_0=0,6$  м.

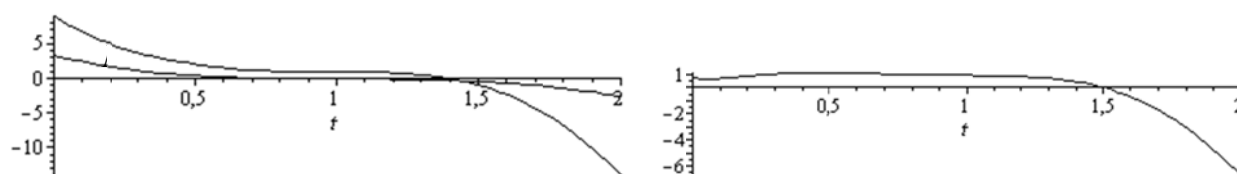


Рисунок 4 –Графики усилий  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$ ,  $F(t)$  в приводах

Усилия в приводах подтверждают проектируемый характер оптимального движения объекта – разгон из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя. Интересно, что характеры угловых ускорений и компонентов воздействия близки.

При этом,  $U_e(t) = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ , где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  – ускорения (управления), прикладываемые непосредственно к центру масс схвата с грузом.

### Заключение

Алгоритм обратной задачи динамики для поиска управлений в виде усилий в приводах справедлив для любого типа манипуляторов и произвольных рабочих траекторий оптимального перемещения объектов.

На этапе выбора типов приводов возможно уточнение усилий в приводах при учете сопротивлений движению (линейно–вязкого, сухого трения).

Для повышения точности позиционирования без снижения производительности в дальнейшем предполагается учет конечной жесткости элементов руки манипулятора с уточнением в этой связи общего времени оптимального движения для достижения абсолютного покоя (отсутствия упругих колебаний) в конечном состоянии. При транспортировании за минимально возможное время нежестких объектов манипуляторами конечной жесткости возникают сложные колебания манипуляторов и транспортируемых объектов. Поэтому актуальны исследования оптимальных управлений перемещением объектов манипуляторами с устранением их колебаний в конце движения (без потери точности позиционирования и производительности).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М., Высш. школа, 1977. – 288с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М. Наука, 1968. – 476 с.
3. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем регулирования. В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
4. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304с.
5. Бохонский, А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. – М. Вузовский учебник. ИНФРА. – М., 2016. – 174с.
6. Бохонский, А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов. Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно–практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №2. – 143с.
7. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.
8. Aleksandr I. Bokhonsky, Mikhail M. Maistrishin and Aleksandr I. Ryzhkov. Experimental test of the optimal rotation for the finite stiffness cantilever rod.–MATEC Web of Conferences. Published online: 07 November, 2017. <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/contents/contents.html>
9. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. Монография. Palmarium Academic Publishing. 2013. – 77с.
10. Цубербиллер, О.Н. Задачи и упражнения по аналитической геометрии. Изд–во «Наука». М., 1964. – 336с.

**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

## USING A TELESCOPIC MANIPULATOR FOR OPTIMUM MOVEMENT OF AN OBJECT ALONG THE STRAIGHT LINE

**Abstract.** *Using the telescopic arm of the manipulator (spherical coordinate system), the optimal transportation of the object along the trajectory in the form of a straight line in space is realized. For reverse-engineered optimal control with its direct application to the object with the use of the algorithm for solving the inverse problem of dynamics, forces are found in the drives.*

**Keywords:** *telescopic manipulator arm, optimal control, inverse dynamic problem, drive forces.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Voronov A.A. Theory of automatic control. Part II. The theory of nonlinear and special systems of automatic control. – М., Высш. school, 1977. – 288s.
2. Krasovskiy N.N. Motion Control Theory. – М. Nauka, 1968. – 476 p.
3. Solodovnikov V.V. Fundamentals of the theory and elements of regulatory systems. V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – М.: Mechanical Engineering, 1985. – 536 p.
4. Krutko, P.D. Inverse problems of the dynamics of controllable systems: linear models. – Moscow: Nauka, 1987. – 304p.
5. Bokhonsky, A.I. Reversion principle of optimality. Monograph. – M. Vuzovskiyuchebnik. INFRA. – М., 2016. – 174s.
6. Bokhonsky, A.I. Energy intensity control of moving objects. Fundamental foundations of mechanics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk: SIC MS, 2017. – №2. – 143s.
7. Bokhonsky A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion / Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.
8. Aleksandr I. Bokhonsky, Mikhail M. Maistrishin and Aleksandr I. Ryzhkov. Experimental test of the optimal rotation for the finite stiffness cantilever rod. MATEC Web of Conferences. Published online: 07 November, 2017. <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/contents/contents.html>
9. AI Bokhonsky. Topical problems of the calculus of variations. Monograph. Palmarium Academic Publishing. 2013. – 77s.
10. Zuberbiller, O.N. Problems and exercises on analytic geometry. Publishing house «Nauka». М., 1964. – 336p.

**Bokhonsky Alexander Ivanovich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", the city of Sevastopol  
Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Technical Mechanics and Engineering Science"  
299053, city of Sevastopol, st. University 33  
Tel. 8 (978) 7393968  
E-mail: bohon.alex@mail.ru

**Ryzhkov Alexander Igorevich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", the city of Sevastopol  
Assistant of the department "Technical mechanics and machine science"  
299053, city of Sevastopol, st. University 33  
Tel. 8 (978) 847-37-49  
E-mail: ryzhkov2206@gmail.com

К.Н. ОСИПОВ, В.В. ГОЛИКОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Аннотация.** *Предлагается подход к моделированию многомерных стационарных стохастических взаимосвязей между отдельными скалярными нестационарными процессами изменения диагностических параметров конструктивно сложных машиностроительных изделий в виде линейных комбинаций по результатам автоматизированных производственных (приемосдаточных или контрольных) испытаний. Предлагаемый подход дает возможность строить корректные (адекватные измерительным данным) модели изделий даже в случае их нестационарности, не преобразуя в стационарные, что позволяет использовать результаты моделирования в задачах автоматизированной оценки технического состояния в режиме реального времени. На примере двигателя внутреннего сгорания показано, что использование предлагаемых моделей в современном производстве для описания динамики изменения технического состояния испытуемых изделий позволит обеспечить требуемую достоверность результатов испытаний, используя имеющиеся производственные мощности и квалификационный потенциал операторов испытаний.*

**Ключевые слова:** диагностика, испытания, моделирование, автоматизированное производство.

### Постановка задачи в общем виде.

Реализация государственных программ в области создания импортозамещающих технологий, а также выход отечественной машиностроительной продукции на мировые рынки означает повышение ее конкурентоспособности (надежности, ремонтпригодности и т.д.), что возможно только на основе использования передовых интеллектуальных производственных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделий, в том числе на стадии краткосрочных производственных приемосдаточных и контрольных испытаний, в ходе которых по результатам контроля показателей качества продукции принимаются решения о соответствии характеристик готовых к эксплуатации изделий требованиям ГОСТ Р или ТУ. Это, прежде всего, касается сложных мехатронных изделий, машин и механизмов с большим количеством комплектующих элементов и выполняемых функций.

Отдельные отечественные предприятия для проведения краткосрочных производственных стендовых испытаний давно используют автоматизированные стенды со встроенным прикладным программным обеспечением (ПО) с функциями контроля значений отдельных показателей, а также системами менеджмента качества согласно ISO 9000. Однако большая их часть произведена за рубежом, поэтому предприятиям приходится тратить дополнительные средства на техническое перевооружение, а в дальнейшем и на специфическое обслуживание зарубежных стендов и ППО, обучение части персонала зарубежным технологиям и иностранным языкам. Более того, это расходится с курсом правительства на внедрение импортозамещающих технологий в отечественной промышленности и не способствует обеспечению технологической независимости страны. К сожалению, имеющиеся в небольшом количестве отечественные аналоги зарубежных стендов, которые снабжены собственным программным обеспечением, как правило, уникальным и не допускающим гибкость настроек и использования для разных объектов. Поэтому решение задач дальнейшего совершенствования отечественных технологий и методов производственных испытаний, неразрывно связанных с решением задач совершенствования информационного, алгоритмического и математического обеспечения процессов испытаний по-прежнему остается актуальным.

### Обзор существующих методов решения проблемы.

В зависимости от назначения испытания классифицируют на следующие группы: доводочные, исследовательские, контрольные, приемосдаточные и эксплуатационные [1–3]. Наиболее ответственными из перечисленных являются приемосдаточные испытания серийно выпускаемых изделий, т.к. им подвергаются все изделия, выходящие с завода-изготовителя,

и по их результатам формируют решения о возможности будущей эксплуатации. Кроме этого, эффективность и достоверность результатов приемосдаточных испытаний во многом определяет стоимость, конкурентоспособность, надежность, безопасность и качество изготовленных изделий.

Во время приемосдаточных испытаний экспериментальным путем определяют количественные и качественные характеристики испытуемых изделий с целью определения качества их сборки и изготовления отдельных комплектующих элементов [5]. Специфика процесса испытаний зависит от конструктивных особенностей изделий, подвергаемых испытаниям, от стоимости их производства, требований заказчика и условий будущей эксплуатации, в том числе и климатических.

Процесс приемосдаточных испытаний состоит из двух основных этапов. Первый этап служит для подготовки новых изделий к восприятию нагрузки и определения общего технического состояния, например, проверки целостности изоляции корпуса электрических машин или значений механических потерь и герметичности только что собранных двигателей внутреннего сгорания. Второй этап заключается в определении основных характеристик изделий и служит для проверки соответствия качества изделий требованиям, указанным в нормативной технической документации.

В общем машиностроении качество изготовленных деталей, а также качество сборки изделий численно характеризуют значениями структурных параметров: точность отверстий под наружную обойму подшипников, конусообразность и овальность этих отверстий, точность отверстий под шейки валов, шероховатость сопрягаемых поверхностей, величины зазоров в сопряжениях и т.д. [2,3,5]. В ходе приемосдаточных испытаний непосредственное (прямое) измерение структурных параметров, как на первом, так и на втором этапе невозможно, т.к. это требует полной или частичной разборки только что собранных изделий, что противоречит цели и требованиям приемосдаточных испытаний. Поэтому в ходе приемосдаточных испытаний качество изделий оценивают путем измерения и сопоставления с эталонными значениями косвенных (диагностических) параметров, отражающих рабочие процессы изделий и функционально зависящих от структурных параметров [4,5]. При этом с эталонными значениями сопоставляют не отдельные измеренные значения диагностических параметров, а так называемые, измерительные последовательности (временные ряды), представляющие набор измеренных через определенный интервал времени значений диагностических параметров и иллюстрирующие общую динамику процессов функционирования изделий с течением времени. Измеренные последовательности значений диагностических параметров, как правило, не являются функцией времени, в ряде случаев измеренные значения являются функцией от заранее определенного параметра, например, частоты вращения ротора электродвигателя или внешней нагрузки. Графическое представление измеренных последовательностей диагностических параметров принято называть характеристикой изделия.

Характеристики современных машиностроительных изделий, также, как и их классификация, достаточно разнообразны. В данной работе основное внимание уделяется машиностроительным изделиям, относящимся к классу энергетических и рабочих машин (например, ДВС, газовые турбины, компрессоры и т.д.), в ходе испытаний которых характеристики классифицируют на регулировочные, скоростные, нагрузочные и многопараметрические [5]. Перечисленные характеристики машиностроительных изделий, в случае их использования для решения задач оценки технического состояния имеют как ряд преимуществ, так и некоторые недостатки. В процессе анализа характеристик должен принимать участие оператор испытаний, что при некоторых условиях снижает точность и достоверность результатов, а также повышает время и вероятность принятия неверного решения об отнесении годных изделий к классу негодных и наоборот, а также затрудняет процесс автоматизации процесса контроля.

Еще одним существенным недостатком стандартных характеристик, используемых для оценки технического состояния, является их абстрагирование от времени, т.е. они не

позволяют оценить эволюцию процесса с течением времени и, как следствие, построить состоятельные оценки прогноза технического состояния изделий.

Характеристики и подходы, используемые для решения задач обеспечения достоверности результатов производственных испытаний за рубежом, например, согласно ISO 3046–3 или ISO 15550, из-за использования классических статистических методов обработки измерительной информации, требующих больших объемов данных, предусматривают непрерывную регистрацию большого числа параметров, что приводит к информационной избыточности системы и увеличению временных и, как следствие, финансовых затрат на хранение, поиск, обработку информации; централизованным циклическим опросом датчиков, увеличивающим инерционность систем и ведущим к старению информации и снижению достоверности результатов. использованием классических статистических методов обработки измерительной информации, требующих больших объемов данных.

Таким образом, в настоящее время не существует единой методики получения и обработки экспериментальной информации, управления режимами функционирования испытуемых изделий, принятия решений по результатам испытаний. При этом развитие новых методов управления испытаниями, необходимых для обеспечения заданной достоверности результатов оценки технического состояния, сдерживает, в том числе недостаток необходимого математического обеспечения автоматизированных систем испытаний и, прежде всего, части, касающейся идентификации объектов и процессов испытаний.

**Целью работы** является определение подхода к решению задачи математического обеспечения автоматизированных систем испытаний путем выработки методологии моделирования изделий по результатам измерения нестационарных последовательностей изменения диагностических параметров.

К настоящему времени существует развитая теория и большое число методов и технологий создания различных классов моделей сложных технических объектов и их использования для решения прикладных задач [6,7,8,9]. Развитие цифровых технологий стимулирует продолжение интенсивных исследований при моделировании сложных объектов, появляются новые классы моделей, связанные с использованием в ранее неформализуемых задачах. При этом моделирование не является основной целью анализа измерительной информации. Технологический процесс испытаний, представляя элемент системы управления качеством объектов, является этапом получения первичной информации в этой системе. Эмпирическая информация о текущих состояниях испытуемых объектов, или измерительная информация (ИИ), имеет, как правило, вид случайных значений количественно выраженных свойств объектов и их элементов, называемых показателями или параметрами [10]. Она отражает функциональное назначение; физическую природу; наличие управления; характер решаемых задач; характер обработки, передачи, хранения данных [5,10,11]. В общем случае, цель анализа информации заключается в получении обобщенной (интегральной) оценки совокупности параметров, значение которой могло бы подтвердить готовность изделия к будущей эксплуатации либо указать на неисправную деталь и вид дефекта, либо обеспечить прогноз состояния с заданной точностью и интервалом прогноза и т.п. [10].

Поэтому для обработки измерительной информации на стадии испытаний предлагается использовать современную методологию многомерного статистического анализа, которая, в отличие от традиционных методов, менее чувствительна к недостатку априорной и искаженной измерительной информации даже в условиях нестационарности исследуемых последовательностей.

#### **Основной материал статьи.**

В каждый момент времени  $t = 1, 2, \dots$  измерительная информация представляет случайный  $n \times 1$ –вектор  $x_t = (X_{1,t}, \dots, X_{i,t}, \dots, X_{n,t})^T$ , содержащий значения  $n$  параметров в этот момент времени,  $i = 1 \div n$  – номер параметра,  $t = 1, \dots, T$  – дискретное время [5,10,11].

Тогда упорядоченные по времени последовательности или скалярные процессы, изменения всех изучаемых параметров образуют единый многомерный случайный процесс с дискретным временем. Физическим обоснованием для объединения скалярных процессов изменения отдельных параметров в единый многомерный процесс служат стандартные характеристики изделий и их структурные параметры (говоря точнее, известные качественные зависимости между прямыми и диагностическими параметрами). Для двигателей внутреннего сгорания это скоростные, регулировочные, нагрузочные характеристики.

В работах [10,11] на примере двигателей внутреннего сгорания показано, что трудно моделируемые физические зависимости между диагностическими параметрами могут быть определены статистическим многомерным анализом путем поиска стационарной случайной комбинации нестационарных случайных процессов, что значительно упрощает процедуру моделирования и последующей оценки состояния изделий. Важным свойством стационарной случайной комбинации нестационарных случайных процессов является ее сохранение в течении всего срока службы изделия, что объясняется физикой процессов взаимодействия элементов системы. Другими словами, для исправных изделий динамика отдельных параметров в ходе испытаний одинакова, в результате чего, сохраняется баланс между эксплуатационными (мощностными и экономическими) показателями изделий, который аналитически можно записать в следующем виде:

$$\beta^T \cdot x_t = 0, \quad (1)$$

где  $\beta$  – вектор коэффициентов равновесия системы.

Возникновение неисправностей, например, вызванных ослаблением резьбовых соединений или использованием некачественных комплектующих, вызывает отклонение от равновесного состояния (1) из-за возникновения некомпенсируемых потерь, что является вторым важным свойством стационарной случайной комбинации нестационарных случайных процессов, которое может быть использовано в качестве численного показателя, характеризующего техническое состояние изделий. В общем виде величину отклонения системы от равновесного состояния  $Z_t$  можно определить по следующей формуле:

$$z_t = \beta^T \cdot x_t. \quad (2)$$

Принимая во внимание (1) и (2) задачу моделирования сложных машиностроительных изделий по результатам автоматизированных производственных испытаний можно свести к задаче оценки параметров вектора  $\beta$ .

Итак, формализуем задачу отыскания численных значений параметров вектора  $\beta$  следующим образом. Пусть задан многомерный процесс измерения диагностических параметров исследуемого изделия  $x_t = (X_{1,t}, \dots, X_{i,t}, \dots, X_{n,t})^T$  с заданным шагом дискретизации  $\Delta t$ . Требуется определить такой единственный вектор параметров  $\beta$  при котором линейная комбинация элементов вектора  $x_t$  будет тождественна нулю.

Впервые для технических объектов и систем процедура отыскания вектора весовых коэффициентов в линейной стационарной комбинации нестационарных процессов была предложена в работе [11,12,13], после чего получила дальнейшее развитие в работе [9]. Первый шаг определения параметров вектора  $\beta$  предполагает построение модели векторной авторегрессии, связывающей текущие и прошлые значения каждого диагностического параметра с текущими и прошлыми значениями остальных параметров. К примеру, в работе [14] рассмотрен многомерный случайный процесс изменения трех параметров в ходе приемосдаточных испытаний, отражающих качество сборки двигателя внутреннего сгорания: удельного расхода топлива  $g_e$  ( $\text{кг} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ ), давления во впускном коллекторе  $H$  ( $\text{кПа}$ ), содержания  $CH$  в отработавших газах ( $\text{млн}^{-1}$ ) (рис. 1). Наблюдения за параметрами проведены при постоянной мощности и частоте вращения коленчатого вала. Показано, что каждый скалярный случайный процесс может быть описан моделью:

$$X_{i,t} = \mu_{0,i} + \mu_i t + \sum_{j=1}^p \varphi_{ij} X_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

где  $\mu_{0,i}$  – константа, определяющая средний уровень, относительно которого возможны флуктуации значений параметра;

$\mu_i$  – коэффициент, характеризующий тенденцию изменения параметра;

$\varphi_{ij}$  – константы,

$\varepsilon_{i,t}$  – стационарный случайный процесс с нормальным распределением;

$p$  – количество членов авторегрессии (предыдущих значений параметра, влияющих на текущее значение).

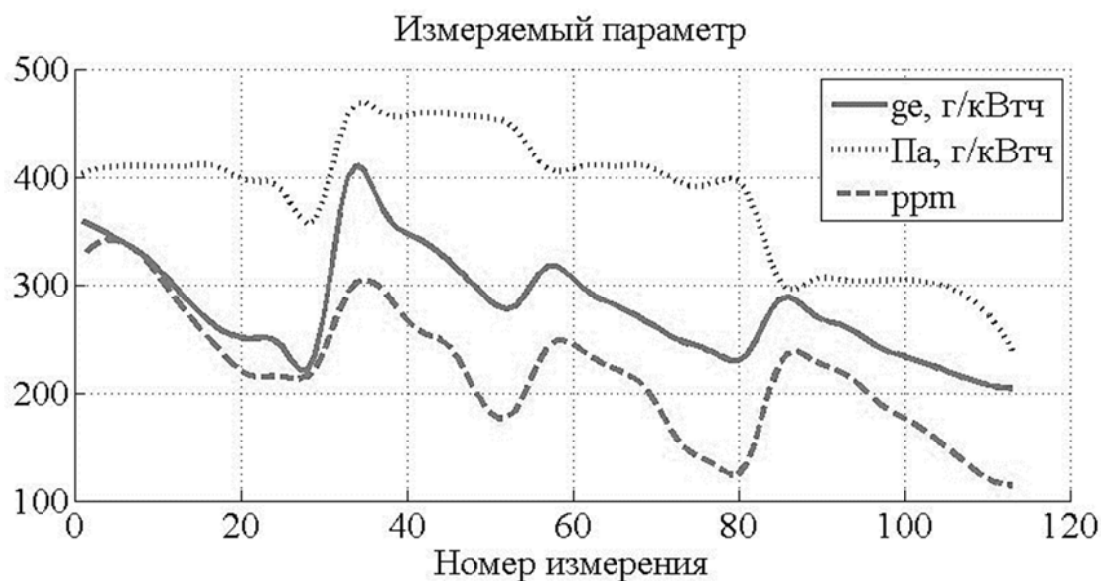


Рисунок 1 – Результаты измерений

На втором этапе исследуют процесс изменения параметров в приращении исходного процесса, или в первых разностях, т.е. исследуют новый процесс, определяемый выражением  $\Delta X_{i,t} = X_{i,t} - X_{i,t-1}$  ( $\Delta$  – разностный оператор). Тогда модель (3) преобразуется в эквивалентную форму:

$$\Delta X_{i,t} = \mu_0 + \mu t + \alpha \Delta X_{i,t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_j \Delta X_{i,t-j} + \varepsilon_t. \quad (4)$$

Уравнение (4) соответствует расширенному статистическому критерию Дики–Фуллера [12] и позволяет последовательно проверить гипотезы о равенстве нулю (отдельно или совместно) коэффициентов  $\mu$ ,  $\mu_0$ .

Первые разности процессов изменения параметров  $ge$ ,  $H$ ,  $CH$  также являются случайными процессами, но уже стационарными с нулевым математическим ожиданием и конечной единичной дисперсией.

На третьем этапе проверяется однородность структуры модели скалярных случайных процессов изменения отдельных параметров используя известные статистики, например, [12,13] и, если однородность подтверждается, то можно выдвинуть гипотезу о существовании причинно–следственной зависимости между параметрами в виде стационарной линейной комбинации  $\beta^T x_t$  и выбрать аналитическое описание многомерного случайного процесса. Для рассматриваемого примера из [14] адекватной измерительной информации признана векторная авторегрессионная модель вида:

$$x_t = \Pi_0 + \Pi_1 x_{t-1} + \Pi_2 x_{t-2} + \varepsilon_t \quad (5)$$

где  $\Pi_0$  – вектор констант;

$\Pi_j = (\alpha_{ik}(j)), i, k = 1, \dots, n, j = 1, \dots, p$  – матрицы коэффициентов;

$\varepsilon_t = (\varepsilon_{1t}, \dots, \varepsilon_{nt})^T$  – вектор ошибок оценивания (остатков);

$x_t = (H(t) \quad ge(t) \quad CH(t)ge(t))^T$ ;

$\Pi_0 = (2.7 \quad 9.1 \quad 4.0)^T$ ;

$$\Pi_1 = \begin{pmatrix} 1,8 & 0,09 & -0,03 \\ 0,03 & 1,8 & 0,1 \\ 0,05 & -0,02 & 1,96 \end{pmatrix}, \quad \Pi_2 = \begin{pmatrix} -0,81 & -0,13 & 0,08 \\ 0,01 & -0,92 & -0,05 \\ -0,01 & -0,04 & -0,96 \end{pmatrix}.$$

Определив класс допустимых моделей и оценив значения коэффициентов, проанализируем модель случайных процессов приращений (первых разностей) исходных процессов:

$$\Delta x_t = \Pi_0 + \Pi x_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Pi_j \Delta x_{t-j} + \varepsilon_t, \quad \Pi = \alpha \beta^T, \quad (6)$$

где  $\alpha$  –  $n \times r$  матрица корректирующих коэффициентов,  $r = l$ .

Матрица  $\Pi = \alpha \beta^T$  в уравнении (6) имеет вид:

$$\Pi = \begin{bmatrix} -0,004 \\ (0,003) \\ 0,003 \\ (0,002) \\ -0,004 \\ (0,002) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,333 & 0,996 & -416,612 \\ (0,174) & (0,220) & (60,761) \end{bmatrix} = \alpha \beta^T. \quad (7)$$

Величины в скобках рядом с каждой оценкой в уравнении (7) означают стандартные ошибки оценок. Решение (6) и (7) позволяет вычислить значения  $\beta$ .

$$\beta_{(1)} = \begin{bmatrix} -0,333 & 0,996 & -416,612 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

Пример использования численных значений коэффициентов  $\beta$  для оценки равновесного состояния исследуемого двигателя представлен на рисунке 2.

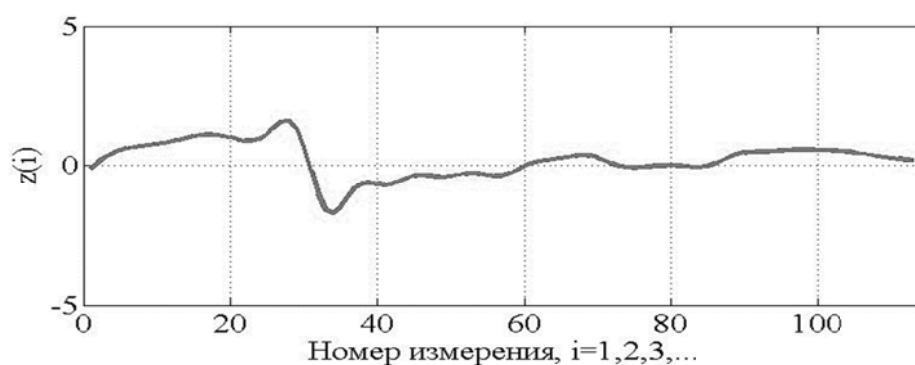


Рисунок 2 – Результаты оценки равновесного состояния ДВС на этапе испытаний

Небольшие по модулю флуктуации функции  $z(i)$ ,  $i=1,2,3,\dots$  вблизи нуля объясняются инструментальными погрешностями измерений, которая может быть устранена путем использования оптимальных адаптивных алгоритмов фильтрации работающих в условиях

априорной неопределенности построенных, например, на основе известного оптимального фильтра Калмана или спектрального фильтра Винера. В рамках данной работы процедура фильтрации исследуемых измерительных последовательностей, неразрывно связанная с представлением модели испытуемого изделия в пространстве состояний, не рассматривалась.

**Выводы.** Анализ предлагаемого подхода к оценке технического состояния сложных машиностроительных изделий показал, что его использование в автоматизированном производстве позволит повысить достоверность принятия решений относительно годности изделий к их дальнейшей эксплуатации при сокращении сроков и расходов на испытания. Очевидно, что дальнейшее решение задач повышения достоверности решений о годности изделий к эксплуатации должно быть связано с определением режимов автоматизированных испытаний, т.е. режимов работы испытуемых изделий, обеспечивающих наискорейший поиск неисправностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006, 410 с.
2. Соколов Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Теория систем и управления, 2004. – № 6. – С. 5–16.
3. Майданович О.В. Интеллектуальные технологии автоматизированного мониторинга сложных технических объектов / О.В. Майданович // Труды СПИИРАН, 2013. – Вып. 6(29). – Стр. 201–216.
4. Халиуллин Ф.Х., Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностики двигателей внутреннего сгорания / Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р. // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. – № 5 (47). – С. 205–209.
5. Pervukhina, E., Osipov K., Rapatskiy, Y.: Improvement of the acceptance test procedure for the external combustion engine after assembly by using the relationship between diagnostic parameters. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, vol.40, num. 2, pp. 171–175. © Allerton Press, Inc. (2011).
6. Рыжиков Ю.И. Проблемы теории и практики имитационного моделирования / Ю.И. Рыжиков, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика», 2007. – С.58–71.
7. Соколов Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Теория систем и управления, 2004. – № 6. – С. 5–16.
8. Згуровский М.З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения / М.З.Згуровский. – К.:Наукова думка, 2011. – 728 С.
9. Pervukhina, E., Osipov, K., Golikova, V. (2015) Lowering toxic concentrations in the diesel exhaust gases // Communications in Computer and Information Science, Special Issue “Optimization in the Natural Sciences,” pp. 118–128.
10. Первухина Е.Л., Голикова В.В., Степанченко Т.Л. Информационные технологии в задачах выявления неисправных машиностроительных изделий в ходе приемосдаточных испытаний после сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. – Москва, 2010. – №11. – С.3–8.
11. Emmenegger, J.-F., Pervukhina, E., Golikova, V. (2013) Harmonic Analysis and Cointegration of Diagnostic Parameter Time Series of Motors, International Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol. 82, N 1, P. 143–161.
12. Box G.E. Time Series Analysis, Forecasting and Control / G.E. Box., G.M. Jenkins, G.C. Reinsel. – New Jersey: Prentice Hall, 1994.–598p.
13. Juselius K. The Cointegrated VAR Model / K. Juselius. – New York: Oxford University Press Inc., 2006. – 457 p.
14. Pervukhina E., Golikova, V. Osipov K., Defect identification of machine-building products during the course of acceptance tests, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, Vol. 39, N 5, pp. 485–491. © Allerton Press, Inc., 2010.

### Осипов Константин Николаевич

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов». 299053, г. Севастополь, ул. Университетская 33. Тел. +7(8692)–55–00–77  
Email: assistentmm@mail.ru

### Голикова Виктория Викторовна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, кандидат технических наук, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская 33. Тел. +7(8692)–55–00–77  
Email:

## MODELING OF COMPLEX ENGINEERING PRODUCTS BY RESULTS OF AUTOMATED INDUSTRY TESTING

**Abstract.** *A the approach of multivariate stationary stochastic relations modeling between scalar non-stationary processes of the diagnostic parameters of complex engineering products in the form of linear combinations by results of automated industry (acceptance or control) tests is proposed. The proposed approach makes it possible to build correct models of products even in the case of non-stationary processes without converting them into stationary ones. This allows the use of the modeling results in the tasks of the automated assessment of technical condition in real time. Using the example of an internal combustion engine, it is shown that the application of the proposed models in modern production to describe the dynamics of the technical condition changes of the tested products allows to provide the required reliability of the test results using the available production capacities and the qualification potential of the test operators.*

**Keywords:** *complex engineering products, multivariate analysis, diagnostic parameters, reliability of test results.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Okhtilev M.YU. Intellektualnyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov / M.YU. Okhtilev, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov. – M.: Nauka, 2006, 410 s.
2. Sokolov B.V. Kontseptualnyye osnovy otsenivaniya i analiza kachestva modeley i polimodelnykh kompleksov / B.V. Sokolov, R.M. Yusupov // Teoriya sistem i upravleniya, 2004. – № 6. – S. 5–16.
3. Maydanovich O.V. Intellektualnyye tekhnologii avtomatizirovannogo monitoringa slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov / O.V. Maydanovich // Trudy SPIIRAN, 2013. – Vyp. 6(29). – Str. 201–216.
4. Khaliullin F.KH., Osobennosti sostavleniya diagnosticheskoy matritsy Bayyesa pri bezrazbornoy diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya / Khaliullin F.KH., Akhmetzyanov I.R. // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal, 2016. – № 5 (47). – S. 205–209.
5. Pervukhina, E., Osipov K., Rapatskiy, Y.: Improvement of the acceptance test procedure for the external combustion engine after assembly by using the relationship between diagnostic parameters. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, vol.40, num. 2, pp. 171–175. © Allerton Press, Inc. (2011).
6. Ryzhikov YU.I. Problemy teorii i praktiki imitatsionnogo modelirovaniya / YU.I. Ryzhikov, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov // Sbornik trudov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika», 2007. – S.58–71.
7. Sokolov B.V. Kontseptualnyye osnovy otsenivaniya i analiza kachestva modeley i polimodelnykh kompleksov / B.V. Sokolov, R.M. Yusupov // Teoriya sistem i upravleniya, 2004. – № 6. – S. 5–16.
8. Zgurovskiy M.Z. Sistemnyy analiz: problemy, metodologiya, prilozheniya / M.Z.Zgurovskiy. – K.: Naukova dumka, 2011. – 728 S.
9. Pervukhina, E., Osipov, K., Golikova, V. (2015) Lowering toxic concentrations in the diesel exhaust gases // Communications in Computer and Information Science, Special Issue “Optimization in the Natural Sciences,” pp. 118–128.
10. Pervukhina Ye.L., Golikova V.V., Stepanchenko T.L. Informatsionnyye tekhnologii v zadachakh vyyavleniya neispravnykh mashinostroitelnykh izdeliy v khode priyemodatchnykh ispytaniy posle sborki // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. – Moskva, 2010. – №11. – S.3–8.
11. Emmenegger, J.-F., Pervukhina, E., Golikova, V. (2013) Harmonic Analysis and Cointegration of Diagnostic Parameter Time Series of Motors, International Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol. 82, N 1, P. 143–161.
12. Box G.E. Time Series Analysis, Forecasting and Control / G.E. Box., G.M. Jenkins, G.C. Reinsel. – New Jersey: Prentice Hall, 1994.–598p.
13. Juselius K. The Cointegrated VAR Model / K. Juselius. – New York: Oxford University Press Inc., 2006. – 457 p.
14. Pervukhina E., Golikova, V. Osipov K., Defect identification of machine-building products during the course of acceptance tests, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, Vol. 39, N 5, pp. 485–491. © Allerton Press, Inc., 2010.

#### Osipov Konstantin Nikolaevich

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, PhD, Docent (Associate Professor), Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes 299053, Sevastopol, Universytetskayst.33.  
Тел. +7(8692)–55–00–77  
Email: assistanttmm@mail.ru

#### Golikova Victoria Viktorovna

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, PhD  
299053, Sevastopol, Universytetskayst.33.  
Тел. +7(8692)–55–00–77  
Email:

К.Ю. ФЕДОРОВСКИЙ

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы рационального построения замкнутых систем охлаждения судовых энергоустановок. Проведен анализ состава и показателей работы энергетического оборудования системы. Определено влияние температуры и скорости теплоносителя на эффективность теплоотвода. Представлены различные варианты построения систем и необходимые для этого условия. Определены принципы рационального построения замкнутых систем охлаждения.

**Ключевые слова:** энергоустановка судна, замкнутая система охлаждения, охлаждаемое оборудование, устройства теплоотвода.

### Введение.

В настоящее время в судостроении широко распространены разомкнутые системы охлаждения энергетических установок (ЭУ), предусматривающие потребление забортной охлаждающей воды. Однако, в ряде случаев, такие системы не могут обеспечить необходимую надежность работы, например при нахождении судна в сильно загрязненной акватории [1]. Кроме данного технического аспекта в настоящее время все более актуальным становится экологический аспект. Разомкнутые системы оказывают существенное отрицательное антропогенное воздействие. В [2] показано, что при этом происходит уничтожение рыбных ресурсов морей.

### Основная часть.

Решение проблемы может быть найдено во внедрении замкнутых систем охлаждения (ЗСО) энергоустановок. Это позволяет: отказаться от потребления забортной охлаждающей воды; в ряде случаев упростить систему за счет исключения контура забортной воды, включая трубопроводы и насосы; снизить ее стоимость; повысить надежность и экологическую безопасность эксплуатации. Отвод теплоты в морскую воду осуществляется в конечных устройствах теплоотвода (КУТ), в качестве которых могут быть использованы судовые обшивочные теплообменные аппараты (ОТОА), выносные трубчатые аппараты, бокс кулеры и т.д. [1].

Оснащать такими системами наиболее целесообразно дизельные установки, отличающиеся сравнительно небольшой долей теплоты, отводимой охлаждающей водой.

Среди факторов, оказывающих важное влияние на эффективность ЗСО, а следовательно, и на возможность широкого внедрения в практику, важная роль принадлежит также правильному построению самой системы.

Различные типы судов включают в себя оборудование, отличающееся по отводимой теплоте, температурам охлаждающих сред и по своей роли, которую оно играет в составе ЭУ. Важнейшими с этой точки зрения являются главные и вспомогательные двигатели. Вспомогательное оборудование, отвод теплоты от которого также осуществляется системой (холодильники провизионных камер, охлаждение компрессоров и т.д.), имеет меньшее тепловыделение, меньшее повышение температуры теплоносителя и большую рассредоточенность на судне.

В [3] показано, что тепловыделение в систему охлаждения дизельной ЭУ составляет примерно 60% полезной мощности. Удельное количество отводимой теплоты составляет 0,48...1,0 кВт на 1 кВт мощности дизельной установки. Примерно половина этой теплоты приходится на зарубашечное пространство двигателя, а остальное распределяется между маслоохладителем и охладителем надувочного воздуха. В таблице 1 приведены данные по температурным уровням охлаждающих сред некоторых видов энергетического оборудования судовой дизельной установки.

Наиболее неблагоприятный режим работы КУТ и в целом ЗСО связан со случаем, когда забортная вода неподвижна относительно судна. При этом теплоотдача к забортной

воде осуществляется при свободной конвекции. Проведенные применительно к судовым обшивочным теплообменным аппаратам экспериментальные исследования [1] показали, что значение коэффициента теплопередачи существенно зависит от температурного напора между охлаждаемым теплоносителем и забортной водой  $\Delta t = t_{\text{в}} - t_3$  (рисунок 1). Поэтому охлаждаемый теплоноситель необходимо подавать в КУТ с максимальной возможной температурой. Это приводит к снижению требуемой теплопередающей поверхности, что, в конечном счете, обеспечивает снижение массогабаритных показателей всей системы.

Таблица 1 – Характеристика охлаждаемого оборудования дизельной ЭУ

Наименование оборудования	Охлаждаемая среда			Охлаждающая среда		
	теплоноситель	температура выхода из оборудования, °С	охлаждение теплоносителя, °С	теплоноситель	максимальная температура входа в охладитель оборудования, °С	подогрев теплоносителя, °С
Зарубашечное пространство дизеля	металлические поверхности оборудования			вода	50...80	6...10
Маслоохладитель	масло	55...70	5...15	вода	32...85	5...7
Охладитель наддувочного воздуха дизеля	воздух	на 70...80° выше темпер. вход. охлаждающей воды	60...70	вода	32...55	3...10
Электрогенератор	воздух	–	–	вода	32	1...2
Установка кондиционирования воздуха	хладагент	60...100	30...40	вода	32	2...5
Холодильная машина	хладагент	60...100	30...60	вода	32	4...5
Компрессоры сжатого воздуха	металлические поверхности оборудования			вода	32	4...5

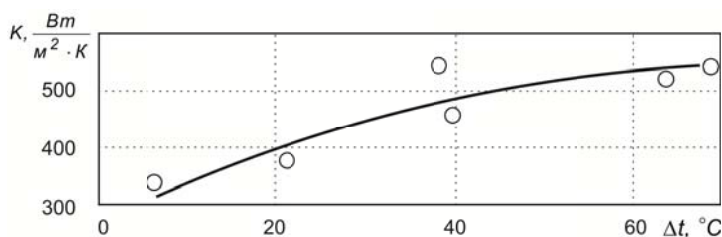


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  теплообменника от температурного напора  $\Delta t$  при скорости воды  $v \approx 0,9...1,0$  м/с

Повышение скорости  $v$  движения воды в таких КУТ также способствует увеличению коэффициента теплопередачи  $K$  (рисунок 2).

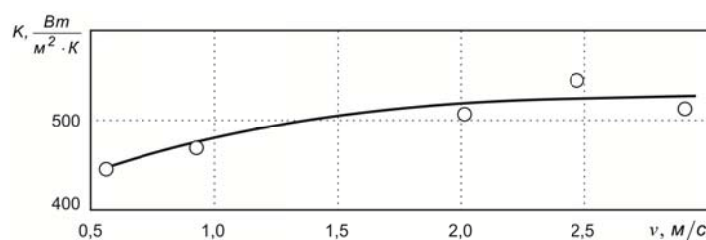


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  от скорости  $v$  воды в лабиринтном канале ( $\Delta t \approx 40^\circ\text{C}$ )

Однако эффект от этого оказывается ниже, чем в случае изменения  $\Delta t$ . Повышение  $v$  с 0,5 м/с до 2 м/с приводит к увеличению  $K$  с 470 Вт/(м²К) до 530 Вт/(м²К). При этом существенно (пропорционально  $v^2$ ) возрастает гидравлическое сопротивление, что связано с соответствующим ростом энергозатрат на привод насосов.

Поскольку судовое энергетическое оборудование отличается отводимой теплотой, температурами и расходами охлаждающих сред, то при построении ЗСО ЭУ возможны различные варианты. Рассмотрим классификацию таких систем (рисунок 3) и принципы, которые могут быть положены в основу их построения.

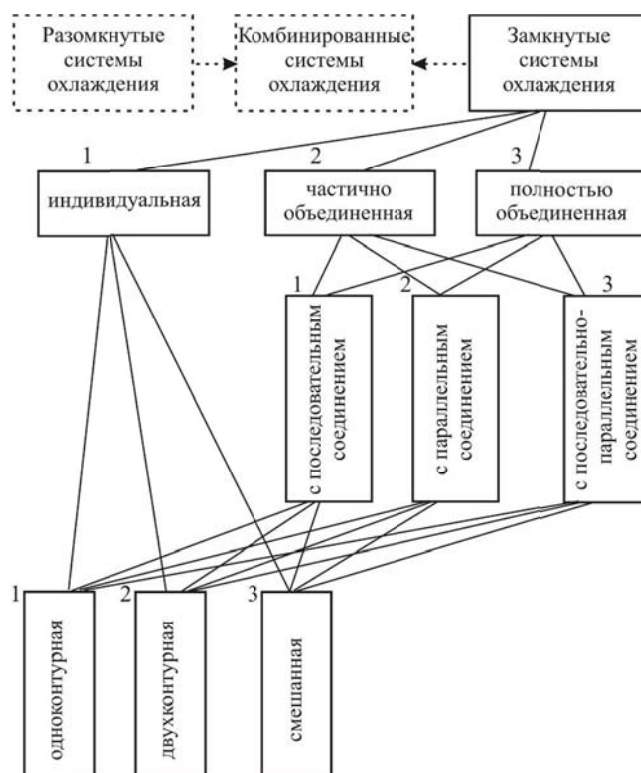
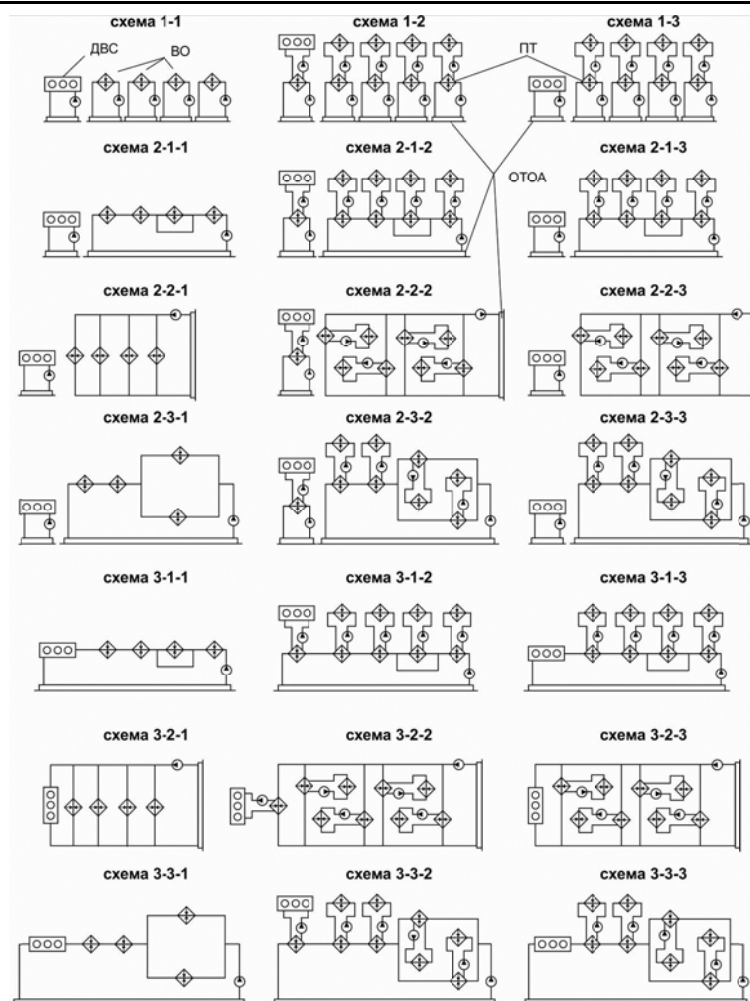


Рисунок 3 – Классификация замкнутых систем охлаждения

Одна из их возможных иллюстрирующих интерпретаций такой классификации применительно к дизельной ЭУ представлена на рисунке 4. При этом последовательность цифр сверху вниз на классификации (рисунок 3) обозначает вариант схемы ЗСО на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Иллюстрация принципов построения замкнутых систем охлаждения (номера схем соответствуют номерам на рисунке 3)**

Построение ЗСО по принципу индивидуальных одноконтурных СО (схема 1–1) обеспечивает максимальный температурный напор в КУТ и, следовательно, его минимальные габариты. Однако имеются такие теплоносители (например, воздух или масло), доставка которых к КУТ нерациональна. В этом случае используются двухконтурные системы с промежуточным теплоносителем, передача теплоты к которому осуществляется в специально спроектированных достаточно компактных промежуточных теплообменниках (ПТ). Таким образом индивидуальная ЗСО может быть одноконтурной, двухконтурной и смешанной (часть оборудования с одноконтурной и часть с двухконтурной системой (рисунок 3 схема 1–3).

В современном судостроении достаточно широко применяются объединенные (централизованные) системы охлаждения главного и вспомогательного энергетического оборудования. При этом, по сравнению с комплексом индивидуальных схем, в объединенных схемах снижается протяженность трубопроводов, количество требуемых насосов и т.д.

Частично объединенные ЗСО основываются на соединении в группы оборудования с близкими температурами охлаждающего теплоносителя. В рамках рассматриваемых групп оборудование может соединяться последовательно (схемы 2–1), параллельно (схема 2–2) и смешанным образом (схемы 2–3). Наиболее желательным следует считать последовательное объединение. При этом обеспечивается минимальный суммарный расход охлаждающего теплоносителя  $W^{ПСО}$  и постепенный его подогрев. Обычно первыми по ходу располагаются теплообменники, имеющие минимальные коэффициенты теплопередачи и температурные напоры. Обязательными условиями такого соединения являются

$$W_i \leq W^{\text{ПОС}}, \quad t_i'' \leq [t_{i+1}']$$

где  $W_i$  — расход теплоносителя через  $i$ -ое охлаждаемое оборудование;

$t_i''$ ,  $t_{i+1}'$  — соответственно температура выхода охлаждающего теплоносителя с  $i$ -го оборудования и максимально допустимая температура входа на  $i+1$  оборудование.

В случае  $W_i < W^{\text{ПОС}}$  должен быть предусмотрен обвод части охлаждающего теплоносителя (например, схемы 2–1). Охлаждаемое оборудование не всегда удастся расположить в схеме последовательно.

В случае  $t_i'' > [t_{i+1}']$  может быть использовано параллельное соединение.

Для него должно выполняться лишь условие

$$t'_{\text{от}} \leq [t_i'] \quad |_{i=1, \dots, n}.$$

При этом затруднено дифференцированное распределение оборудования по температурам охлаждающего теплоносителя, как это делалось при последовательном соединении. Возрастает суммарный расход охлаждающей воды в системе. Для обеспечения требуемых расходов по параллельным ветвям системы устанавливают дополнительные гидравлические сопротивления (дрессельные шайбы). Данный подход наиболее удобен для объединения, например вспомогательного оборудования ЭУ.

Обычно необходимо охлаждать оборудование с различными тепловыми характеристиками и расходами охлаждающих жидкостей, что требует комбинации рассмотренных принципов, то есть применения последовательно–параллельного соединения. При этом будут соответственно действовать ограничивающие условия, рассмотренные ранее.

В полностью объединенной ЗСО соединение оборудования осуществляется по принципам, аналогичным рассмотренным выше (схемы 3–1, 3–2, 3–3). Подобно индивидуальным ЗСО, объединенные системы могут быть одноконтурными, двухконтурными и смешанными (часть оборудования с одноконтурной и часть с двухконтурной системой). При этом одноконтурная система также предпочтительней по сравнению с двухконтурной, поскольку отпадает необходимость в промежуточном теплообменнике, насосе, а также повышается температурный напор в КУТ.

Помимо чисто замкнутых систем, могут быть комбинированные системы, когда часть оборудования ЭУ имеет ЗСО, а другая часть — разомкнутую систему.

Таким образом, основными принципами рационального построения ЗСО являются:

объединение охлаждаемого оборудования в группы;

преимущественно последовательное соединение оборудования в этих группах;

в рамках последовательного соединения расположение оборудования с учетом реализуемых температурных напоров и обеспечиваемых коэффициентов теплопередачи;

уменьшение количества контуров системы;

оптимальное распределение температурных напоров между контурами многоконтурной системы.

Сюда примыкают вопросы целесообразности и возможности использования комбинированной системы охлаждения, оптимизации температурных напоров во многоконтурных системах [4] и др.

При всем этом возможно большое количество вариантов ЗСО. Выбор наиболее подходящего варианта системы является довольно сложной задачей, поскольку необходимо рассматривать в совокупности различные частные показатели системы: массу, объем, затраты мощности, стоимость и т.д. Возникает проблема оценки весомости того или иного показателя с учетом особенностей конкретного судна. Соответствующие подходы более подробно изложены в [1].

С целью уменьшения размерности задачи выбора оптимального варианта системы, должен быть использован феноменологический подход, учитывающий специфику рассматриваемого объекта и накопленный ранее опыт. В общем случае предусматриваются следующие процедуры построения системы охлаждения: выбор исходных вариантов топологии схемы и режимов работы; расчет материальных и тепловых балансов; технико–экономический анализ и выделение основных элементов, определяющих показатели

системы; с учетом этого изменение топологии и режимов работы. Обычно перечисленные процедуры повторяются до достижения оптимальных показателей.

## 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. Шурпак В.К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов / В.К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2014. – №37. – С. 51–55.
4. Федоровский К.Ю. Терморегулирование контуров экологически безопасных замкнутых систем охлаждения энергоустановок. / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4–1(324). – С. 147–151.

### 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

## PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF CLOSED COOLING SYSTEMS SHIP DIESEL ENERGY INSTALLATIONS

**Abstract.** *The problems of rational construction of closed cooling systems for ship power installations are considered. The analysis of the composition and performance of the power equipment of the system is carried out. The influence of the temperature and the velocity of the coolant on the efficiency of the heat sink is determined. Various options for building systems and the conditions necessary for this are presented. Principles of rational construction of closed cooling systems are determined.*

**Keywords:** *ship power installation, closed cooling system, cooled equipment, heat sink devices.*

## 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. 127–133.
3. 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.
4. Fedorovsky, K.Yu. Thermoregulation of the circuits of environmentally safe closed cooling systems for power plants. / K.Yu. Fedorovsky, N.K. Fedorovskaya // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. – 2017. – No. 4–1 (324). – P. 147–151

### 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

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 621.865.8

С.И. САВИН, Л.Ю. ВОРОЧАЕВА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ  
ЦЕНТРА МАСС ШАГАЮЩЕГО РОБОТА,  
ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ**

**Аннотация.** В работе предложены подходы к определению областей пространства, в которых может находиться центр масс двуногого шагающего робота при различных положениях и ориентациях его стоп, для обеспечения его вертикальной устойчивости. Рассматривается статическое равновесие двуногого робота, стоящего на двух ногах на кусочно–линейной опорной поверхности. Предложена модель взаимодействия робота с поверхностью, которая предполагает, что контакт между стопой робота и опорной поверхностью происходит в четырех точках, расположенных в углах стопы, сформулированы условия статического равновесия. Описан численный метод определения статического равновесия робота, основанный на решении задачи выпуклого программирования. В результате проведенного моделирования установлена зависимость между ориентацией стоп робота и формой области устойчивости, а также определено влияние коэффициента трения на вид этой области.

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, опорная поверхность, область устойчивости, задача выпуклого программирования, статическое равновесие, конус трения.

**Введение**

Проблема управления двуногими шагающими роботами исследуется достаточно давно и подробно освещена в научной литературе. Одним из ключевых аспектов этой проблемы является обеспечение вертикальной устойчивости шагающего робота. Для решения этой задачи были разработаны различные подходы. Имеют место методы, базирующиеся на анализе уравнений динамики шагающего робота (такие как CWC метод, от англ. contact wrench cone), методы, использующие анализ динамики центра масс механизма (например, ZMP метод, от англ. zero–moment point) и другие [1–3]. Одна из активно используемых групп методов основана на планировании траектории центра масс робота, позволяющей гарантировать его вертикальную устойчивость при соблюдении заданного ряда условий [4]. Для этого используется предварительно построенная последовательность шагов робота [5–7]. Заметим, что планирование траектории центра масс применимо не только для реализации походки робота, но и в других режимах движения, например, в процессе вставания (вертикализации) [8–9]. Полученная таким образом траектория центра масс затем используется для составления и решения обратной задачи кинематики и генерации задающих воздействий для системы управления роботом [10].

Одной из проблем, связанных с планированием траектории центра масс, является выявление областей пространства, где может находиться центр робота так, чтобы робот при этом мог сохранять вертикальную устойчивость. Для случая, когда движение происходит по плоской опорной поверхности, эта область пространства совпадает с выпуклой оболочкой всех точек контакта робота и опорной поверхности без ограничений по вертикали [3, 4]. Для опорных поверхностей сложной формы вид этой области зависит, в том числе, от локальной геометрии опорной поверхности, например, от направления нормали этой поверхности в точке контакта. В данной работе рассмотрим подход к отысканию таких областей.

**1. Описание шагающего робота**

В работе будем рассматривать статическое равновесие двуногого робота, стоящего на двух ногах на опорной поверхности. В частности, поставим задачу определить, возможно ли статическое равновесие робота при заданном режиме контактного взаимодействия (заданных координатах точек контакта, коэффициентах сухого трения и направлениях векторов нормальных реакций). Решение данной задачи не зависит от структуры и конфигурации

робота, что, с одной стороны, позволяет упростить математическую формулировку задачи, а с другой – позволяет обобщать полученные результаты на разнообразные схемы шагающих роботов.

Рассмотрим следующую обобщенную расчетную схему (рисунок 1).

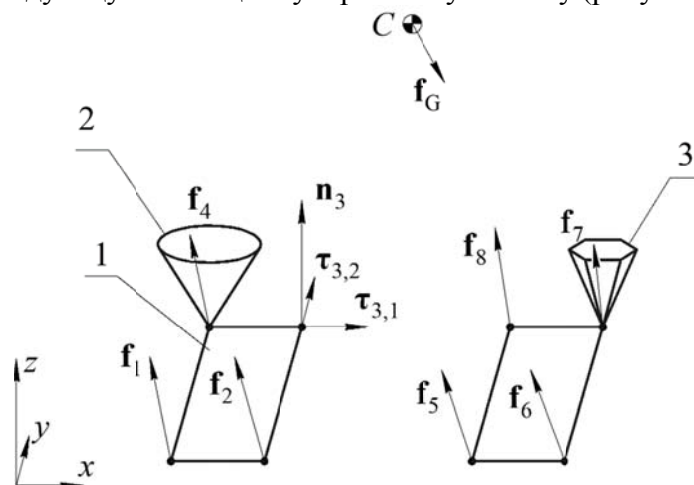


Рисунок 1 – Расчетная схема шагающего робота:

1 – стопа робота, 2 – конус трения, 3 – линейная аппроксимация конуса трения

На рисунке 1 использованы следующие обозначения:  $C$  – центр масс механизма,  $\mathbf{f}_G$  – вектор силы тяжести,  $\mathbf{f}_i$  – вектор реакции опоры в точке контакта стопы и опорной поверхности,  $\mathbf{n}_i$  – нормальная реакция,  $\boldsymbol{\tau}_{i,1}$  и  $\boldsymbol{\tau}_{i,2}$  – сила трения в проекции на взаимно перпендикулярные оси, тангенциальные опорной поверхности,  $x, y, z$  – оси неподвижной системы координат. Заметим, что векторы  $\mathbf{n}_i$  в общем случае могут не быть вертикальными. Величины  $\mathbf{f}_i$ ,  $\mathbf{n}_i$ ,  $\boldsymbol{\tau}_{i,1}$  и  $\boldsymbol{\tau}_{i,2}$  связаны соотношениями:

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{n}_i + \boldsymbol{\tau}_{i,1} + \boldsymbol{\tau}_{i,2}, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{i,1} + \boldsymbol{\tau}_{i,2} \leq \mu_i \mathbf{n}_i, \quad (2)$$

где  $\mu_i$  – коэффициент сухого трения в точке контакта.

Выражение (2) представляет собой описание конуса трения и является ограничением, наложенным на значения  $\mathbf{n}_i$ ,  $\boldsymbol{\tau}_{i,1}$  и  $\boldsymbol{\tau}_{i,2}$ .

Предложенная модель предполагает, что контакт между роботом и опорной поверхностью происходит лишь в четырех точках, расположенных в углах стопы.

Условие статического равновесия робота может быть записано следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 (\mathbf{n}_i + \boldsymbol{\tau}_{i,1} + \boldsymbol{\tau}_{i,2}) + \mathbf{f}_G = \mathbf{0}, \\ [\mathbf{r}_{CKi}]_{\times} (\mathbf{n}_i + \boldsymbol{\tau}_{i,1} + \boldsymbol{\tau}_{i,2}) = \mathbf{0}, \\ -\mu_i \|\mathbf{n}_i\| \leq \|\boldsymbol{\tau}_{i,1} + \boldsymbol{\tau}_{i,2}\| \leq \mu_i \|\mathbf{n}_i\|, \quad i = 1..8, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_{CKi}$  – вектор, проведенный из центра масс к  $i$ -ой точке контакта, а оператор  $[\cdot]_{\times}$  представляет вектор в виде кососимметрической матрицы, такой что  $[\mathbf{a}]_{\times} \mathbf{b} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$ .

Условия (3) должны быть дополнены требованием, чтобы векторы  $\mathbf{n}_i$  были направлены от опорной поверхности.

## 2. Численный метод определения статического равновесия робота

В этом разделе рассмотрим численный метод, позволяющий определить, может ли робот сохранять статическое равновесие. Для этого введем обозначения:

$$\mathbf{n}_i = y_i \hat{\mathbf{n}}_i, \quad \boldsymbol{\tau}_{i,1} = x_{i,1} \hat{\mathbf{t}}_{i,1} \text{ и } \boldsymbol{\tau}_{i,2} = x_{i,2} \hat{\mathbf{t}}_{i,2}, \quad (4)$$

где  $\hat{\mathbf{n}}_i$ ,  $\hat{\mathbf{t}}_{i,1}$  и  $\hat{\mathbf{t}}_{i,2}$  – единичные взаимно перпендикулярные векторы, причем  $\hat{\mathbf{n}}_i$  является нормальным к опорной поверхности в точке контакта,

$x_{i,1}$ ,  $x_{i,2}$ ,  $y_i$  – координаты точек контакта вдоль соответствующих векторов.

Используя данные обозначения, можем записать задачу выпуклого программирования, которая позволит определить, существуют ли значения  $\mathbf{n}_i$ ,  $\boldsymbol{\tau}_{i,1}$  и  $\boldsymbol{\tau}_{i,2}$ , удовлетворяющие условиям статического равновесия:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_{i=1}^8 (y_i^2 + x_{i,1}^2 + x_{i,2}^2) \\ & \text{subject to :} \\ & \begin{cases} \sum_{i=1}^8 (y_i \hat{\mathbf{n}}_i + x_{i,1} \hat{\mathbf{t}}_{i,1} + x_{i,2} \hat{\mathbf{t}}_{i,2}) = -\mathbf{f}_G, \\ [\mathbf{r}_{CKi}]_{\times} (y_i \hat{\mathbf{n}}_i + x_{i,1} \hat{\mathbf{t}}_{i,1} + x_{i,2} \hat{\mathbf{t}}_{i,2}) = \mathbf{0}, \\ -y_i < 0, \quad i = \overline{1,8}, \\ \sqrt{x_{i,1}^2 + x_{i,2}^2} - \mu_i y_i < 0, \quad i = \overline{1..8}. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Заметим, что неравенства, фигурирующие в задаче (5), представляют собой ограничение, связанное с конусом трения. Эти условия являются нелинейными, что усложняет решение данной задачи [11]. Существуют ряд работ, предлагающих использовать линейную аппроксимацию конуса трения для линеаризации связанных с ним условий [7, 12]. Такая аппроксимация может быть выбрана достаточно точной и консервативной (гарантировать выполнение исходных ограничений).

В общем виде такая аппроксимация может быть записана следующим образом. Пусть  $\mathbf{v}_{ij}$  – вершины многогранника, аппроксимирующего  $i$ -й конус трения:

$$\mathbf{v}_{ij} = \begin{bmatrix} \mu_i \cos(2\pi j / n) \\ \mu_i \sin(2\pi j / n) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

Тогда составим матрицу  $\mathbf{A}_i$  линейной аппроксимации как  $\mathbf{A}_i = [\mathbf{a}_{i,1} \quad \dots \quad \mathbf{a}_{i,n}]^T$ , где

$$\mathbf{a}_{ij} = -\frac{\mathbf{v}_{ij} \times \mathbf{v}_{ij+1}}{\|\mathbf{v}_{ij} \times \mathbf{v}_{ij+1}\|}. \quad (7)$$

Тогда неравенства в (5) могут быть заменены их аппроксимациями:

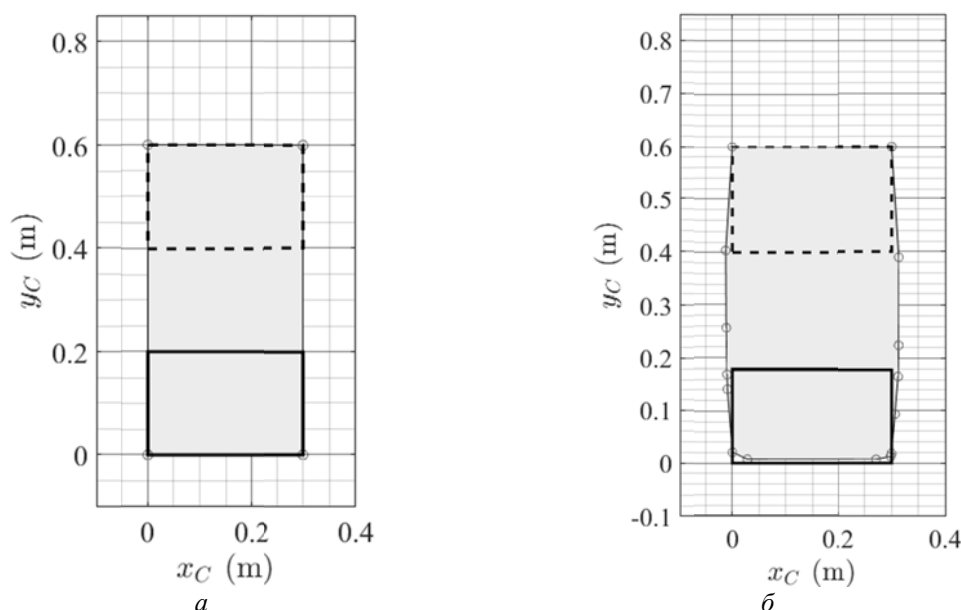
$$\mathbf{A}_i \begin{bmatrix} x_{i,1} \\ x_{i,2} \\ y_i \end{bmatrix} \leq \mathbf{0}, \quad i = \overline{1,8}. \quad (8)$$

В таком случае задача (5) становится квадратичной программой и может быть решена методом внутренней точки [11].

### 3. Результаты численных экспериментов

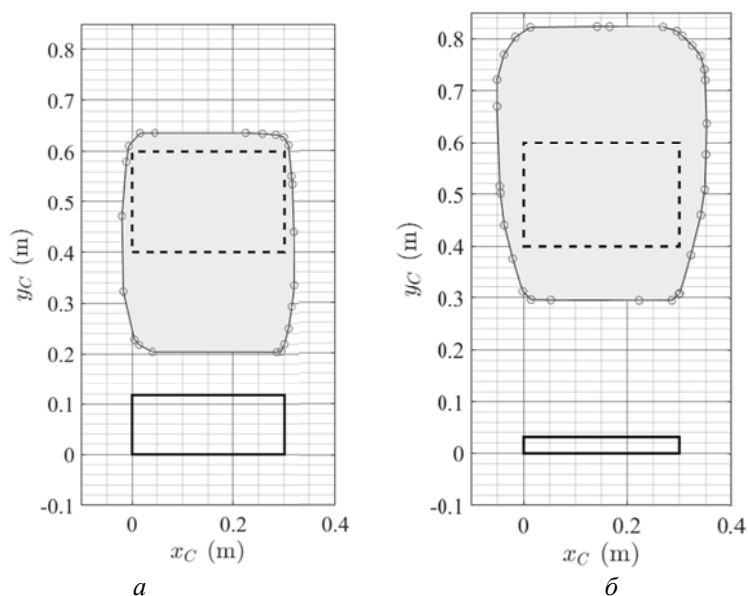
В этом разделе рассмотрим численные эксперименты по определению областей пространства, где может находиться центр масс механизма при различных положениях и ориентациях стоп робота. Будем рассматривать случай, когда стопы робота имеют длину  $h = 0.3$  м, ширину  $l = 0.2$  м и расстояние между стопами равно  $s = 0.4$  м, а коэффициент трения между контактными элементами и опорной поверхностью равен  $\mu_i = 0.5$ . Построим область значений  $\mathbf{r}_C$  – радиус-вектора, определяющего положение центра масс робота, при

которых робот может сохранять вертикальную устойчивость (далее – область устойчивости) для случая горизонтальной опорной поверхности:  $\hat{n}_i = [0 \ 0 \ 1]^T$ .



**Рисунок 2 – Область устойчивости:**

*а – две стопы стоят на горизонтальной опорной поверхности,  
б – правая стопа (показана сплошной линией) повернута на  $0.15\pi$  рад вокруг оси  $x$*



**Рисунок 3 – Область устойчивости, когда правая стопа (показана сплошной линией) повернута на:**

*а –  $0.3\pi$  рад вокруг оси  $x$ , б –  $0.45\pi$  рад вокруг оси  $x$*

Область устойчивости, показанная на рисунке 2,а, совпадает с выпуклой оболочкой точек контакта стоп робота. Этот результат является хорошо известным [3]. Заметим, что область устойчивости является трехмерной, тогда как рисунок 2 ограничивается рассмотрением её проекции на горизонтальную опорную поверхность. Такое представление области устойчивости возможно в связи с тем, что решение задачи (5) не зависит от высоты центра масс, следовательно, форма области устойчивости является инвариантной к этому параметру. Площадь области устойчивости в данном случае составила  $0.18 \text{ м}^2$ .

На рисунке 2,б показана область устойчивости для случая, когда правая стопа (показана сплошной линией) стоит на участке, наклоненном под углом  $\varphi = 0.15\pi$  к

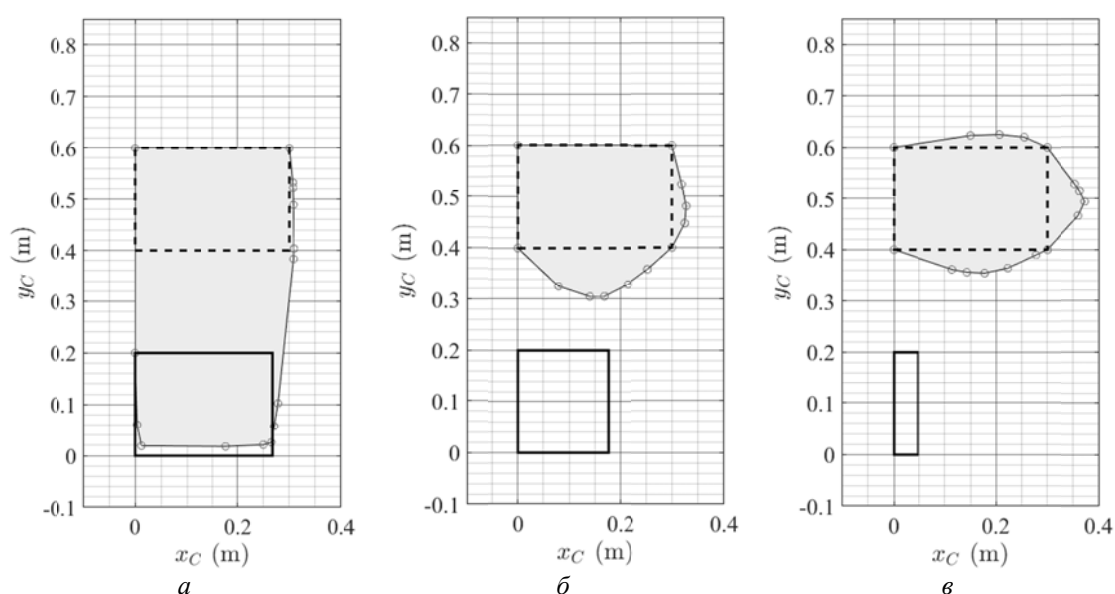
горизонту, причем поворот осуществлен вокруг оси  $x$ . Можем заметить, что форма области устойчивости изменилась, хотя эти изменения остались незначительными. Площадь области устойчивости составила  $0.187 \text{ м}^2$  для данного эксперимента.

Рассмотрим случаи, когда та же стопа покоится на поверхности, повернутой на больший угол (рисунок 3).

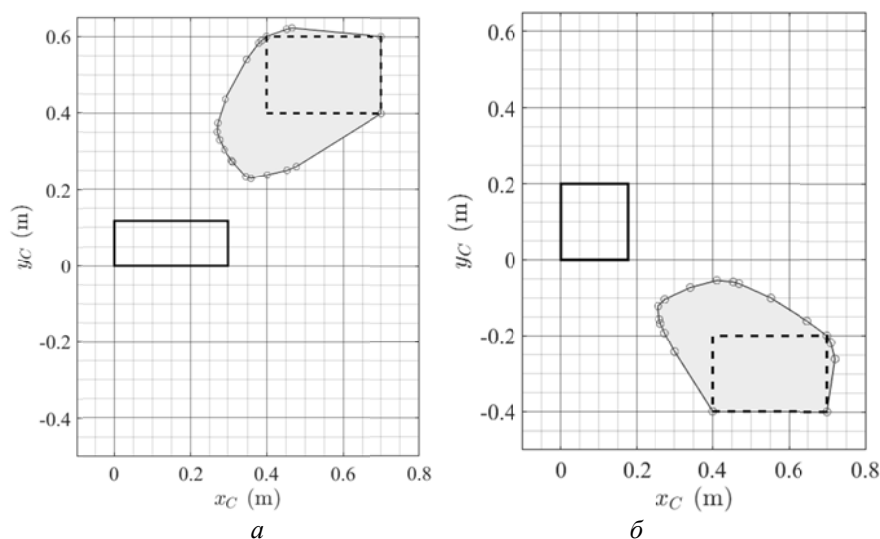
Рисунки 3,а,б показывают, что при увеличении угла поворота область устойчивости смещается влево – в сторону стопы, покоящейся на горизонтальном участке опорной поверхности. Площадь области устойчивости составила  $0.14 \text{ м}^2$  и  $0.196 \text{ м}^2$  для этих экспериментов соответственно.

Заметим, что размер стопы, стоящей на наклонной поверхности, отличается от размера стопы, стоящей на горизонтальной поверхности. Это связано с тем, что на рисунках 2 и 3 показаны проекции на горизонтальную плоскость.

Рассмотрим, как будут выглядеть области устойчивости в случае, когда правая стопа покоится на участке опорной поверхности, повернутой вокруг оси  $y$  (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Область устойчивости, когда правая стопа (показана сплошной линией) повернута на:**  
 $a - 0.15\pi$  рад вокруг оси  $y$ ,  $б - 0.3\pi$  рад вокруг оси  $y$ ,  $в - 0.45\pi$  рад вокруг оси  $y$

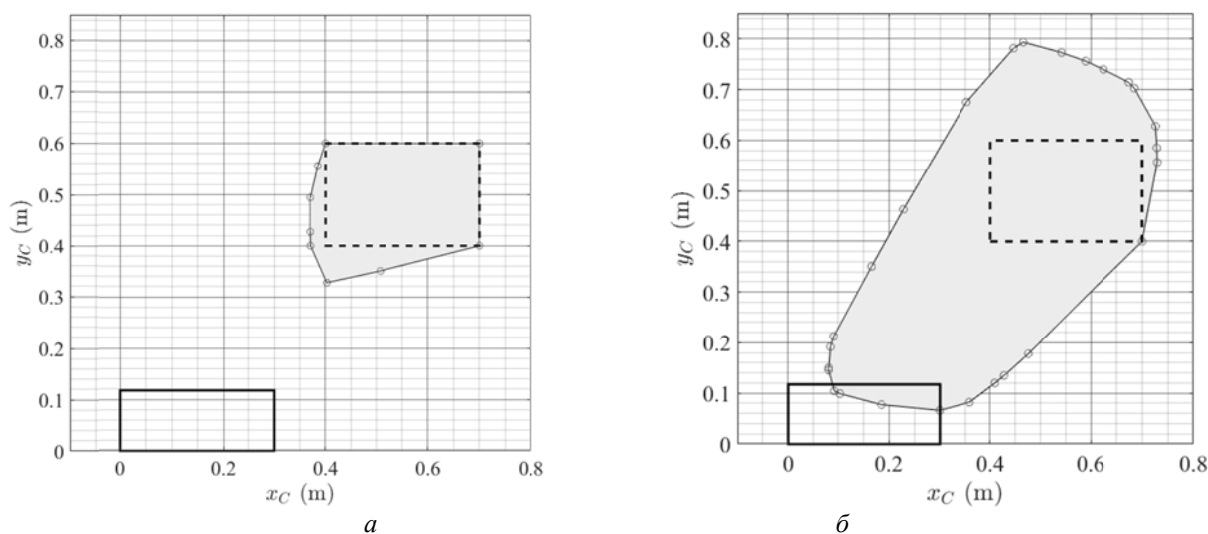


**Рисунок 5 – Область устойчивости:**  
 $a -$  правая стопа повернута на  $0.3\pi$  рад вокруг оси  $x$ ,  $б -$  левая стопа повернута на  $0.3\pi$  рад вокруг оси  $y$

Рисунок 4 показывает, что при повороте стопы вокруг оси  $y$  область устойчивости смещается в сторону стопы, покоящейся на горизонтальном участке, при этом площадь этой области снижается. При повороте на  $0.15\pi$  площадь области устойчивости составила  $0.17 \text{ м}^2$ , при повороте на  $0.3\pi$  –  $0.081 \text{ м}^2$ , а при повороте на  $0.45\pi$  –  $0.08 \text{ м}^2$ .

Можем показать, что этот эффект (уменьшение площади области устойчивости и её «концентрация» вокруг стопы, покоящейся на горизонтальном участке опорной поверхности) сохраняется и при других вариантах взаимного расположения стоп. На рисунке 5 показаны опыты для случая, когда одна из ног смещена вперед. Все представленные эксперименты были проведены для случая, когда  $\mu_i = 0.5$ .

Рассмотрим, как значение этого коэффициента влияет на получаемые результаты. На рисунке 6 показаны области устойчивости для случая, когда правая стопа повернута на  $0.3\pi$  рад вокруг оси  $x$ .



**Рисунок 6 – Область устойчивости, правая стопа повернута на  $0.3\pi$  рад вокруг оси  $x$ :**

$a - \mu_i = 0.25$ ,  $b - \mu_i = 1$

Как можно заметить, увеличение коэффициента трения приводит к увеличению области устойчивости, в некотором смысле компенсируя описанный ранее эффект от повышения угла наклона поверхности, на которой покоится одна из стоп. Для случая, когда  $\mu_i = 0.25$ , площадь области устойчивости составила  $0.076 \text{ м}^2$ , а при  $\mu_i = 1$  –  $0.281 \text{ м}^2$ .

### Заключение

Приведенные в этой работе результаты указывают на наличие зависимости между геометрией опорной поверхности и формой области устойчивости – области пространства, в которой может находиться центр масс робота так, чтобы тот мог сохранять вертикальную устойчивость. Также было продемонстрировано влияние коэффициента трения на форму области устойчивости. Эти результаты указывают на важность решения задачи аналитического описания зависимости формы и расположения области устойчивости от перечисленных выше факторов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18–38–00140\18.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Caron, S. Stability of surface contacts for humanoid robots: closed-form formulae of the contact wrench cone for rectangular support areas / S. Caron, Q.C. Pham, Y. Nakamura // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA. – 2015. – P. 5107–5112.

2. Hirukawa, H. A universal stability criterion of the foot contact of legged robots—adios ZMP / H. Hirukawa, S. Hattori, K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Fujiwara, M. Morisawa // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Orlando, FL, USA. – 2006. – P. 1976–1983.
3. Vukobratović, M. 2004. Zero-moment point—thirty five years of its life / M. Vukobratović, B. Borovac // Intern. J. of humanoid robotics. – 2004. – Vol. 1(01). – P.157–173.
4. Kajita, S. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point / S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Taipei, Taiwan, Taiwan. – 2003. –Vol. 2. – P. 1620–1626.
5. Jatsun, S. Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics (ICR). Springer, Cham. – 2017. – P. 75–82.
6. Jatsun, S. Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. 20th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR). Porto, Portugal. – 2017. – P. 13–20.
7. Kuindersma, S. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, R. Tedrake // Autonomous Robots. – 2016. – Vol. 40(3). – P. 429–455.
8. Jatsun, S. Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. Intern. Workshop on Medical and Service Robots. Springer, Cham. – 2016. – P. 305–317.
9. Яцун, С.Ф. Кинематический анализ экзоскелета в процессе подъема груза / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, Г.В. Климов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2015. – № 3. – С. 24–30.
10. Пановко, Г.Я. Моделирование процесса вставания экзоскелета из положения сидя / Г.Я. Пановко, С.И. Савин, С.Ф. Яцун, А.С. Яцун // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 3. – С. 19–24.
11. Grant, M. CVX: Matlab software for disciplined convex programming [Text] / M. Grant, S. Boyd, Y. Ye // 2008. <http://stanford.edu/~boyd/cvx>.
12. Kuindersma, S. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion / S. Kuindersma, F. Permenter, R. Tedrake // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China. – 2014. – P. 2589–2594.

**Савин Сергей Игоревич**

ФГБОУ ВО Юго-Западный  
государственный университет, г. Курск  
кандидат технических наук  
старший научный сотрудник кафедры  
механики, мехатроники и робототехники  
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218  
тел. +7(4712)222626  
e-mail: savinswsu@mail.ru

**Ворочаева Людмила Юрьевна**

ФГБОУ ВО Юго-Западный  
государственный университет, г. Курск  
кандидат технических наук  
доцент кафедры  
механики, мехатроники и робототехники  
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218  
тел. +7(4712)222626  
e-mail: mila180888@yandex.ru

S.I. SAVIN, L.Yu. VOROCHAEVA

## DEFINITION OF ALLOWABLE PROVISIONS CENTER MASS STOCKING ROBOTS, MOVING AT THE CROSSED COUNTRY

**Abstract.** *In the paper, an approach to generating stability regions (regions of space where the center of mass of the robot can be located while the robot remains vertically balanced) is presented for a bipedal walking robot. The case when the robot is standing on a piece-wise linear surface with its feet having different orientations is considered. A contact model is presented, assuming that the robot contacts the supporting surface in eight points at the edges of its two feet. The condition for the vertical balance are presented and a numerical method for checking this condition is shown. The method is based on solving a convex program. The simulation results demonstrated dependence between the orientation of the robot's feet and the shape of the stability region. The influence the friction coefficient has on the shape of this region is discussed.*

**Keywords:** *bipedal walking robot, supporting surface, stability regions, convex programming, vertical balance, friction cone.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Caron, S. Stability of surface contacts for humanoid robots: closed-form formulae of the contact wrench cone for rectangular support areas / S. Caron, Q.C. Pham, Y. Nakamura // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA. – 2015. – P. 5107–5112.
2. Hirukawa, H. A universal stability criterion of the foot contact of legged robots—adios ZMP / H. Hirukawa, S. Hattori, K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Fujiwara, M. Morisawa // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Orlando, FL, USA. – 2006. – P. 1976–1983.
3. Vukobratović, M. 2004. Zero-moment point—thirty five years of its life / M. Vukobratović, B. Borovac // Intern. J. of humanoid robotics. – 2004. – Vol. 1(01). – P.157–173.
4. Kajita, S. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point / S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Taipei, Taiwan, Taiwan. – 2003. – Vol. 2. – P. 1620–1626.
5. Jatsun, S. Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics (ICR). Springer, Cham. – 2017. – P. 75–82.
6. Jatsun, S. Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. 20th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR). Porto, Portugal. – 2017. – P. 13–20.
7. Kuindersma, S. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, R. Tedrake // Autonomous Robots. – 2016. – Vol. 40(3). – P. 429–455.
8. Jatsun, S. Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun // Proc. Intern. Workshop on Medical and Service Robots. Springer, Cham. – 2016. – P. 305–317.
9. Jatsun, S.F. Kinematičeskij analiz ehkzoskeleta v processe pod"ema gruzha / S.F. Jatsun, S.I. Savin, A.S. Yatsun, G.V. Klimov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tehnologii. – 2015. – Vol. 3. – P. 24–30.
10. Panovko, G.Ya. Modelirovanie processa vstavaniya ehkzoskeleta iz polozheniya sidya / G.Ya. Panovko, S.I. Savin, S.F. Jatsun, A.S. Yatsun // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2016. – Vol. 3. – P. 19–24.
11. Grant, M. CVX: Matlab software for disciplined convex programming [Text] / M. Grant, S. Boyd, Y. Ye // 2008. <http://stanford.edu/~boyd/cvx>.
12. Kuindersma, S. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion / S. Kuindersma, F. Permenter, R. Tedrake // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China. – 2014. – P. 2589–2594.

### Savin Sergei Igorevich

Southwest state university, Kursk  
candidate of science,  
senior researcher at the department  
of Mechanics, Mechatronics and Robotics  
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218  
tel. +7(4712)222626  
e-mail: savinswsu@mail.ru

### Vorocheva Lyudmila Yurievna

Southwest state university, Kursk  
candidate of science,  
docent at the department  
of Mechanics, Mechatronics and Robotics  
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218  
tel. +7(4712)222626  
e-mail: mila180888@yandex.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНОК В ВИДЕ РОМБА И РАВНОБЕДРЕННОГО ТРЕУГОЛЬНИКА

**Аннотация.** В статье приводятся результаты экспериментального определения основной частоты колебаний упругих пластинок в виде равнобедренных треугольников и ромбов с шарнирным опиранием по контуру. При проведении экспериментов использована известная установка, функциональная схема которой включает приборы и оборудование, применяемые при испытании строительных конструкций. Испытывались два комплекта пластинок–моделей: шесть моделей в виде равнобедренных треугольников и три модели в виде ромбов. Проводилась статистическая обработка результатов измерений. По окончательным результатам были построены две аппроксимирующие функции «основная частота колебаний – угол при вершине равнобедренного треугольника» и «основная частота колебаний – острый угол ромба». Эти аппроксимирующие кривые могут использоваться в дальнейшем для теоретического расчета параллелограммных пластинок методом интерполяции по коэффициенту формы.

**Ключевые слова:** упругие пластинки в виде равнобедренных треугольников и ромбов, шарнирное опирание по контуру, основная частота колебаний, экспериментальные исследования.

### Введение

Экспериментальные методы контроля физико–механических и геометрических параметров отдельных элементов строительных конструкций, зданий и сооружений, машин и аппаратов широко используются в строительстве и машиностроении [1...4]. В последние два десятилетия творческим коллективом кафедры «строительные конструкции и материалы» ОрелГТУ была выявлена фундаментальная закономерность о функциональной взаимосвязи максимального прогиба балок и пластинок в нагруженном состоянии с их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии [5]. Зная эти функциональные связи можно по основной частоте колебаний определить максимальный прогиб этих конструкций и оценить ряд других физических характеристик, не прибегая к процедуре их нагружения. Примеры использования этой закономерности были рассмотрены в работах [6, ..., 8].

Для контроля жесткости и основной частоты колебаний элементов конструкций в виде упругих пластинок этим же творческим коллективом разработан метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ). Геометрической основой этого инженерного метода является интегральная геометрическая характеристика формы области (пластинки) – коэффициент формы, которая представляется контурным интегралом

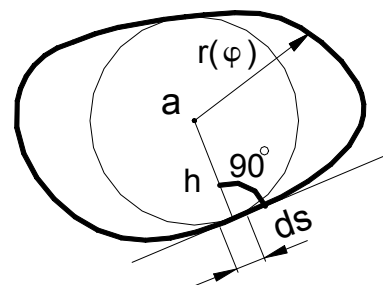


Рисунок 1 – Форма области

$$K_{fa} = \oint_L \frac{ds}{h}, \quad (1)$$

где  $ds$  – линейный элемент контура области;

$h$  – перпендикуляр, опущенный из произвольной точки «а», взятой внутри области, на касательную, проведенную к переменной её точке (рисунок 1).

Эта характеристика названа коэффициентом формы. Её изопериметрические свойства и закономерности поведения при различных геометрических преобразованиях подробно исследованы в монографии [9].

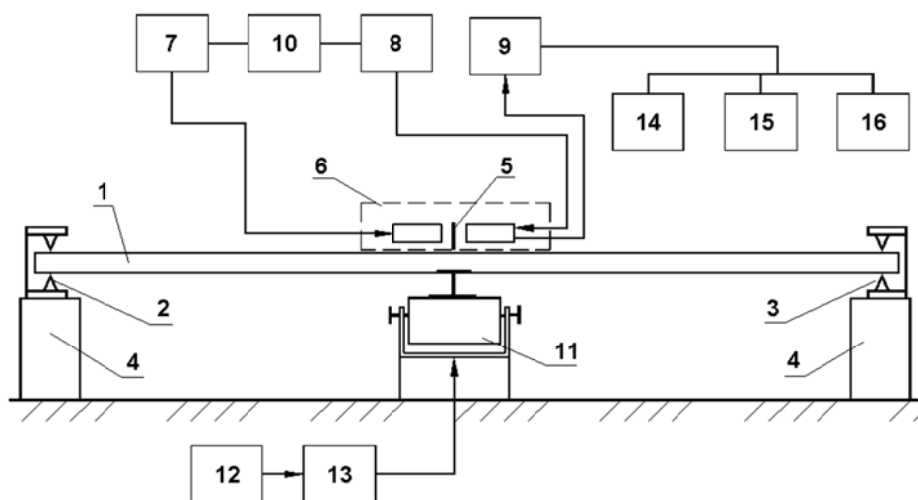
Для использования МИКФ при решении задач определения жесткости и основной частоты колебаний пластинок четырехугольной формы необходимо провести построение так называемых граничных аппроксимирующих функций: одну из границ образуют решения для прямоугольных пластинок с однородными граничными условиями, а другую – решения для

пластинок в виде правильных многоугольников и равнобедренных треугольников. Для более точного расчета параллелограммных пластинок вместо границы, образованной треугольными пластинками следует использовать границу, соответствующую решениям для ромбических пластинок. Указанные границы можно получить либо аналитически, например, с помощью метода конечных элементов, либо экспериментально. В настоящей статье аппроксимирующие функции, соответствующие решениям для пластинок в виде равнобедренных треугольников и ромбов строятся экспериментально.

### 1 Приборы и оборудование для динамических испытаний моделей пластинок и методика их проведения

При проведении динамических испытаний моделей треугольных и ромбических пластинок использовался набор оборудования, приборов и средств измерений применяемый для динамических испытаний строительных конструкций. Схема закрепления пластинок и подключения приборов показана на рисунке 2.

Для измерения виброперемещений моделей использовалась конструкция первичных преобразователей на основе диодных оптопар с открытым оптическим каналом инфракрасного диапазона и с одним подвижным модулирующим элементом на просвечиваемой фотооснове в виде линейного оптического клина, которая разработана и подробно исследована в докторской диссертации Г.В. Слюсаревым [10].



**Рисунок 2 – Функциональная схема испытания моделей-пластинок:**

1 – испытуемая модель, 2, 3 – шарнирно неподвижные опоры, 4 – массивные основания для закрепления опорных частей установки, 5 – модулирующий элемент, 6 – первичный преобразователь виброперемещений в электрический сигнал, 7 – устройство тока накачки излучателя, 8 – источник обратного напряжения фотоприемника, 9 – согласующий усилитель, 10 – устройство синхронизации импульсного тока накачки и обратного напряжения фотоприемника, 11 – электродинамический возбудитель колебаний, 12 – генератор синусоидальных сигналов, 13 – усилитель мощности, 14 – частотомер, 15 – цифровой вольтамперметр, 16 – электронный осциллограф

Модулирующий элемент 5 закрепляется на верхней поверхности модели. На штативе (на рисунке не показан) крепится подвижный оптоэлектронный преобразователь виброперемещений 6, работу которого обеспечивают вспомогательные устройство тока накачки излучателя 7 и источник обратного напряжения фотоприемника 8. Электрический сигнал с фотоприемника через согласующий усилитель 9 поступает на регистрирующие приборы 14, 15, 16. Синхронизация импульсного тока накачки излучателя и обратного напряжения, поступающего на фотоприемник, осуществляется специальным устройством 10.

Закрепление модулирующего элемента измерительного преобразователя производят с помощью клея на средней части модели, после чего осуществляют юстировку элементов оптопары. Подключают излучатель и фотоприемник к вспомогательным устройствам и, после подачи на них питания, добиваются появления необходимого коэффициента передачи по току путем изменения начальной базы установки элементов оптопары и более

тщательного юстирования их оптических осей. Контроль величины коэффициента передачи ведут на постоянном токе с помощью цифрового вольтамперметра, например типа В7–27А.

Далее производится подключение фотоприемника к согласующему усилителю, а последнего к устройствам регистрации: электронному осциллографу 16, цифровому вольтамперметру 15 и частотомеру 14.

Для реализации схемы шарнирного опирания края пластинок использованы два уголка  $45 \times 45 \times 6$ , расположенные сверху и снизу модели и направленные соосно вдоль ее края обушками навстречу друг другу. Обушки уголков отстоят от края модели на  $1 \dots 2$  мм. После тщательной выверки положения уголков их закрепляют стробцинами с незначительным прижимом с таким расчетом, чтобы при проведении вибрационных испытаний края модели плотно прилегали к опорам и не отрывались от них.

Возбуждение вынужденных колебаний в пластинке–модели осуществляется бесконтактным способом с помощью электродинамического возбудителя колебаний 11 (типа 11075 Robotron). Формирование сигнала возбуждения с заданной частотой и его последующее усиление до требуемого уровня производится соответственно с помощью генератора синусоидальных сигналов 12 и усилителя мощности 13. Плавное изменение частоты колебаний генератора 12, снимают амплитудно–частотную характеристику пластинки–модели в околорезонансной области, по которой затем определяют значение ее резонансной частоты колебаний. Измерение частоты колебаний осуществляют частотомером 14, а регистрацию амплитуды сигнала, поступающего с первичного преобразователя 6, – цифровым вольтамперметром 15 и электронным осциллографом 16, который, кроме того, используется для визуального наблюдения формы механических колебаний модели.

При необходимости по измеренной амплитудно–частотной характеристике модели–пластинки может быть дополнительно подсчитан декремент колебаний, по величине которого можно судить о потерях энергии колебаний.

Для проведения динамических испытаний были изготовлены две партии моделей–пластинок одинаковой площади  $A$  из листового дюралюминия толщиной  $H = 2$  мм, в том числе:

- шесть пластинок в виде равнобедренных треугольников:  
образец № 1 ( $\beta = 90^\circ$ ,  $a \times h = 63,26 \times 31,63$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 2 ( $\beta = 120^\circ$ ,  $a \times h = 83,24 \times 24,03$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 3 ( $\beta = 150^\circ$ ,  $a \times h = 122,16 \times 16,38$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 4 ( $\beta = 45^\circ$ ,  $a \times h = 40,70 \times 49,14$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 5 ( $\beta = 30^\circ$ ,  $a \times h = 32,74 \times 61,09$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 6 ( $\beta = 20^\circ$ ,  $a \times h = 26,56 \times 75,31$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),

где  $\beta$  – угол при вершине равнобедренного треугольника;

- три ромбовидных пластинки:

- образец № 1 ( $\alpha = 60^\circ$ , длина стороны  $a = 34,00$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 2 ( $\alpha = 45^\circ$ , длина стороны  $a = 37,61$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),  
образец № 3 ( $\alpha = 30^\circ$ , длина стороны  $a = 44,72$  см,  $A = 0,1$  м<sup>2</sup>),

где  $\alpha$  – острый угол ромба.

Материал моделей в соответствии с прилагаемым сертификатом на листовом дюралюминиевый прокат имел следующие физико–механические характеристики: плотность  $\rho = 2,71$  кг/дм<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 0,71 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,34$ . С учетом этих характеристик были определены необходимые для дальнейшего расчета физические параметры моделей: масса единицы площади  $m = 0,0542$  кг/дм<sup>2</sup>, цилиндрическая жесткость  $D = EH^3/[12(1-\nu^2)] = 53,52$  Нм.

## 2 Результаты измерений резонансной частоты колебаний пластинок–моделей и их статистическая обработка.

При планировании эксперимента для определения достоверности результатов измерений использовались методы математической статистики. Детальному статистическому исследованию подвергались результаты измерений резонансной частоты колебаний для всех пластинок–моделей каждой партии.

Испытания проводились путем многократного замера резонансной частоты

колебаний при различных скоростях вывода моделей на резонанс, при изменении положения вибровозбудителя в окрестности средней части моделей, а также с использованием обычного механического удара для возбуждения колебаний на собственной частоте.

Для статистического анализа результатов многократных измерений резонансных частот колебаний пластинок–моделей приняты следующие данные: количество измерений  $n = 25$ , доверительная вероятность  $p_d = 0,95$  [11]. Результаты проведенных испытаний после их статистической обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты обработки данных вибрационных испытаний

Параметры пластинок	$\bar{x}$ , Гц	$D$	$\sigma$	$\sigma_0$	$\mu$	$x_0$ , Гц	%
<i>Пластинки–модели в виде правильных треугольников</i>							
модель №1 ( $\beta = 90^\circ$ )	123,73	0,3920	0,6261	0,1252	0,2586	123,73±0,26	0,21
модель №2 ( $\beta = 120^\circ$ )	157,64	0,3398	0,5830	0,1166	0,2408	157,64±0,24	0,15
модель №3 ( $\beta = 150^\circ$ )	278,12	0,6685	0,8176	0,1635	0,3377	278,12±0,34	0,12
модель №4 ( $\beta = 45^\circ$ )	118,43	0,3942	0,6278	0,1256	0,2593	118,43±0,26	0,22
модель №5 ( $\beta = 30^\circ$ )	127,68	0,3467	0,5888	0,1178	0,2432	127,68±0,24	0,19
модель №6 ( $\beta = 20^\circ$ )	136,63	0,2666	0,5163	0,1033	0,2132	136,63±0,21	0,16
<i>Пластинки–модели в виде ромбов</i>							
модель №1 ( $\alpha = 60^\circ$ )	108,58	0,3617	0,6014	0,1203	0,2484	108,58±0,25	0,23
модель №2 ( $\alpha = 45^\circ$ )	125,63	0,5240	0,7239	0,1448	0,2990	125,63±0,30	0,24
модель №3 ( $\alpha = 30^\circ$ )	169,94	0,3630	0,6025	0,1205	0,2488	169,94±0,25	0,15

Анализ приведенных в таблице 1 данных показывает, что повышение точности измерений за счет снижения систематических ошибок можно достигнуть только путем совершенствования измерительной аппаратуры. Увеличение же числа измерений не приводит к заметному улучшению их результатов.

### 3 Построение граничных аппроксимирующих функций $\omega - \alpha$ для пластинок в виде равнобедренного треугольника.

Сведем экспериментальные данные, полученные при проведении вибрационных испытаний пластинок–моделей, в таблицу 2, где также приводится и известное точное решение для пластинки в виде равностороннего треугольника [12].

Таблица 2 – Исходные данные для построения аппроксимирующих кривых  $\omega - \alpha$  для пластинок в виде равнобедренного треугольника

№ модели	$\alpha^\circ$	f, Гц	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$\beta = \frac{\omega}{\sqrt{D/m}/A}$	1/β
Правильный треугольник	60	113,98*	716,15	22,79	4,388·10 <sup>-2</sup>
Модель № 1	45	123,73	777,42	24,74	4,042·10 <sup>-2</sup>
Модель № 2	30	157,64	990,48	31,52	3,173·10 <sup>-2</sup>
Модель № 3	15	278,12	1747,48	55,61	1,798·10 <sup>-2</sup>
Модель № 4	67,5	118,43	744,12	23,68	4,230·10 <sup>-2</sup>
Модель № 5	75	127,68	802,25	25,53	3,917·10 <sup>-2</sup>
Модель № 6	80	136,63	858,50	27,32	3,660·10 <sup>-2</sup>

**Примечание** – \* Результаты в колонке 4 получены путем перевода размерности  $\sqrt{D/m}/A$  к размерности Гц.

Используя результаты испытаний, приведенные в этой таблице, а также известное

точное решение для пластинки в виде равностороннего треугольника, построена аппроксимирующая функция (2) для пластинок в виде равнобедренных треугольников

При выборе аппроксимирующей функции были учтены следующие к ней требования: кривая  $\omega - \alpha$  должна быть непрерывной, монотонной, иметь один экстремум при  $\alpha = \pi/3$  ( $\alpha$  – угол при основании равнобедренного треугольника).

$$\omega = (a + b\alpha + c\alpha^2 + d/\alpha + e/\alpha^2) \sqrt{D/m/A}, \quad (2)$$

где  $a = 80,994$ ,  $b = -84,193$ ,  $c = 37,327$ ,  $d = -14,803$ ,  $e = 3,471$ , а значения параметра  $\alpha$  подставляются в радианах.

Таблица 3 – Сопоставление экспериментальных данных с результатами, подсчитанными по формуле (1)

№ модели	Экспериментальные данные	Расчеты по формуле (2)	Разница, %
Правильный треугольник	22,79	22,79	0
Модель № 1	24,74	24,67	0,28
Модель № 2	31,52	31,53	0,03
Модель № 3	55,61	55,61	0
Модель № 4	23,68	23,55	0,55
Модель № 5	25,53	25,46	0,27
Модель № 6	27,32	27,39	0,01

График функции в координатных осях  $1/\omega - \alpha$  представлен на рисунке 3. На этом графике т. 2 соответствует пластинке в виде правильного треугольника, т. 1 – пластинке в виде прямоугольного равнобедренного треугольника, участок кривой 0–1 – пластинкам в виде тупоугольных равнобедренных треугольников, участок кривой 1–2–3 – пластинкам в виде остроугольных равнобедренных треугольников.

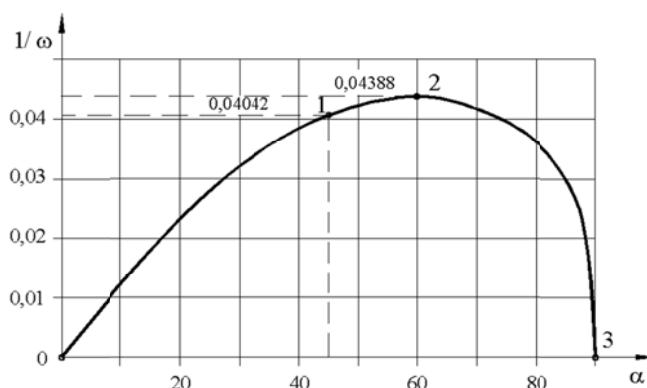


Рисунок 3– График функции  $1/\omega - \alpha$

#### 4. Построение граничных аппроксимирующих функций $\omega - K_f$ для пластинок в виде ромбов

Сведем экспериментальные данные, полученные при проведении вибрационных испытаний пластинок–моделей в виде ромба, в таблицу 4, где также приводится и известное точное решение для квадратной пластинки [12].

Таблица 4 – Исходные данные для построения аппроксимирующей кривой  $\omega - K_f$  для ромбических пластинок

№ модели	$\alpha^\circ$	$K_f$	$f$ , Гц	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$\beta = \frac{\omega}{\sqrt{D/m/A}}$	$1/\beta$
Квадрат	90	8,000	98,72*	620,28	$2\pi^2$	$5,066 \cdot 10^{-2}$
Модель № 1	60	9,238	108,58	682,21	21,71	$4,606 \cdot 10^{-2}$
Модель № 2	45	11,314	125,63	789,37	25,12	$8,333 \cdot 10^{-2}$
Модель № 3	30	16,000	169,94	1042,64	33,18	$3,014 \cdot 10^{-2}$
Примечание – * Результаты в колонке 5 получены путем перевода размерности $\sqrt{D/m/A}$ в Гц.						

Используя результаты испытаний моделей, приведенные в таблице 4, а также известное точное решение для квадратной пластинки, построена аппроксимирующая функция для ромбических шарнирно опертых пластинок:

$$\omega = (12,481 + 2,226K_f - 3,730K_f^{0,5})\sqrt{D/m}/A, \quad (3)$$

которая с хорошей точностью описывает экспериментальные данные. При построении этой кривой соблюдалось требование только ее непрерывности и монотонности изменения в указанных границах изменения параметра.

Для расчета четырехугольных пластинок с помощью МИКФ совместно с зависимостями (2) и (3) следует использовать также зависимость

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{\pi^2}{4} \frac{K_f}{A} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (4)$$

справедливую для пластинок в виде прямоугольника с шарнирным опиранием по контуру [9]. Примеры практического использования зависимостей (2) ... (4) приведены в диссертации [13].

### Заключение

1. Проведены испытания шарнирно опертых по контуру моделей–пластинок в виде равнобедренных треугольников и ромбов с использованием первичных преобразователей виброперемещений на основе диодных оптопар с открытым оптическим каналом инфракрасного диапазона и с одним подвижным модулирующим элементом на просвечиваемой фотооснове в виде линейного оптического клина.

2. После статистической обработки результатов измерений построены граничные аппроксимирующие функции  $\omega - \alpha$ , позволяющие использовать метод интерполяции по коэффициенту формы для определения основной частоты колебаний пластинок в виде параллелограммов и трапеций с шарнирным опиранием по контуру.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Н.И. Пригоровский. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1983. – 248 с.
2. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии [Текст / М.Л. Дайчик, Н.И., Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1989. – 240 с.
3. Шаповалов, Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций / Л.А. Шаповалов. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1990. – 288. с.
4. Славин, О.К. Методы фотомеханики в машиностроении / О.К. Славин, В.Ф. Трумбачев, Н.Д. Тарабасов. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1983. – 270 с.
5. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии / В.И. Коробко, А.В. Коробко. М.: Изд-во АСВ, 2003. – 288 с.
6. Коробко, В.И. Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и вибрационные воздействия. / Р.В. Алдушкин, В.И. Коробко, О.В. Калашникова // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009, №2. – С. 39–43.
7. Подмастерьев, К.В. Вибрационный метод оценки жесткости горизонтального шва составных балок / К.В. Подмастерьев, О.В. Калашникова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2. – С. 147–150.
8. Коробко, В.И. Определение жесткости изгибаемых элементов конструкций в виде пластинок с помощью вибрационного / В.И. Коробко, Н.Г. Калашникова, С.Н. Савельев // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 11. – С. 49–53.
9. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости / А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 302 с.
10. Слюсарев, Г.В. Развитие и применение неразрушающих методов и средств вибрационного контроля качества предварительно напряженных железобетонных конструкций: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.17 / Г.В. Слюсарев – Ставрополь, 2003. – 370 с.
11. Коробко, В.И. Лекции по курсу основы научных исследований (для студентов строительных специальностей) / В.И. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 218 с.
12. Справочник по теории упругости (для инженеров строителей) под редакцией Варвака П.М. и Рябова А.С. – Киев: «Будівельник», 1971. – 418 с.
13. Калашникова Н.Г. Физическое и геометрическое моделирование пластинок сложного вида при осуществлении контроля интегральных физических характеристик строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Н.Г. Калашникова – Орел, 2005. – 135 с.

**Коробко Виктор Иванович**  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: vikor10@mail.ru

**Калашникова Наталья Григорьевна**  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: vikor10@mail.ru

V.I. KOROBKO, N.G. KALASHNIKOVA

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE BASIC FREQUENCY OF VIBRATIONS PLATES IN THE TYPE OF THE ROMBE AND THE EQUAL-FREE TRIANGLE

**Abstract.** *The results of the experimental determination of the fundamental vibration frequency of elastic plates in the form of isosceles triangles and rhombi with hinged support along the contour are presented in the article. During the experiments, a known plant is used, the functional scheme of which includes instruments and equipment used in the testing of building structures. Two sets of plate-models were tested: six models in the form of isosceles triangles and three models in the form of rhombuses. Statistical processing of the measurement results was carried out. On the final results, two approximating functions were constructed: "fundamental frequency of oscillations – angle at the apex of an isosceles triangle" and "fundamental frequency of oscillations – acute angle of a rhombus". These approximating curves can be used later for the theoretical calculation of parallelogram plates by the method of interpolation by the shape factor.*

**Keywords:** *elastic plates in the form of isosceles triangles and rhombuses, hinged support along the contour, fundamental vibration frequency, experimental studies.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Prigorovskiy, N.I. Metody i sredstva opredeleniya poley deformatsiy i napryazheniy / N.I. Prigorovskiy. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 1983. – 248 s.
2. Daychik, M.L. Metody i sredstva naturnov tenzometrii [Tekst / M.L. Daychik, N.I. Prigorovskiy, G.KH. Khurshudov. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 1989. – 240 s.
3. Shapovalov, L.A. Modelirovaniye v zadachakh mekhaniki elementov konstruktsiy / L.A. Shapovalov. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 1990. – 288. s.
4. Slavin, O.K. Metody fotomekhaniki v mashinostroyenii / O.K. Slavin, V.F. Trumbachev, N.D. Tarabasov. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 1983. – 270 s.
5. Korobko, V.I. Kontrol kachestva stroitelnykh konstruktsiy: Vibroakusticheskiye tekhnologii / V.I. Korobko, A.V. Korobko. M.: Izd-vo ASV, 2003. – 288 s.
6. Korobko, V.I. Eksperimentalnyye issledovaniya stalnykh ferm s parallelnymi povyasami na staticheskoye i vibratsionnyye vozdeystviya. / R.V. Aldushkin, V.I. Korobko, O.V. Kalashnikova // Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii». – 2009, №2. – S. 39–43.
7. Podmaster'ev, K.V. Vibratsionnyy metod otsenki zhestkosti gorizontalnogo shva sostavnykh balok / K.V. Podmaster'ev, O.V. Kalashnikova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 2. – S. 147–150.
8. Korobko, V.I. Opredeleniye zhestkosti izgibayemykh elementov konstruktsiy v vide plastinok s pomoshchyu vibratsionnogo / V.I. Korobko, N.G. Kalashnikova, S.N. Savelyev // Kontrol. Diagnostika. – 2002. – № 11. – S. 49–53.
9. Korobko, A.V. Geometricheskoye modelirovaniye formoy oblasti v dvumernykh zadachakh teorii uprugosti / A.V. Korobko. – M.: Izd-vo ASV, 1999. – 302 s.
10. Slyusarev, G.V. Razvitiye i primeneniye nerazrushayushchikh metodov i sredstv vibratsionnogo kontrolya kachestva predvaritelno napryazhennykh zhelezobetonnykh konstruktsiy: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.23.17 / G.V. Slyusarev – Stavropol, 2003. – 370 s.
11. Korobko, V.I. Lektsii po kursu osnovy nauchnykh issledovaniy (dlya studentov stroitelnykh spetsialnostey) / V.I. Korobko. – M.: Izd-vo ASV, 2000. – 218 s.
12. Spravochnik po teorii uprugosti (dlya inzhenerov stroiteley) pod redaktsiyey Varvaka P.M. i Ryabova A.S. – Kiyev: «Budivelnik», 1971. – 418 s.
13. Kalashnikova N.G. Fizicheskoye i geometricheskoye modelirovaniye plastinok slozhnogo vida pri osushchestvlenii kontrolya integralnykh fizicheskikh kharakteristik stroitelnykh konstruktsiy: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13 / N.G. Kalashnikova – Orel, 2005. – 135 s.

**Korobko Victor Ivanovich**  
Orel State university, Orel  
Doctor of technical sciences, professor of the department  
«Building designs and materials»  
Ph.: +7 (4862) 43-58-94  
E-mail: vikor10@mail.ru

**Kalashnikova Natalya Grigoryevna**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences, associate professor of the department mechatronics, mechanics and robotics  
Ph.: +7 (4832) 64-59-15  
E-mail: vikor10@mail.ru

# МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 539.3

Д.В. ЛЕОНЕНКО

## КОЛЕБАНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В УПРУГОЙ СРЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

**Аннотация.** Рассмотрены колебания трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде под действием внезапных и импульсных нагрузок. Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа–Лява. В толстом заполнителе учитывается работа поперечного сдвига и обжатие по толщине. Изменение перемещений принято линейным по поперечной координате. Упругая среда описывается моделью Винклера. Уравнения движения выведены энергетическими методами. Получен ряд аналитических решений и проведен их численный анализ.

**Ключевые слова:** цилиндрическая оболочка, осесимметричные колебания, импульсные нагрузки, ударные нагрузки, упругая среда.

### Введение

Однородные оболочечные конструкции нашли широкое применение в современных отраслях промышленности [1–3]. Исследованию слоистых, в том числе трехслойных, оболочек посвящены работы [4–8]. В статьях [9, 10] рассмотрено действие импульсных нагрузок на трехслойные стержни. Статическое деформирование трехслойных стержней и пластин изучено в статьях [11–13]. Здесь будут рассмотрены собственные и вынужденные осесимметричные колебания круговой цилиндрической трехслойной оболочки в упругой среде при учете радиальных и продольных сил инерции. В этом случае крутильные силы инерции и перемещения не зависят от окружной координаты.

### Постановка задачи

Для тонких изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа–Лява. В толстом заполнителе учитывается работа поперечного сдвига и обжатие по толщине. Изменение перемещений принято линейным по поперечной координате. На границах контакта слоев используются условия непрерывности перемещений. Деформации малые. Через  $h_k$  обозначена толщина  $k$ -го слоя,  $h_3 = 2c$ . За независимые переменные принимаются  $u_\alpha^k$ ,  $w^k$  – тангенциальные перемещения и прогибы точек срединных поверхностей несущих слоев ( $k = 1, 2$ ) в направлении осей  $x_\alpha$ ,  $z$  правой системы координат, отнесенной к линиям главных кривизн срединной поверхности заполнителя и к внешней нормали, соответственно. К внутренней поверхности оболочки приложена распределенная нагрузка  $q_i^2$ , к внешней – реакция упругой безынерционной среды Винклера  $q_{3r}^1 = -\kappa_0 w^1$  (рисунок 1),  $\kappa_0$  – коэффициент жесткости упругой среды.

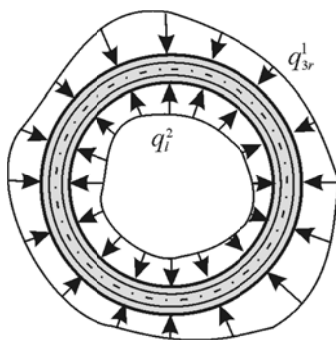


Рисунок 1 – Расчетная схема нагружения

В результате выражения для перемещений в несущих слоях ( $c \leq z \leq c + h_1$ ,  $-c - h_2 \leq z \leq -c$ ) будут:

$$u_{\alpha}^{kz} = u_{\alpha}^k + (z \mp a_k) \psi_{\alpha}^k; \quad a_k = c + 0,5h_k, \\ \psi_1^k = -w_{,1}^k, \quad \psi_2^k = (R \pm a_k)^{-1} (u_2^k - w_{,2}^k). \quad (1)$$

Здесь и далее греческие индексы принимают значения 1, 2, латинские – 1, 2, 3 (если другое специально не указано); нижний знак  $k$  в формуле соответствует индексу 2 (номеру слоя);  $\psi_{\alpha}^k$  – угол поворота деформированной нормали в  $k$ -м несущем слое;  $R$  – радиус оболочки. Частное дифференцирование по координате обозначается соответствующим нижним координатным индексом, следующим после запятой. Из условия непрерывности перемещений на границах контакта слоев в заполнителе ( $-c \leq z \leq c$ , верхний индекс «3») перемещения будут:

$$u_1^{3z} = 0,5 \sum_{k=1}^2 (1 \pm z/c) (u_1^k \pm 0,5h_k w_{,1}^k), \\ u_2^{3z} = \sum_{k=1}^2 (1 \pm z/c) ((0,5 \mp D_{k2}) u_2^k \pm D_{k2} w_{,2}^k), \quad w^{3z} = 0,5 \sum_{k=1}^2 (1 \pm z/c) w^k, \quad (2) \\ \dots, D_{k2} = 0,25h_k (1 \pm a_k/R)^{-1} R^{-1}.$$

Уравнения движения трехслойной оболочки и силовые граничные условия следуют из вариационного принципа Лагранжа:

$$\delta W + \delta A_q = \delta A_I, \quad (3)$$

где  $\delta W$  – вариация работы внутренних сил упругости,  
 $\delta A_I$  – вариация работы сил инерции,  
 $\delta A_q$  – вариация работы внешних сил и упругого основания.

С учетом поперечных сдвигов и обжатия заполнителя имеем:

$$\delta W = 2\pi \int_0^{l_1} \left[ \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_{\alpha\beta}^k \delta \varepsilon_{\alpha\beta}^{kz} (R+z) dz + \int_{h_3} (2\sigma_{\alpha 3}^3 \delta \varepsilon_{\alpha 3}^{3z} + \sigma_{33}^3 \delta \varepsilon_{33}^{3z}) (R+z) dz \right] dx_1, \\ \delta A_{q1} = 2\pi \int_0^{l_1} \left( q_{\alpha}^2 \left( \delta u_{\alpha}^2 - \frac{h_2}{2} \delta \psi_{\alpha}^2 \right) + q_3^2 \delta w^2 \right) (R-c-h_2) + q_{3r}^1 \delta w^1 (R+c+h_1) dx_1, \quad (4) \\ \delta A_I = 2\pi \sum_{k=1}^3 \int_0^{l_1} \int_{h_k} \left[ \rho_k (\ddot{w}^{kz} \delta w^{kz} + \ddot{u}_{\alpha}^{kz} \delta u_{\alpha}^{kz}) \right] (R+z) dz dx_1,$$

где  $\sigma_{ij}^k$  и  $\varepsilon_{ij}^k$  – напряжения и деформации, соответственно, в слоях связаны законом Гука,

$\rho_k$  – плотность материала  $k$ -го слоя,

$l_1$  – линейный размер оболочки в направлении координатной оси  $x_1$ .

Суммирование производится по повторяющимся греческим индексам, точки над перемещениями – производные по времени.

Подставив в вариационное уравнение (3) выражения для вариаций работ (4) и, проведя с помощью (1), (2) стандартные преобразования, получим четыре уравнения осесимметричных колебаний круговой цилиндрической трехслойной оболочки в упругой среде:

$$L_1^m(u_1^m, w^m) - b_1^m \dot{u}_1^m = -L_{1q}^m, \quad L_3^m(u_1^m, w^m) - b_3^m \dot{w}^m = -L_{3q}^m \quad (m = 1, 2), \quad (5)$$

где дифференциальные операторы

$$L_1^m = \sum_{k=1}^2 \left[ \left( a_{m11}^k \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + a_{m13}^k \right) u_1^k + \left( a_{m15}^k \frac{\partial}{\partial x_1} + a_{m16}^k \frac{\partial^3}{\partial x_1^3} \right) w^k \right], \\ L_3^m = \sum_{k=1}^2 \left[ \left( a_{m31}^{1k} \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + a_{m33}^{1k} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + a_{m34}^k - \kappa_0 R m_m \delta_{mk} \delta_{1m} \right) w^k + \left( a_{m35}^{1k} \frac{\partial^3}{\partial x_1^3} + a_{m36}^{1k} \frac{\partial}{\partial x_1} \right) u_1^k \right];$$

внешние нагрузки

$$L_{1q}^m = m_m R \delta_{2m} q_1^m, \quad L_{3q}^m = R m_m \delta_{2m} [q_3^m \pm 0,5 h_m q_1^m],$$

$$b_1^m = b_3^m = 2R \left[ \rho_m h_m (1 \pm a_m/R) + \frac{1}{3} \rho_3 c (2 \pm c/R) \right];$$

$\delta_{mk}$  – символы Кронекера;

$a_{mnp}^k$  – 49 коэффициентов, выраженных через геометрические характеристики слоев, параметры упругости материалов слоев и жесткости наполнителя  $\kappa_0$ , например

$$a_{k11}^k = K_k^+ h_k (1 \pm a_k) + K_3^+ c (2 \pm c) / 3, \quad a_{a11}^k = K_3^+ c / 3,$$

$$a_{a37}^{2k} = \mp K_3 B_{k2} h_a c / 3 \mp G_3 B_{k2} c (h_a / 3 + 4 D_{a2}) / 3,$$

$$m_m = 1 \pm (c + h_m) R^{-1}, \quad b_1^m = 2R [\rho_m I_1^m + 0,25 \rho_3 I_2^{\pm}], \quad b_3^m = b_1^m,$$

$$b_2^m = 2R \left[ \rho_m (I_1^m + 2R^{-1} (1 \pm a_1/R)^{-1} I_3^m + R^{-2} (1 \pm a_1/R)^{-2} I_5^m) + \rho_3 (B_{m2})^2 I_2^{\pm} \right],$$

$$I_1^k = \int_{h_k} \left( 1 + \frac{z}{R} \right) dz, \quad I_2^{\pm} = \int_{h_3} (1 \pm z/c)^2 \left( 1 + \frac{z}{R} \right) dz, \quad I_3^k = \int_{h_k} (z \mp a_k) \left( 1 + \frac{z}{R} \right) dz.$$

Силовые граничные условия формулируются из требования выполнения в каждой точке координатной линии равенства заданных обобщенных усилий и моментов внутренним силовым факторам, входящим в выражения контурного интеграла вдоль той же линии. Иначе говоря, на каждом торце формулируется по восемь граничных условий. Кинематические условия свободного опирания торцами на жесткие неподвижные опоры будут:

$$w^k = u_{1,1}^k = w_{,11}^k = 0 \quad (k=1, 2). \quad (6)$$

В случае жесткой заделки должны выполняться требования

$$u_1^k = u_2^k = w^k = w_{,1}^k = 0 \quad (k=1, 2). \quad (7)$$

Начально–краевая задача определения перемещений замыкается добавлением к уравнениям движения (5) профилей начальных перемещений и скоростей срединных поверхностей несущих слоев:

$$u_{\alpha}^k(x_{\beta}, 0) = u_{\alpha 0}^k(x_{\beta}), \quad \dot{u}_{\alpha}^k(x_{\beta}, 0) = \dot{u}_{\alpha 0}^k(x_{\beta}),$$

$$w^k(x_{\beta}, 0) = w_0^k(x_{\beta}), \quad \dot{w}^k(x_{\beta}, 0) = \dot{w}_0^k(x_{\beta}) \quad (\alpha, \beta, k=1, 2). \quad (8)$$

### Собственные колебания

Одной из самых важных с практической точки зрения задач динамики является исследование спектра частот собственных колебаний. Ее решение позволяет определить собственные частоты и формы, знание которых необходимо для решения задач о колебаниях трехслойных конструкций при различных видах внешних воздействий.

Рассмотрим задачу о собственных колебаниях трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде. Уравнения движения получим из (5), положив оставляющие нагрузки  $q_1^2 = q_3^2 = 0$ :

$$L_1^m(u_1^m, w^m) - b_1^m \ddot{u}_1^m = 0, \quad L_3^m(u_1^m, w^m) - b_3^m \ddot{w}^m = 0 \quad (m=1, 2). \quad (9)$$

Граничные условия (6) свободного опирания торцами на жесткие неподвижные опоры будут автоматически выполняться, если решение принять в виде разложения в одинарные тригонометрические ряды:

$$u_1^1 = \sum_{m=0}^{\infty} \cos \frac{\pi m x}{L} T_{1m}(t), \quad u_1^2 = \sum_{m=0}^{\infty} \cos \frac{\pi m x}{L} T_{2m}(t),$$

$$w^1 = \sum_{m=0}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{L} T_{5m}(t), \quad w^2 = \sum_{m=0}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{L} T_{6m}(t). \quad (10)$$

Подставив соотношения (10) в систему уравнений свободных колебаний (9), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения функции времени  $T_{im}$  ( $i = 1, 2, 5, 6$ ). В матричном виде она будет следующей:

$$[P]\{T\} - [B]\{\ddot{T}\} = 0, \quad (11)$$

где  $[P]$  – квадратная матрица четвертого порядка, составленная из коэффициентов  $p_{ij}$ , зависящих от волнового параметра  $m$ ;

$[B]$  – диагональная матрица четвертого порядка с элементами  $B_{mij}$ ;  $\{T\}$  и  $\{\ddot{T}\}$  – векторы, сформированные из искомых функций времени

$$\begin{aligned} p_{11} &= -a_{111}^1 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{113}^1, & p_{12} &= -a_{111}^2 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{113}^2, \\ p_{13} &= a_{115}^1 \frac{\pi m}{L} - a_{116}^1 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, & p_{14} &= a_{115}^2 \frac{\pi m}{L} - a_{116}^2 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, & p_{21} &= -a_{211}^1 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{213}^1, \\ p_{22} &= -a_{211}^2 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{213}^2, & p_{23} &= a_{215}^1 \frac{\pi m}{L} - a_{216}^1 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, & p_{24} &= a_{215}^2 \frac{\pi m}{L} - a_{216}^2 \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, \\ p_{31} &= -a_{136}^{11} \frac{\pi m}{L} + a_{135}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, & p_{32} &= -a_{136}^{12} \frac{\pi m}{L} + a_{135}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, \\ p_{33} &= a_{134}^1 - \kappa_0^1 R m_1 - a_{133}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{131}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^4, & p_{34} &= a_{134}^2 - a_{133}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{131}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^4, \\ p_{41} &= -a_{236}^{11} \frac{\pi m}{L} + a_{235}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, & p_{42} &= -a_{236}^{12} \frac{\pi m}{L} + a_{235}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^3, \\ p_{43} &= a_{234}^1 - a_{233}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{231}^{11} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^4, & p_{44} &= a_{234}^2 - \kappa_0^2 R m_2 - a_{233}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^2 + a_{231}^{12} \left( \frac{\pi m}{L} \right)^4, \\ B_{mm11} &= b_1^1, & B_{mm22} &= b_1^2, & B_{mm33} &= b_3^1, & B_{mm44} &= b_3^2. \end{aligned}$$

$$[P] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix}, \quad \{T\} = \begin{bmatrix} T_{1m} \\ T_{2m} \\ T_{5m} \\ T_{6m} \end{bmatrix},$$

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{m11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{m22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{m33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{m44} \end{bmatrix}, \quad \{\ddot{T}\} = \begin{bmatrix} \ddot{T}_{1m} \\ \ddot{T}_{2m} \\ \ddot{T}_{5m} \\ \ddot{T}_{6m} \end{bmatrix}.$$

Предполагая, что все точки конструкции совершают колебания с одинаковой частотой, решения системы уравнений (11) для определения функции  $T_{im}(t)$  принимаем в виде

$$T_{im}(t) = A_{im} \sin(\omega_m t + \alpha_m), \quad (12)$$

где  $A_{im}$ ,  $\omega_m$ ,  $\alpha_m$  – амплитуды, частоты и начальные фазы колебаний.

Подставив выражения для перемещений (10) и функции (12) в систему (11), придем к обобщенной задаче на собственные значения.

$$[P]\{A\} = -\omega^2 [B]\{A\}. \quad (13)$$

Обозначив  $\lambda = -\omega^2$  и обратив матрицу  $[B]$ , т. к. она не является вырожденной, осуществим переход от (13) к стандартной задаче на собственные значения:

$$[R]\{A\} = \lambda \{A\}, \quad [R] = [B]^{-1} [P]. \quad (14)$$

По найденным значениям  $\omega_i^2$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) вычисляется собственный вектор  $\{A_i\}$ . При этом, предполагая, что собственные значения не являются кратными, в матрице  $[R - \lambda E]$  среди всех ее миноров четвертого порядка выбирается тот, который имеет наибольшее по модулю значение, то есть вычисляется номер строки, подлежащей исключению в (14), и номер столбца, определяющий правую часть соответствующей системы уравнений четвертого порядка. В итоге находится тот компонент вектора  $\{A_i\}$ , относительно которого будет произведена нормировка и получены коэффициенты собственных форм колебаний.

В данном случае для каждого индекса  $m$  будем иметь четыре частоты  $\omega_{mp}$  ( $p = 1, \dots, 4$ ). При граничных условиях (7) вид решения (10) будет другой.

### Вынужденные колебания

Вынужденные колебания описываются уравнениями (5). Граничные условия (6) будут автоматически выполняться, если принять искомые перемещения в виде (10) и разложив компоненты нагрузки в ряд

$$q_1^2 = \sum_{m=0}^{\infty} \cos \frac{\pi m x}{L} q_{1m}^2(t), \quad q_3^2 = \sum_{m=0}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{L} q_{3m}^2(t). \quad (15)$$

Подставив выражения (15) в (5), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения функции времени  $T_{im}$ . В матричном виде она будет следующей:

$$[P]\{T\} - [B]\{\ddot{T}\} = -\{Q\}, \quad (16)$$

где параметры вектора нагрузки  $\{Q\}$  определяются выражением

$$\{Q\} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 R q_{1m}^2 \\ 0 \\ R m_2 [q_{3m}^2 - 0,5 h_2 q_{1m}^2 \psi_{21}] \end{bmatrix}.$$

Тогда искомые функции времени  $T_{im}(t)$  (сопоставить с (10)) ( $i = 1, 2, 5, 6$ ) можно представить в виде разложения в конечный ряд по системе собственных ортонормированных функций времени  $\zeta_{mk}$ :

$$T_{im}(t) = \sum_k \delta_{mik} \zeta_{mk} \quad (i, k = 1, 2, 5, 6), \quad (17)$$

где  $\delta_{mik}$  – коэффициенты форм.

Подставляя выражение (17) в уравнения (16) и используя свойство ортогональности собственных форм колебаний, приходим к четырем независимым уравнениям аналогичным (3.35) относительно функций времени  $\zeta_{mi}$ :

$$\ddot{\zeta}_{mi} + (\omega_{mi})^2 \zeta_{mi} = \tilde{q}_{mi} \tilde{T}_i(t), \quad (18)$$

где  $\tilde{q}_{mi}$  – компоненты приведенной нагрузки

$$\tilde{q}_{mi} = \frac{m_2 R q_{1m}^2 \delta_{m2i} + R m_2 [q_{3m}^2 - 0,5 h_2 q_{1m}^2 \psi_{21}] \delta_{m6i}}{b_1^1 \delta_{m1i}^2 + b_1^2 \delta_{m2i}^2 + b_3^1 \delta_{m5i}^2 + b_1^2 \delta_{m6i}^2} \quad (i = 1, 2, 5, 6).$$

Общее решение дифференциального уравнения (18) [14]

$$\zeta_{mi}(t) = A_{mi} \cos(\omega_{mi} t) + B_{mi} \sin(\omega_{mi} t) + \frac{\tilde{q}_{mi}}{\omega_{mi}} \int_0^t \sin(\omega_{mi}(t - \tau)) \tilde{T}_i(\tau) d\tau. \quad (19)$$

Искомые перемещения (10) представляются в виде сумм произведений  $\zeta_{mi}$  (19) на соответствующие коэффициенты и исходные базовые функции.

*Внезапно–приложенная нагрузка.* Пусть на исследуемую трехслойную цилиндрическую оболочку действует внезапно приложенная осесимметричная нагрузка, которую можно записать в следующем виде

$$q_l^2(x, t) = q_{la}^2(x)H_0(t) \quad (l = 1, 3). \quad (20)$$

Коэффициенты разложения этой нагрузки в ряд будут

$$q_{1m}^2 = \frac{a_{qm}H_0(t)}{L} \int_0^L q_{1a}^2(x) \cos\left(\frac{\pi m}{L}x\right) dx, \quad q_{3m}^2 = \frac{2H_0(t)}{L} \int_0^L q_{3a}^2(x) \sin\left(\frac{\pi m}{L}x\right) dx. \quad (21)$$

Решение уравнения (18) с учетом коэффициентов (21) запишется в виде

$$\zeta_{mi}(t) = A_{mi} \cos(\omega_{mi}t) + B_{mi} \sin(\omega_{mi}t) + \tilde{q}_{mi} \frac{1 - \cos(\omega_{mi}t)}{\omega_{mi}^2}. \quad (22)$$

Искомые перемещения  $u_1, u_2, w_1, w_2$  при нагрузке (20) описываются формулами (15), с учетом выражений для функций времени (17) и (22). В случае воздействия равномерного внутреннего давления интенсивностью  $q_{3a}^2 = q_0 = \text{const}$  ( $q_1^2 = 0$ ) коэффициенты (21) запишутся в виде

$$q_{3m}^2 = \frac{2q_0H_0(t)}{\pi m} (1 - \cos(\pi m)).$$

*Импульсная нагрузка.* Пусть на исследуемую трехслойную цилиндрическую оболочку в начальный момент времени действует осесимметричная импульсная нагрузка:

$$q_l^2(x, t) = q_{li}^2(x)\delta(t). \quad (23)$$

где  $\delta(t)$  – функция Дирака.

Коэффициенты разложения нагрузки (23) в ряд будут

$$q_{1m}^2 = \frac{a_{qm}\delta(t)}{L} \int_0^L q_{1i}^2(x) \cos\left(\frac{\pi m}{L}x\right) dx, \quad q_{3m}^2 = \frac{2\delta(t)}{L} \int_0^L q_{3i}^2(x) \sin\left(\frac{\pi m}{L}x\right) dx. \quad (24)$$

Функция времени  $\zeta_{mi}(t)$  с учетом (24) запишется в виде

$$\zeta_{mi}(t) = A_{mi} \cos(\omega_{mi}t) + B_{mi} \sin(\omega_{mi}t) + \tilde{q}_{mi} \frac{\sin(\omega_{mi}t)}{\omega_{mi}}. \quad (25)$$

Таким образом, искомые перемещения  $u_1, u_2, w_1, w_2$  для нагрузки (23) описываются формулами (5), с учетом выражений для функций времени (25).

В случае воздействия импульса равномерного гидростатического давления интенсивностью  $q_{3i}^2 = q_1 = \text{const}$  коэффициенты (24) будут

$$q_{3m}^2 = \frac{2q_1\delta(t)}{\pi m} (1 - \cos(\pi m)).$$

### Численное исследование

Численные результаты здесь и далее получены для круговой трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде Винклера, свободно опертой торцами на жесткие неподвижные опоры. Несущие слои – сплав Д16Т, наполнитель – фторопласт [15]. Относительные толщины слоев:  $h_1 = h_2 = 0,02$ ,  $c = 0,025$ . Внутри оболочки упругая среда отсутствует  $\kappa_0^2 = 0$ , снаружи действует упругая среда с  $\kappa_0^1 = \kappa_0$ . Линейные перемещения отнесены к радиусу оболочки, время измеряется в секундах.

Первые три собственные частоты оболочек различной длины, несвязанных с окружающей средой Винклера,  $\omega_{0p}, \omega_{1p}, \omega_{2p}$  ( $p = 1, \dots, 4$ ,  $\kappa_0 = 0$ ,  $L = 2R, 10R$ ) приведены в таблице. Для частот  $\omega_{0p}$  длина оболочки не влияет на их величину, для остальных – увеличение длины приводит к уменьшению низших частот.

Таблица 1 – Частоты собственных колебаний  $\omega_{mp}$  ( $\text{с}^{-1}$ )

$p \backslash m$	$L = 2R$			$L = 10R$		
	0	1	2	0	1	2
1	0	2822	3021	0	938	1774
2	3602	6068	11433	3602	3655	3859
3	4478	7233	12203	4478	4621	5024
4	32958	32964	32993	32958	32958	32959

На рисунке 2, *a*, *б* ( $L = 2R$ ;  $10R$ , соответственно) показаны изменения первых трех частот  $\omega_{0p}$  (1 –  $\omega_{01}$ , 2 –  $\omega_{02}$ , 3 –  $\omega_{03}$ ) рассматриваемой оболочки, в зависимости от коэффициента  $\kappa_0$  упругой среды. Наличие упругой среды практически не влияет на частоту  $\omega_{03}$ , которая остается постоянной.

Это объясняется тем, что реакция упругой среды не препятствует продольным колебаниям оболочки. Частота  $\omega_{01}$  остается нулевой. Частоты  $\omega_{02}$  резко возрастают с увеличением жесткости в интервале  $10^9 < \kappa_0 < 10^{10}$  Па/м. Длина оболочки на рассмотренные частоты не влияет.

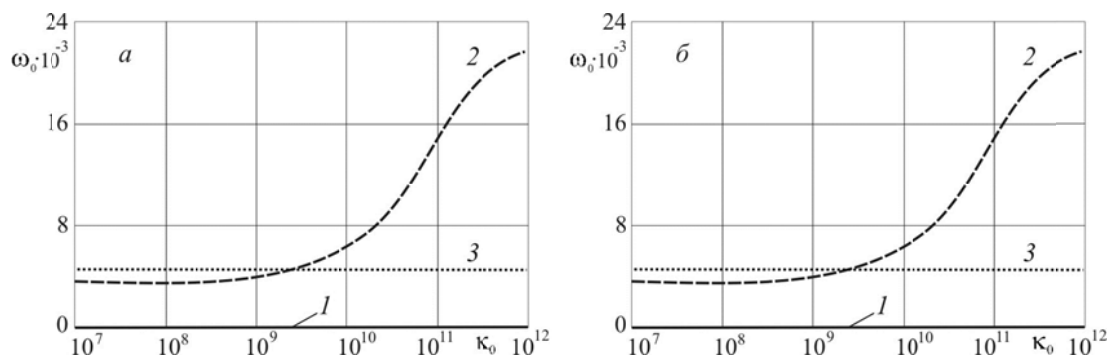


Рисунок 2 — Частоты собственных колебаний  $\omega_{0p}$

На рисунке 3 показано изменение максимальных прогибов несущих слоев вдоль образующей в зависимости от относительной координаты  $x/L$  для короткой (без штриха) и длинной (со штрихом) оболочек: *a* –  $\kappa_0 = 0$ , *б* –  $\kappa_0 = 10^9$  Па/м, *в* –  $\kappa_0 = 10^{11}$  Па/м (номер кривой совпадает с номером слоя). Нагрузка принималась  $q_0 = 2$  МПа. Моменты времени, в которые фиксировались прогибы, подбирались так, чтобы получить их максимальное значение: для оболочки длиной  $L = 2R$  –  $t_0 = 0,0102$  с;  $t_0 = 0,0107$  с;  $t_0 = 0,00019$  с соответственно для трех типов упругой среды; аналогично при  $L = 10R$  –  $t_0 = 0,0163$  с;  $t_0 = 0,0166$  с;  $t_0 = 0,00019$  с. В длинной оболочке у торцов наблюдается краевой эффект – резкое увеличение прогибов. С увеличением жесткости среды различия в прогибах оболочек нивелируются, краевой эффект выражается отчетливой.

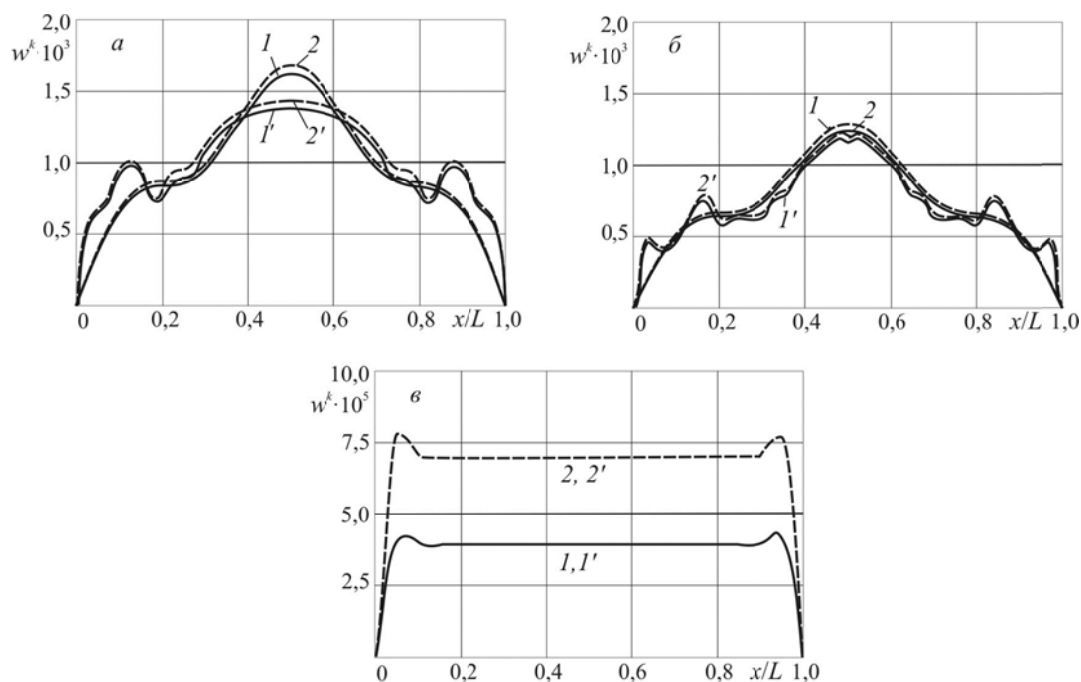


Рисунок 3 – Изменение перемещений вдоль образующей

При численном исследовании интенсивность импульсной нагрузки принималась  $q_1 = 2 \cdot 10^3$  Па·с. На рисунке 4 показано изменение прогибов и продольных перемещений первого несущего слоя во времени в окружающей среде средней жесткости  $\kappa_0 = 10^9$  Па/м: *a* – прогиб в срединном сечении оболочки; *б* – горизонтальные перемещения в правом торцевом сечении. Здесь колебания представляют собой симметричный цикл.

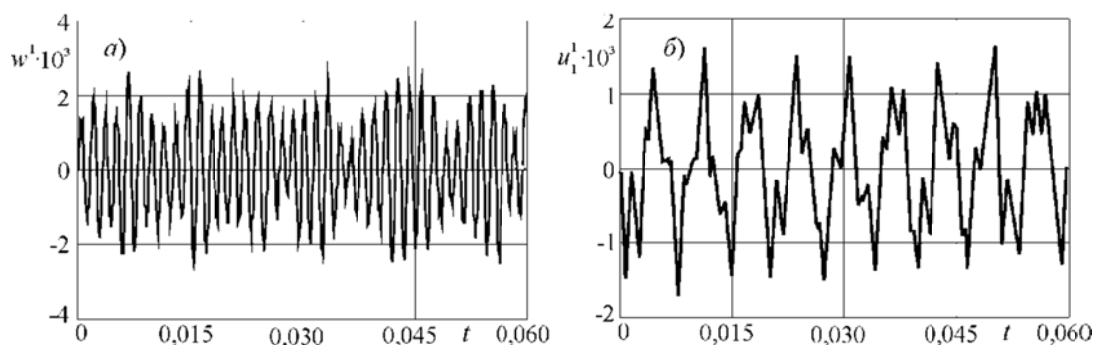


Рисунок 4 – Изменение прогиба первого несущего слоя во времени

### Заключение

В работе предложена адекватная механико–математическая модель осесимметричного динамического деформирования трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде. Исследованы частоты собственных колебаний при учете радиальных и осевых сил инерции. Получены решения задач о вынужденных колебаниях при действии осесимметричных внезапных и импульсных нагрузок. Численно исследовано влияние жесткости окружающей среды на параметры колебаний. Установлено, что с ростом жесткости среды собственные частоты растут, а амплитуды колебаний уменьшаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, В. З. Балки, плиты, оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М.: Государственное издательство физико–математической литературы, 1960. – 491 с.
2. Tarlakovskii, D.V. Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D.V. Tarlakovskii, G.V. Fedotenkov // Mechanics of Solids. – 2015. – Vol. 46, no 5. – Pp. 779–787.
3. Tarlakovskii, D.V. Two–Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells shell / D.V. Tarlakovskii, G.V. Fedotenkov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – Pp. 145–152.
4. Болотин, В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
5. Старовойтов, Э. И. Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки / Э. И. Старовойтов. – Гомель: БелГУТ, 2002. – 343 с.
6. Соломонов, Ю.С. Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек / Ю.С. Соломонов [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 408 с.
7. Gorshkov, A.G. Harmonic vibrations of a viscoelastoplastic sandwich cylindrical shell / A.G. Gorshkov, É.I. Starovoitov, A.V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – С. 1196–1203.
8. Леоненко, Д.В. Радиальные собственные колебания упругих трехслойных цилиндрических оболочек / Д.В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (12). – С. 53–56.
9. Starovoitov, E.I. Vibration of sandwich rod under local and impulsive forces / E.I. Starovoitov, D.V. Leonenko, A.V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2005. – V. 41, no. 7. – Pp. 809–816.
10. Леоненко, Д. В. Колебания трехслойного стержня под действием импульсных нагрузок различных форм/ Д.В. Леоненко // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 23–27.
11. Škec, L. Analysis of a geometrically exact multi–layer beam with a rigid interlayer connection / L. Škec, G. Jelenić // Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225, no. 2. – Pp. 523–541.
12. Starovoitov, É.I. Elastoplastic bending of a sandwich bar on an elastic foundation / É.I. Starovoitov, D.V. Leonenko, A.V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2007. – Vol. 43, no. 4. – Pp. 451–459.
13. Старовойтов, Э. И. Осесимметричное деформирование круговой трехслойной пластины в температурном поле / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – №1 (327). – С. 13–22.
14. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
15. Горшков, А. Г. Теория упругости и пластичности / А. Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, Д.В. Тарлаковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 416 с.

Леоненко Денис Владимирович

Белорусский государственный университета транспорта

доктор физ. – мат. наук, доцент, профессор кафедры «Строительная механика»

Кирова, 34, 246653 г. Гомель, Республика Беларусь.

Тел. +375–232 – 95–39–61 (раб.).

E-mail: leoden@tut.by

---

D.V. LEONENKO

## OSCILLATIONS OF CYLINDRICAL SANDWICH SHELL IN ELASTIC MEDIUM UNDER ACTION OF AXISYMMETRIC DYNAMIC LOADS

**Abstract.** *The oscillations of a three-layer cylindrical shell in an elastic medium under the action of sudden and impulse loads are considered. Kirchhoff–Love hypotheses are accepted for isotropic bearing layers. In a thicker filler, the work of transverse shear and the reduction in thickness are taken into account. The change in displacements is taken to be linear in the transverse coordinate. The elastic medium is described by the Winkler's model. Equations of are derived motion by energy methods. A number of analytical solutions are obtained and their numerical analysis is carried out.*

**Keywords:** *cylindrical shell, axisymmetric oscillations, impulse loads, impact loads, elastic medium.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Vlasov, V. Z. Balki, plity, obolochki na uprugom osnovanii / V. Z. Vlasov, N. N. Leont'ev. – M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko–matematicheskoy literatury, 1960. – 491 s.
2. Tarlakovskii, D.V. Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D.V. Tarlakovskii, G.V. Fedotenkov // *Mechanics of Solids*. – 2015. – Vol. 46, no 5. – Pp. 779–787.
3. Tarlakovskii, D.V. Two-Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells shell / D.V. Tarlakovskii, G.V. Fedotenkov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – Pp. 145–152.
4. Bolotin, V.V. *Mehanika mnogoslojnyh konstrukcij* / V.V. Bolotin, Ju.N. Novichkov. — M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 375 s.
5. Starovoitov, Je. I. Vjazkouprugoplasticheskie sloistye plastiny i obolochki / Je. I. Starovoitov. – Gomel': BelGUT, 2002. – 343 s.
6. Solomonov, Ju.S. Prikladnye zadachi mehaniki kompozitnyh cilindricheskikh obolochek / Ju.S. Solomonov [i dr.]. – M.: FIZMATLIT, 2014. – 408 s.
7. Gorshkov, A.G. Harmonic vibrations of a viscoelastoplastic sandwich cylindrical shell / A.G. Gorshkov, É.I. Starovoitov, A.V. Yarovaya // *International Applied Mechanics*. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – С. 1196–1203.
8. Leonenko, D.V. Radialnye sobstvennyye kolebanija uprugih trehslojnyh cilindricheskikh obolochek / D.V. Leonenko // *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov*. – 2010. – № 3 (12). – S. 53–56.
9. Starovoitov, E.I. Vibration of sandwich rod under local and impulsive forces / E.I. Starovoitov, D.V. Leonenko, A.V. Yarovaya // *International Applied Mechanics*. – 2005. – V. 41, no. 7. – Pp. 809–816.
10. Leonenko, D. V. Kolebanija trehslojnogo sterzhnja pod dejstviem impulsnyh nagruzok razlichnyh form / D.V. Leonenko // *Materialy, tehnologii, instrumenty*. – 2004. – T. 9, № 2. – S. 23–27.
11. Škec, L. Analysis of a geometrically exact multi-layer beam with a rigid interlayer connection / L. Škec, G. Jelenić // *Acta Mechanica*. – 2014. – Vol. 225, no. 2. – Pp. 523–541.
12. Starovoitov, É.I. Elastoplastic bending of a sandwich bar on an elastic foundation / É.I. Starovoitov, D.V. Leonenko, A.V. Yarovaya // *International Applied Mechanics*. 2007. – Vol. 43, no. 4. – Pp. 451–459.
13. Starovoitov, Je. I. Osesimmetrichnoe deformirovanie krugovoj trehslojnoj plastiny v temperaturnom pole / Je.I. Starovoitov, D.V. Leonenko // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*. – 2018. – №1 (327). – S. 13–22.
14. Kamke, Je. *Spravochnik po obyknovennym differencialnym uravnenijam* / Je. Kamke. – M.: Nauka, 1976. – 576 s.
15. Gorshkov, A. G. Teorija uprugosti i plastichnosti / A. G. Gorshkov, Je.I. Starovoitov, D.V. Tarlakovskij. – M.: FIZMATLIT, 2011. – 416 s.

Leonenko Denis Vladimirovich

Belarusian State University of Transport

Doctor of physico–mathematical sciences, Docent, Professor

Kirova st. 34, Gomel, 246653, Belarus

Tel. +375–232–953961 (office)

E-mail leoden@tut.by

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.923.01

А.А. БАРЗОВ, А.Л. ГАЛИНОВСКИЙ, Е.В. ГОЛУБЕВ,  
А.А. ИЛЮХИНА, Н.К. КОБЕРНИК, О.В. ЗАРУБИНА

## **АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗАННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО – ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНЫХ И УЛЬТРАСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Аннотация.** Предполагается формализованный подход к анализу синергетического повышения возможностей прогрессивных производственных технологий, основанный на количественном определении их взаимосвязанности. На примере характерной и весьма популярной в настоящее время аддитивной технологии – селективного лазерного сплавления и ультразвуковой обработки материалов установлена их достаточно тесная взаимосвязанность, обеспечивающая расширение их функциональных возможностей при решении конкретных конструкторско-технологических задач. Показано, что важное значение имеет взаимодополнение и взаимосвязанность современных технологий, прежде всего в части их совместной комплексной реализации в сфере инновационных областей развития техники и технологий. При этом отмечено, что у ряда традиционных технологий, таких как ультразвуковая обработка материалов, по-прежнему не раскрыт их научно-практический потенциал, который позволяет расширить их области применения в машиностроении и смежных отраслях.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, ультразвуковая диагностика, формо- и структурообразование.

### **Введение.**

Одним из резервов повышения результативности современных формо- и структурообразующих технологий является реализация их совместного научно-прикладного потенциала при решении конкретных производственных задач. Для ряда традиционных технологий потенциал их совершенствования и развития в значительной степени исчерпан. Последнее время в ряде работ рассматривались возможности достижения синергетического эффекта от совместной реализации двух и более технологий, при выполнении ряда технологических операций и процессов [1–4]. С другой стороны, последнее время, внимание ученых сосредоточено на инновационных технологиях к которым, в частности, принято относить аддитивные и ультразвуковые технологии. Таким образом, для опережающего развития техники и технологий целесообразно рассматривать не только новые технологии сами по себе, но их комбинации, т.е. гибридные и комбинированные технологии и технологические процессы. В этой связи, можно утверждать, что тема исследования, результаты которого представлены в данной статье является актуальной.

### **Основная часть**

В исходном приближении последовательное использование совокупности операционных технологий в маршруте изготовления некоторого изделия можно оценить произведением вероятностей их прямого взаимодействия, без учета физически обусловленного вполне реалистичного взаимовлияния. Это взаимовлияние по сути структурно обеспечивает увеличение функционально-физических возможностей рассматриваемых технологий и с позиций теории надёжности играет роль резервных (дублирующих) элементов [5, 6]. Для количественной оценки степени взаимовлияния анализируемых технологий, уровня взаимопроникновения их физически доминирующих характерных факторов и отличительных признаков можно использовать коэффициент функциональной связности  $K_{\text{св}}$ :

$$K_{\text{св}} = N_{\text{св}}/N_{\text{об}} \quad (1)$$

где:  $N_{\text{св}}$  – количество структурно–взаимодействующих элементов рассматриваемой технологии в повышении технического уровня которых принимает функциональное участие «сопряжённая», связанная с данной технологией другая анализируемая технология;

$N_{\text{об}}$  – общее число структуро–взаимодействующих блоков, взаимосвязь между которыми формирует функционально–физический отклик исходной анализируемой технологии. Поясним вышеизложенное методическим примером.

Допустим, что гипотетическая базовая или исходная технология, может быть функционально–структурно представлена в виде трёх основных блоков, а другая сопряженная технология используется только для повышения технического уровня результативности только одного, замыкающего блока как показано на рисунке 1.

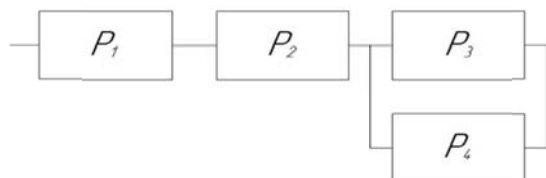


Рисунок 1 – Иллюстрация принципа функционально вероятностной взаимосвязанности технологий

На рисунке принято:

$P_1, P_2, P_3$  – вероятности качественного функционирования структурных элементов базовой технологии;

$P_4$  – возможности реализации возможностей технологии «улучшения» сопряжённой с базовой технологией.

Тогда не трудно показать, что итоговое взаимодействие рассматриваемых технологий в вероятностной постановке проблемы анализа их совместного потенциала функциональных возможностей будет определяться соотношением:

$$P_{\text{об}} = P_1 P_2 [1 - (1 - P_3)(1 - P_4)] \quad (2)$$

где:  $P_{\text{об}}$  – общая вероятностная характеристика результативности базовой анализируемой технологии с учётом повышения технического уровня её заключительного третьего структурного блока за счёт использования возможностей сопряжённой технологий;

$P_1, P_2, P_3$  – соответственно вероятности безотказного функционирования структурных элементов базовой технологии, а  $P_4$  – сопряжённого с ними элемента другой условно–вспомогательной технологии.

При этом коэффициент связанности технологий, как не трудно заметить, согласно определению (1) будет равен:

$$K_{\text{св}} = 1/4 \quad (3)$$

Таким образом, вышеизложенное позволяет с общеметодических позиций рассматривать взаимовлияние самых различных технологий. Конкретизируем вышеизложенное примером анализа взаимосвязанности технологий селективного лазерного сплавления (СЛС) и ультразвуковых гидрофизических технологий (УСТ). Если при СЛС ключевым формо– и структуро–образующим элементом является лазерный луч, обеспечивающий сплавление частиц исходного высокодисперсного порошка (ВДП), например металлического, то инструментом в операционных УСТ является высокоскоростная компактная гидроабразивная ультразвука (ГАУС) или ультразвука (УС) без твердофазных частиц (абразива) – гидроультразвука (ГУС). Данный ультразвуковой инструмент, как правило, реализует на поверхности объекта воздействия технологически управляемый процесс его интенсивной эрозии по механизму усталостного гидродиспергирования и, как следствие, происходит целенаправленное формо– и структурообразование детали, обычно из листовой заготовки.

Сделаем два замечания.

1. УСТ имеют несколько функционально–операционных разновидностей, в частности саму УС можно рассматривать как специфический обрабатываемый материал или инструмент высокоэффективной диагностики качества поверхностного слоя изделий, что подробно проанализировано в работах [7–10].

2. Расчёты показывают энергетическую соизмеримость характеристик луча технологического лазера и УС, в частности типовая плотность потока ее мощности оценивается как  $\sim 0,5 \text{ МВ/мм}^2$

Исходя из вышеизложенного обобщения структурная схема применения вариативных комбинаций УСТ в производственной цепочке получения деталей по технологии СЛС представлена на рисунке 2.

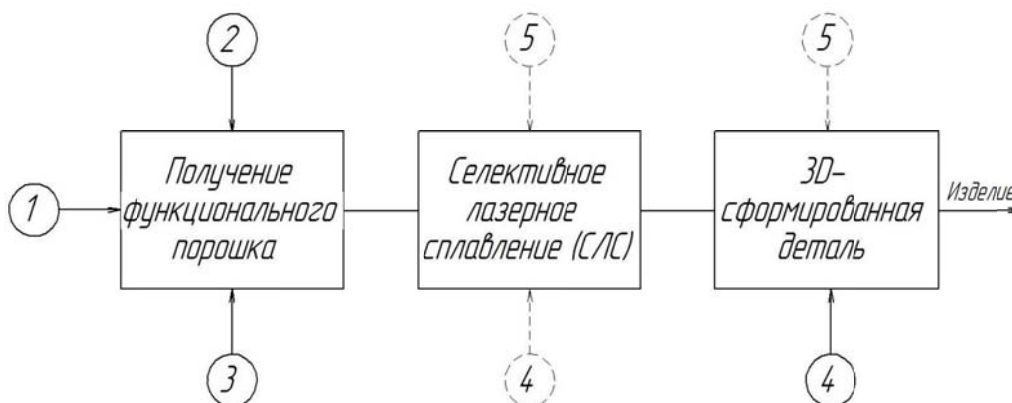


Рисунок 2 – Схема функционально–физической синергетической сопряжённости аддитивных и ультраструйных технологий (СЛС+УСТ)

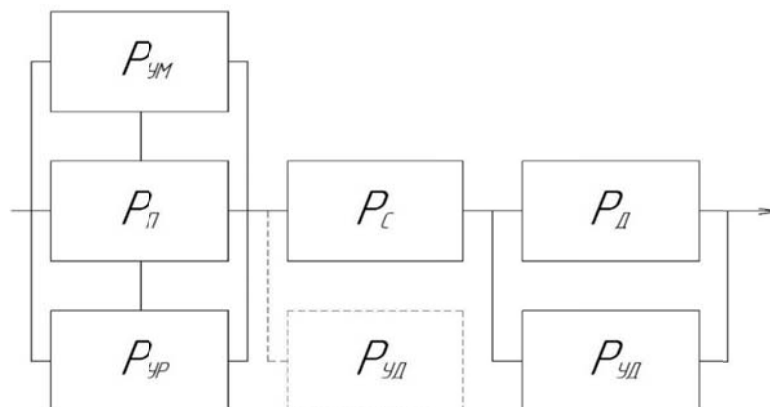


Рисунок 3 – Структурная схема, иллюстрирующая эффективность реализации возможностей УСТ в технологии СЛС

На основе формализующего анализа данной развернутой системы взаимодействия УСТ с элементами физико–технологической цепочки СЛС можно предложить классическую структурную схему, позволяющую количественно, с позиций теории надёжности, комплексно оценивать показатели функционального качества комбинации СЛС с возможностями УСТ. Реалистичный вариант такого формализованного представления развернутой системы (рисунок 2) показана на рисунке. 3 в виде структурной схемы, позволяющей построить соответствующую обобщенную вероятностную модель определения результативности анализируемой физико–технологической комбинации двух весьма перспективных методов формо– и структурообразования материалов: СЛС и УСТ.

Заметим, что согласно определению (1) значение коэффициента связности  $K_{св}$  для схемы на рисунке 3 составит:

$$K_{\text{св}} = 3 / 6 = 0,5 \quad (5)$$

Фактически это означает, что возможности УСТ эффективно реализуются и обеспечивают 50% ожидаемый рост качества базовой технологии СЛС, главным образом за счёт новых способов получения ВДП и УС–контроля параметров состояния поверхностного слоя материала деталей, полученных СЛС. Особенно важны эти положения для эксплуатации деталей в условиях жесткого фрикционного нагружения.

Согласно предложенной на рисунке 3 структурной схеме, обобщённая результативность взаимодействия технологий СЛС и УСТ может быть описана вероятностной моделью вида

$$P_{\text{СЛС}} = P_{\text{с}} \cdot [1 - (1 - P_{\text{п}})(1 - P_{\text{ум}})(1 - P_{\text{ур}})] \cdot [1 - (1 - P_{\text{д}})(1 - P_{\text{уд}})] \quad (6)$$

где:  $P_{\text{СЛС}}$  – итоговая вероятность качественной реализации процесса СЛС с масштабным использованием возможностей УСТ.

На рисунке принято:

$P_{\text{п}}$  – вероятность получения порошка для СЛС по традиционным технологиям: газораздувом расплава, механическим диспергированием и т.д.;

$P_{\text{ум}}$  – вероятностная оценка результативности получения ВДП путем УС–диспергирования твердотельной мишени из соответствующего сплава;

$P_{\text{ур}}$  – вероятность получения высококачественного ВДП в результате ультразвукового гидродинамического воздействия на расплав исходного металла (сплава);

$P_{\text{с}}$  – вероятность качественной реализации процесса формо– и структурообразования детали путем СЛС исходного порошка, с учетом специфики его подачи, предварительной активации и т.д.

$P_{\text{д}}$  – вероятность получения качественной детали методом СЛС без дополнительных физико–технологических усовершенствований;

$P_{\text{уд}}$  – вероятностная оценка эффективности реализации функциональных возможностей ультразвуковой диагностики (УСД) качества материала детали, полученной по технологии СЛС.

Для проведения численных расчётов параметры модели (6) должны быть определены количественно. Эту весьма трудоёмкую и трудноформализуемую процедуру можно осуществить путём рациональной комбинации трёх основных подходов:

1. Математической обработкой имеющегося статистического материала, объём которого на сегодняшний день весьма ограничен из–за новизны рассматриваемой проблемы.

2. Постановкой прямых целенаправленных экспериментов, дополненных результатами пока фрагментарного математического моделирования, например методом конечных элементов. Однако совершенство этого подхода еще не достигло требуемого функционального уровня.

3. Путём масштабного применения аппарата экспертно–аналитического анализа (ЭАА), как исходного варианта количественной оценки значений структурных элементов моделей типа (4) на основе обобщения мнений компетентных экспертов [11, 12].

Именно этот подход на начальном этапе рассмотрения проблемы повышения эффективности базовой технологии путём ее наполнения элементами других прогрессивных технологий на сегодняшний день представляется наиболее реалистичным.

Приведём численно–методический пример расчета степени повышения качества СЛС за счёт реализации возможностей УСТ. Допустим, что согласно принципу равных влияний все значения в (6) равны и составляют величину  $P \sim 0,8$ , полученную путём обобщения результатов ЭАА.

Тогда вероятностный уровень получения детали по классической технологии СЛС составляет всего 50%, а с использованием УСТ он возрастает до  $\sim 75\%$ . Это обстоятельство ещё раз подчёркивает научно–прикладную значимость создания комбинированных физико–технологических цепочек при изготовлении высокоответственных деталей. Введение дополнительных операций УС–контроля качества порошка и образцов–свидетелей

формируемых непосредственно в процессе СЛС основной детали резко увеличивает вероятность получения высококачественной детали до ~95%, так как «слабым звеном» является именно сам процесс СЛС (рисунок 3).

Заметим, что влияние СЛС на результативность УСТ также характеризуется достаточно высоким значением  $K_{\text{св}}$ :

$$K_{\text{св}} \sim 2/5 = 0,4 \quad (7)$$

Это объясняется тем, что СЛС весьма эффективно при обработке и изготовлении струеформирующих элементов (ГУС и ГАУС), а также эрозионностойкой твердотельной мишени при ультразвуковой обработке различных гидротехнологических сред, воды и других жидкостей [13, 14].

В целом на сегодняшний день взаимосвязанность СЛС и УСТ можно представить следующим соотношением:

$$K_{\text{св}}(\text{СЛС} \leftarrow \text{УСТ}) = k_{\text{фТ}} \cdot K_{\text{св}}(\text{УСТ} \leftarrow \text{СЛС}) \quad (8)$$

где:  $k_{\text{фТ}}$  – физико–технологический коэффициент, который на сегодняшний день существенно больше единицы:  $k_{\text{фТ}} > 1,0$ .

На рисунке 4 приведены примеры получения элементов струеформирующего тракта для осуществления операций по ультразвуковой обработке и диагностике материалов, полученные по технологии СЛС. Метод СЛС использовался для отработки формы рабочих каналов фокусирующих трубок по критерию обеспечения максимальной скорости ультразвука на этапе их конструкторско–технологической отработки. Экспериментальные образцы двух типоразмеров фокусирующих трубок изготавливались на установке для трехмерной печати сложнопрофильных ответственных изделий из металлических порошков MeltMaster<sup>3D</sup>–550, производства АО «НПО «ЦНИИТМАШ».

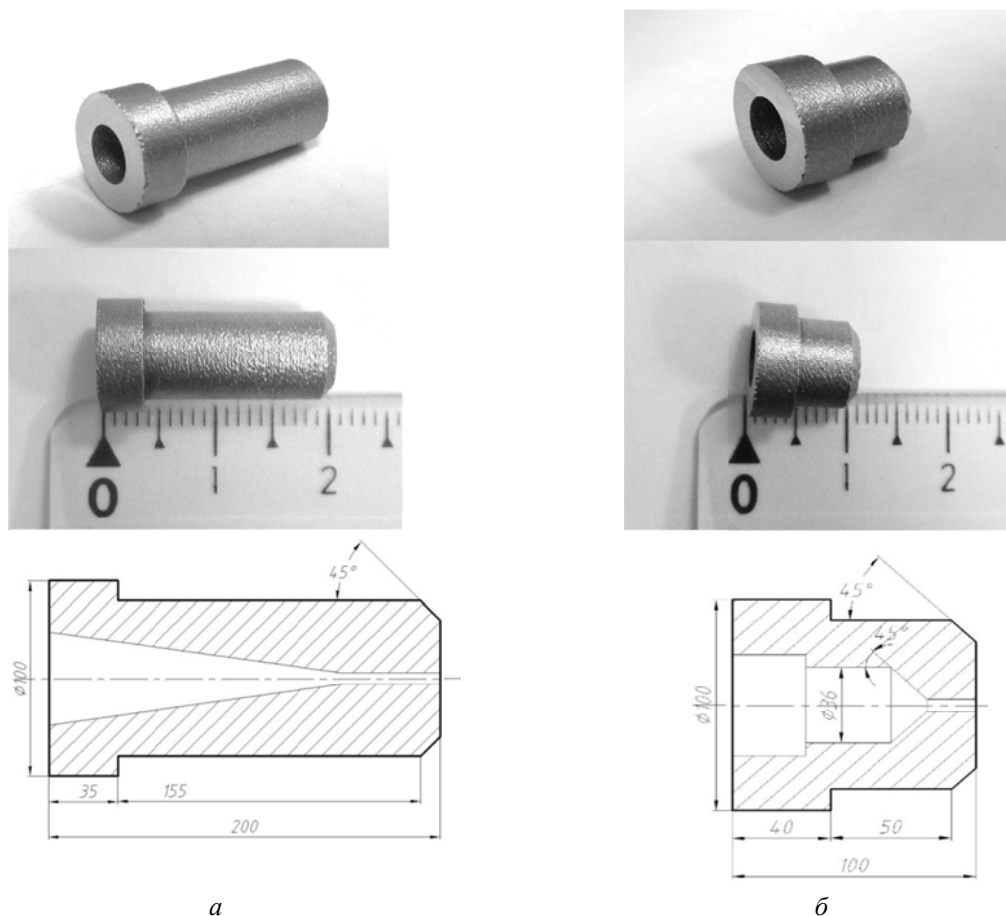
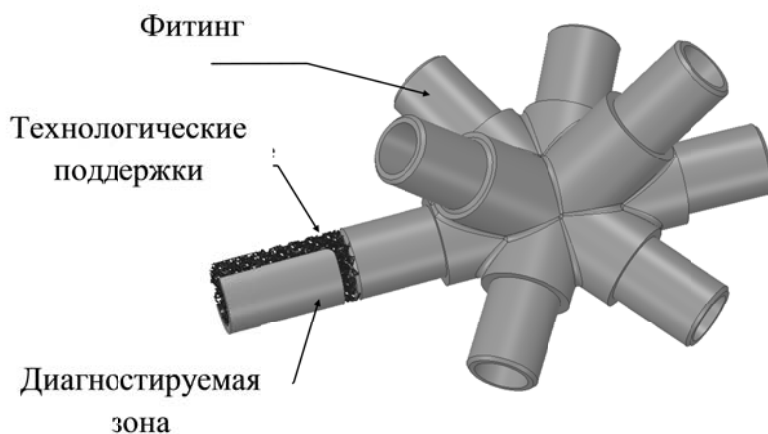


Рисунок 4 – Образцы фокусирующих трубок для ультразвуковой обработки и диагностики материалов, полученные методом СЛС: а – типоразмер №1, б – типоразмер №2

Необходимо подчеркнуть, что анализ взаимосвязанности технологий и их рациональное сочетание представляет собой малозатратный резерв повышения технического уровня многих, в том числе современных аддитивных технологий. Причём помимо СЛС к технологиям, реализующим принцип аддитивного формо- и структурообразования с полным правом следует отнести:

- получение изделий из композиционных материалов методами намотки и выкладки;
- осаждение деталей осаждением из газовой фазы, например особо химически чистого вольфрама;
- изготовление корковых деталей плазменным напылением;
- формо- и структурообразование теплоизоляционных и других материалов и изделий методом фильтрационного осаждения;
- технологии инженерии поверхности, обеспечивающие послойное формирование функциональных покрытий, в частности послойное электродуговое оксидирование.

Причём коэффициенты связности этих технологий с другими способами обеспечения качества продукции обычно лежат в пределах  $K_{св}=0,25-0,65$ , а их основной отличительной чертой, как правило является пространственно-временное совмещение процесса получения материала и конструкции из него.



а



б

**Рисунок 5 – Примеры реализации возможностей аддитивных формо- и структурообразующих технологий:**

*а – фитинг Российской космической обсерватория «Миллиметрон» (проект «Спектр-М») с фрагментом (диагностируемая зона) для УСД, б – образец дуговой наплавки (с применением порошковой проволоки марки EnDOtec DO\*390N) в среде защитного газа (100 % Ar*

Весьма характерным примером реализации основных физико-доминантных принципов аддитивных форма- и структурообразующих технологий, их связанности с другими методами изготовления и контроля деталей, является послойная электродуговая наплавка различных покрытий с использованием возможностей числового программного

управления этим процессом [15, 16]. Именно сочетание технических возможностей наплавки с ее эффективным управлением обеспечивает необходимую функциональную гибкость данного процесса аддитивного формирования покрытий в сочетании с широкими технологическими возможностями, которые в комплексе обеспечивают требуемые высокие эксплуатационно–ресурсные характеристики поверхностного слоя изделий ответственного назначения.

На рисунке 5 приведены некоторые типовые примеры реализации возможностей аддитивных формо– и структурообразующих технологий, дополненных иллюстрацией результативности ультразвуковой диагностики их качества.

Достаточно оперативная оценка свойств материала по результатам их УСД позволит вполне обоснованно судить о рациональности и стабильности технологического обеспечения качества изделий ответственного назначения, полученных с использованием аддитивных технологий, в частности методом СЛС (рисунок 5, а).

### Заключение

Таким образом, предлагаемый подход к изучению проблемы взаимодополнения технологий и их функциональной взаимосвязанности обладает высоким потенциалом научно–прикладной значимости. Особенно важна его полномасштабная реализация в сфере инновационных контрольно–диагностических и других информационно–физических технологий, как доминантной компоненты в системе обеспечения качества формо– и структурообразующих методов получения деталей и производства изделий ответственного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев, В.И., Левашкин Д.Г., Селиванов А.С. Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 70–74.
2. Хаскин, В.Ю., Шеягин В.Д., Бернацкий А.В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (обзор). Автоматическая сварка. 2015. № 5–6 (742). С. 30–33.
3. Каганович, Б.М., Филиппов С.П. Теоретические основы анализа эффективности комбинированных технологий Известия Российской академии наук. Энергетика. 2008. № 6. С. 116–126.
4. Сухочева, Е.Г., Коденцев С.Н. Технология комбинированной обработки каналов малого сечения с обеспечением эксплуатационных показателей. Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 11. С. 25–28.
5. Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении: учебное пособие/Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина.– Ульяновск: УлГТУ, 2015.–122 с.
6. Половко, А.М. Основы теории надежности/А.М. Половко, С.В. Гуров.– 2–е изд., перераб. и доп.– СПб.: БХВ–Петербург, 2006.–704 с.
7. Абашин, М.И. Возможности экспресс–оценки информационно– диагностических параметров изделий ультразвуковым методом. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4–3 (288). С. 128–133.
8. Ультразвуковая диагностика качества сварных швов Абашин М.И., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Коберник Н.В. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 12 (669). С. 52–61.
9. Ультразвуковое микросуспензирование жидкостей и гидротехнологических сред. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Литвин Н.К., Хафизов М.В., Абашин М.И. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2–3 (292). С. 3–8.
10. Механизмы гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды Абашин М.И., Хафизов М.В. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 13. С. 36.
11. Методы квалитметрии в машиностроении: Учеб. пособие / Под ред. В.Я. Кершенбаума, Р.М. Хвастунова. – М.: Технонефтегаз, 1999. –210с.
12. Экспертные оценки в квалитметрии машиностроения: Учебное пособие /Р.М.Хвастунов, О.И. Ягелло, В.М. Корнеева, М.П. Поликарпов. – М.: АНО «Технонефтегаз», 2002.–142 с.
13. Галиновский А.Л., Барзов А.А., Проваторов А.С. Изучение параметров гидросуспензий полученных методом ультразвуковой обработки. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. С. 2.

14. Барзов, А.А., Галиновский А.Л. Полифункциональные возможности ультраструйной технологии обработки материалов и жидкостей Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. № 4. С. 116–120.

15. Коберник, Н.В., Михеев Р.С., Орлик Г.В., Орлик А.Г., Алексеев А.Ю., Ковалев В.В. Формирование композиционных покрытий при дуговой наплавке с использованием гибкого шнурового материала // Сварка и диагностика. 2014. № 5. С. 23–27.

16. Гусев, А.И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. Наплавка порошковыми проволоками систем  $C - Si - Mn - Mo - V - B$  и  $C - Si - Mn - Cr - Mo - V$  деталей горнорудного оборудования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 4. С. 318–323.

**Галиновский Андрей Леонидович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
Доктор технических наук, доктор педагогических наук, Профессор  
Заведующий кафедрой СМ–12  
Тел. (495) 161–00–61, 8916 907–83–80  
E-mail: galcomputer@mail.ru

**Зарубина Ольга Васильевна**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
кандидат технических наук, доцент  
Тел., 8916 554–47–65  
E-mail: ov\_zarubina@mail.ru

**Барзов Александр Александрович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
доктор технических наук, профессор  
Тел., 8903 907–83–80  
E-mail: a.a.barzov@gmail.com

**Илюхина Анна Андреевна**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
Студент  
E-mail: opti156@yandex.ru

**Голубев Евгений Сергеевич**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
аспирант  
Тел., 8926 539–92–10  
E-mail: evgenijgolubev@rambler.ru

**Коберник Николай Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 105005, РФ  
кандидат технических наук, доцент  
Тел., 8910 427–24–53  
E-mail: koberniknv@yandex.ru

---

A.A. BARZOV, A.L. GALINOVSKY, E.V. GOLUBEV,  
A.A. ILYUKHINA, N.K. KOBERNIK, O.V. ZARUBINA

## **ANALYSIS OF THE CORELLATION OF THE FUNCTIONAL–PHYSICAL OPPORTUNITIES OF ADDITIVE AND ULTRA–JET TECHNOLOGIES**

**Abstract.** *A formalized approach is proposed for analyzing the synergistic enhancement of the possibilities of progressive production technologies, based on a quantitative definition of their interconnectedness. Using the example of the additive technology that is very popular nowadays – selective laser fusion and ultrasonic treatment of materials, their close interconnection is established, which ensures the expansion of their functionality in solving specific design and technological problems. It is shown that the complementarity and interconnectedness of modern technologies is important, first of all, in terms of their joint integrated implementation in the field of innovative fields of technology development. At the same time, it is noted that a number of traditional technologies, such as ultra–jet processing of materials, still do not reveal their scientific and practical potential, which allows to expand their fields of application in mechanical engineering and related industries.*

**Keywords:** *additive technologies, selective laser sintering, ultra – jet diagnostics, form and structure formation.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Malyshev, V. I., Levashkin D. G., Selivanov A.S. Hybrid and combined technologies automation are based on cnc-machine tool equipment modernization and kinematical connections choice. Vector of science of Togliatti state University. 2010. No. 3. P. 70–74.
2. Haskin, V. Yu., Shelyagin V.D., Bernatsky A.V. Current state and prospects of development of laser and hybrid surfacing technologies (review). The Paton Welding Journal. 2015. No. 2–6 (742). P. 30–33.
3. Kaganovich, B. M., Filippov S. P. Theoretical grounds for analysis of multiproduct technologies. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2008. No. 6. P. 116–126.
4. Sukhocheva, E.G., Kodentsev of S. N. Technology of the combined processing of channels of small section with maintenance of operation parameters. Strengthening technologies and coatings. 2007. No. 11. P. 25–28.
5. Fundamentals of the theory of reliability of technological processes in mechanical engineering: textbook/Y. M. Pravikov, G. R. Muslina. – Ulyanovsk: UISTU, 2015.–122 P.
6. Polovko, A. M. Fundamentals of reliability theory/A. M. Polovko, S. V. Gurov. 2 ed., Rev. and extra–SPb.: BHV–Petersburg, 2006.–704 P.
7. Abashin, M. I. Possibilities of express–estimate of product information–diagnostic parameters by ultra–jet method. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2011. No. 4–3 (288). P. 128–133.
8. Ultra–jet diagnostics of weld quality. Abashin M. I., Bochkarev S. V., Tsaplin A. I., Kobernik N. In. News of higher educational institutions. Engineering. 2015. No. 12 (669). P. 52–61.
9. Preparation of liquid suspensions using ultra–JET technology. Barzov A.A., Galinovsky A.L., Litvin N. K., Hafizes M.V., Abashin M. I. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2012. No. 2–3 (292). P. 3–8.
10. Mechanisms hydroerosion destruction of solid obstacles. Abashin M. I., Khafizov M. V. Science and education: scientific publication of MSTU. N. E. Bauman. 2011. No. 13. P. 36.
11. Methods of qualimetry in mechanical engineering: Study. the allowance / Under the editorship of V. Ya Kershenbaum, P. M. Hvastunova. – Moscow: Tekhnoneftegaz, 1999. – 210 P.
12. Expert assessments in the qualimetry of engineering: Textbook / R.M. Khvastunov, O.I. Yagello, V.M. Korneeva, M.P. Polikarpov. – M.: ANO "Tekhnoneftegaz", 2002.–142 P.
13. Galinovsky, AL, Barzov AA, Provatorov AS The study of the parameters of hydrosuspension obtained by the method of ultrasonic treatment. Science and Education: a scientific edition of the MSTU. N.E. Bauman. 2012. № 10. P. 2.
14. Kobernik, NV, Mikheev RS, Orlik GV, Orlik AG, Alekseev A.Yu., Kovalev V.V. Formation of composite coatings for arc welding with the use of flexible cord material // Welding and diagnostics. 2014. № 5. P. 23–27.
15. Gusev, A.I., Kibko N.V., Popova M.V., Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V. Surfacing of details of mining equipment by powder wires of C – Si – Mn – Mo – V – B AND C – Si – Mn – Cr – Mo – V systems. Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2017; 60(4): 318–323.

### **Galinsky Andrey Leonidovich**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University»  
(National Research University), Moscow, 105005, RF  
Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedagogy), professor  
Head of the Department of Technologies of Space–Rocket Engineering  
ph.: +7 (495) 161–00–61, +7 916 907–83–80  
E–mail: galcomputer@mail.ru

### **Zarubina Olga Vasilyevna**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University» (National Research University), Moscow, 105005, RF  
Cand. Sci. (Eng.), associate professor  
ph.: +7 916 554–47–65  
E–mail: ov\_zarubina@mail.ru

### **Barzov Alexander Alexandrovich**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University»  
(National Research University), Moscow, 105005, RF  
Dr. Sc. (Eng.), professor  
ph.: +7 903 907–83–80  
E–mail: a.a.barzov@gmail.com

### **Ilyukhina Anna Andreevna**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University» (National Research University), Moscow, 105005, RF  
Student  
E–mail: opti156@yandex.ru

### **Golubev Evgeny Sergeevich**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University»  
(National Research University), Moscow, 105005, RF  
PhD student  
ph.: +7 926 539–92–10  
E–mail: evgenijgolubev@rambler.ru

### **Kobernik Nikolai Vladimirovich**

FSEI HPE «Bauman Moscow State Technical University» (National Research University), Moscow, 105005, RF  
Cand. Sci. (Eng.), associate professor  
ph.: 8 910 427–24–53  
E–mail: koberniknv@yandex.ru

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЗУБЬЕВ СПИРОИДНЫХ КОЛЕС

**Аннотация.** В статье рассматриваются задачи прогнозирования шероховатости поверхности зубьев спироидного колеса от технологических условий обработки. Проведен анализ имеющихся результатов исследований по определению величины шероховатости при различных режимах формообразования. Показано, что для определения составляющего профиля шероховатости обусловленного геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента целесообразно использовать математическое отображение для нарезания зубьев спироидного колеса фрезой с ассиметричным профилем. Установлено, что по мере врезания зубьев фрезы в материал детали режущие кромки формируют сегмент определенной формы, анализ взаимного положения которых и позволяет вычислить составляющую  $h_1$  шероховатости. Величина шероховатости формируемая боковым режущим лезвием с  $30^\circ$  профилем практически в 2 раза меньше, чем шероховатость формируемая боковым режущим лезвием с профилем в  $10^\circ$ . Максимальная величина шероховатости для модулей 2 – 2,5 не превышает 9 – 12 мкм.

**Ключевые слова:** спироидная передача, шероховатость, кинематическая схема резания.

### Введение

Среди разновидностей спироидных передач наибольшее предпочтение в использовании отдается цилиндрическим спироидным передачам, которые широко применяются в приводах машин [1–3]. Это объясняется удобством изготовления и монтажа конструкции передачи. А также цилиндрические спироидные передачи берут преимущество перед традиционными передачами с перекрещивающимися осями в повышенной нагрузочной способности, надежности и долговечности, обусловленные улучшенными показателями геометрии и кинематики зацепления; высокой стойкости к ударным, вибрационным нагрузкам и кратковременным перегрузкам; больших, в сравнении с червячными передачами, КПД и износостойкости; компактности, плавности хода и бесшумности работы; возможность исключения обратного хода (самоторможение) [4].

По данным передачам в настоящее время имеется не мало исследований [5], но нет конкретных данных по технологии изготовления в доступной технической литературе. При ознакомлении с литературой, в которой освещены исследования спироидных передач, выявлен недостаток сведений о шероховатости зубьев спироидных колес.

### Основная часть

Цилиндрическая спироидная передача имеет в геометро–кинематических характеристиках особенность, а именно большой коэффициент перекрытия  $\varepsilon$  в зацеплении, в частности до 10 и более процентов зубьев спироидного колеса участвуют в одновременном зацеплении с витками спироидного червяка. В свою очередь у спироидного червяка в зацеплении находятся почти все витки.

Параметры рабочего зацепления цилиндрической спироидной передачи совпадают с параметрами станочного зацепления, так как реализуются по второму принципу Оливье (когда рабочий и производящий червяки идентичны друг другу) [6]. Соответственно при нарезании зубьев спироидного колеса у спироидной червячной фрезы участвуют почти все витки. Из-за этого задействовано в резании большое количество одновременно работающих зубьев. К примеру, во время резания у цилиндрической спироидной фрезы задействованы 6 витков и работают поочередно, то 2, то 3 зуба на одном витке, соответственно нагрузку на технологическую систему будут оказывать то 12, то 18 зубьев. Такое количество зубьев и их численная переменность приводят к весомому влиянию на точность формообразования зубьев спироидного колеса.

Процесс нарезания зубьев спироидного колеса требует проведения прогнозирования шероховатости. Анализ имеющихся результатов исследований по формированию шероховатости поверхностей при различных методах обработки позволяет расчетно–аналитическим путем определить основные параметры шероховатости и связать их с

параметрами режима резания и эксплуатационными характеристиками получаемой поверхности. Средняя высота профиля шероховатости в общем случае при всех методах механической обработки определяется равенством [7]:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;

$h_2$  – составляющая профиля шероховатости, зависящая от колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

$h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;

$h_4$  – составляющая профиля шероховатости, вносимая шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

Составляющая профиля шероховатости  $h_2$  при обработке червячной фрезой [8]:

$$h_2(\tau) = \frac{P(\tau)}{j}, \quad (2)$$

где  $P(\tau)$  – мгновенное значение силы резания на всех работающих зубьях в момент времени  $\tau$ ,  $j$  – жесткость технологической системы.

Пластическая деформация обрабатываемого материала в зоне резания приводит к увеличению высоты образующей шероховатости на величину  $h_3$ , которая рассчитывается по формуле:

$$h_3 = \frac{b_{\text{сдв}}}{\frac{1}{\tan \varphi} + \frac{2r}{s}}, \quad (3)$$

где  $b_{\text{сдв}}$  – величина пластического оттеснения.

Величина пластического оттеснения определяется по формуле:

$$b_{\text{сдв}} = 0,5\rho \left( 1 - \frac{\tau_{\text{сдв}}}{\sqrt{\tau_{\text{сдв}}^2 + \sigma_T^2}} \right), \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{сдв}}$  – прочность обрабатываемого материала на сдвиг,

$\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала,

$\rho$  – радиус скругления режущей кромки.

Для определения величины  $h_1$ , используя математическое отображение кинематической схемы резания, устанавливаем координаты точек при перемещении одного витка фрезы на один оборот для определения профиля сегмента. Математическое отображение схемы нарезания зубьев спироидного колеса при обработке спироидной червячной фрезой отражается зависимостью [9]:

$$\begin{aligned} X &= ((\Delta h + r_o) \cdot \cos \varphi + a_w) \cdot \sin(\psi + \Delta \psi) + \\ &+ \left( \pm \frac{\pi \cdot m}{4} \mp \Delta h \cdot \tan(\alpha_{1,2}) - (0,5 \cdot m \cdot \varphi) + B_1 \right) \cdot \cos(\psi + \Delta \psi); \\ Y &= ((\Delta h + r_o) \cdot \cos \varphi + a_w) \cdot \cos(\psi + \Delta \psi) + \\ &+ \left( \pm \frac{\pi \cdot m}{4} \mp \Delta h \cdot \tan(\alpha_{1,2}) - (0,5 \cdot m \cdot \varphi) + B_1 \right) \cdot \sin(\psi + \Delta \psi); \\ Z &= (\Delta h + r_o) \cdot \sin \varphi + S_o; \end{aligned} \quad (5)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты точек режущего лезвия при формировании зубьев спироидного колеса;

$\Delta h$  – параметр режущей кромки;

$r_o$  – величина смещения координат центра спироидной фрезы;

$\varphi$  – угол поворота фрезы относительно оси  $Z$ ;

$(0,5 \cdot m \cdot \varphi)$  – винтовой параметр;

$\psi$  – угол делительного движения между червячной фрезой и зубчатым колесом;

$\tan(\alpha_{1,2})$  – угол наклона левой и правой кромки зуба фрезы;

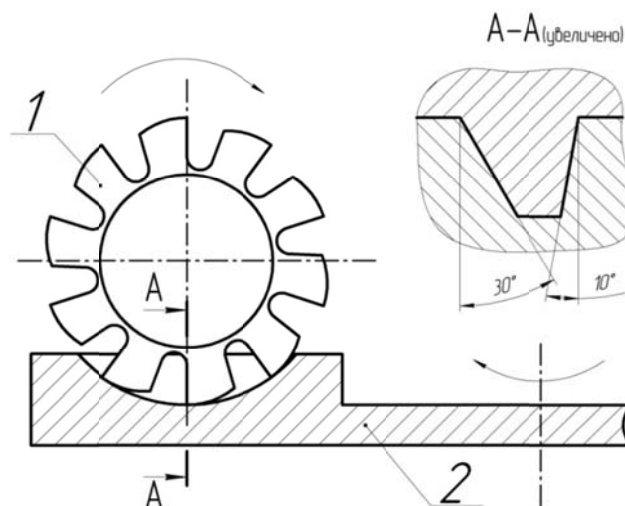
$m$  – модуль зацепления;

$a_w$  – межосевое расстояние;

$B_1$  – удаление торца червячной фрезы от межосевой осевой линии;

$S_o$  – осевая подача.

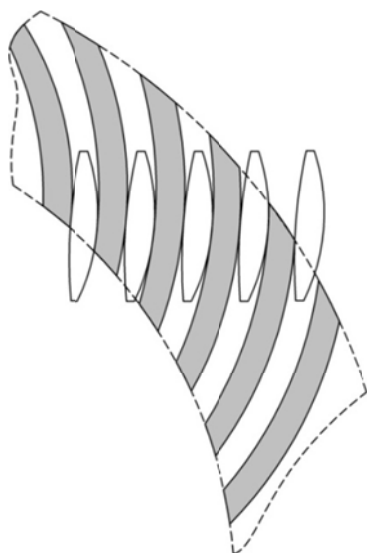
Спироидная червячная фреза внешне схожа с обычной червячной фрезой, характерным отличием является несимметричный профиль витков, математическая модель учитывает этот фактор. Специфичной чертой спироидного колеса является зубчатый венец, который располагается на торце колеса (рисунок 1). Подача инструмента происходит вдоль оси заготовки.



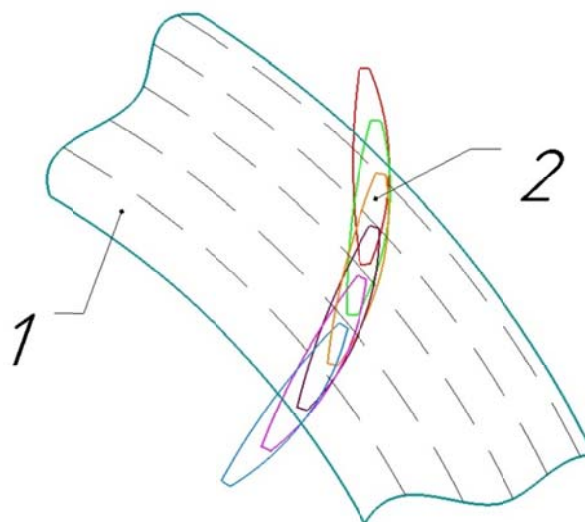
**Рисунок 1 – Сегмент формируемый спироидной червячной фрезой в венце спироидного колеса:**

1 – спироидная червячная фреза; 2 – заготовка спироидного колеса

По мере врезания зубьев фрезы в материал заготовки режущие кромки формируют сегмент определенной формы. Боковые кромки описывают две кривые линии, имеющие свой радиус, при чем каждая свой. Образаемая форма сегмента напоминает эллипс (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Форма и расположение сегментов в венце спироидного колеса**



**Рисунок 3 – Формирование впадины между зубьями колеса:**

1 – венец колеса; 2 – объединение нарезаемых сегментов

Формирование впадины зубьев спироидных колес производится за счет объединения нарезаемых сегментов (рисунок 3). Само объединение происходит из-за взаимного поворота

заготовки (колеса) и перемещения витков фрезы из одной впадины в следующую. В свою очередь витки имеют определенный шаг и занимают установленный радиус на винце колеса.

На рисунке 3 штриховые линии проходят через центр профиля сегмента и показывают их нахождение на венце по определенным радиусным участкам.

При определении микронеровностей боковых поверхностей зубьев спироидных колес необходимо учитывать сложную геометрию формирования впадин между зубьями колеса. У объединенных профилей есть характерная черта, рядом находящиеся сегменты пересекаются правой и левой боковыми сторонами профиля в двух точках (рисунок 4). В этих местах пересечения образуется микронеровность, которая дает основное влияние на качество боковых поверхностей зубьев спироидного колеса. Каждая сторона профиля имеет свой радиус.



Рисунок 4 – Точки пересечения профилей сегментов

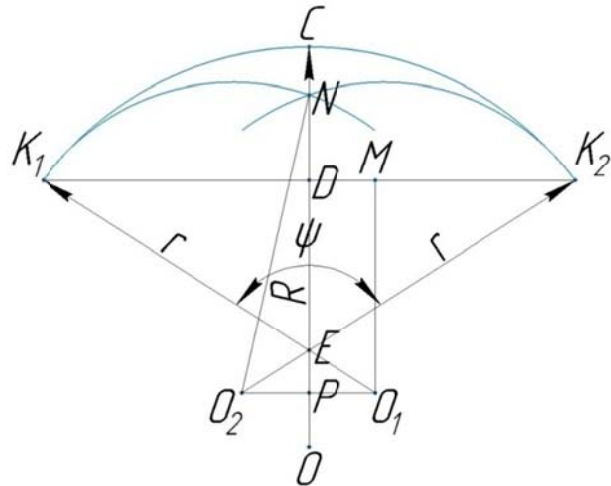


Рисунок 5 – Определение расчетных микронеровностей обработанной поверхности впадины

С помощью математического отображения схемы резания определяется профиль нарезаемого сегмента. Для определения размеров профиля применима любая современная система CAD.

Для определения микронеровностей в точках пересечения профилей сегментов используется методика изложенная в работе [10]. Эта методика в первую очередь направлена на определение высоты гребешка  $h_1$  между соседними резами, но и применима для геометрических определений микронеровностей между двумя пересекающимися дугами и пересекающей их дуги в двух крайних точках этих дуг.

Реальные формируемые впадины зубьев спироидного колеса имеют форму участка спиральной линии, для вычислений спиральная линия аппроксимируется в радиусные дуги.

Для определения высоты микронеровности  $h_1$  рассмотрим  $\triangle K_1MO_1$ ,  $\triangle O_2EP$ , и  $\triangle O_2NP$  (рисунок 5). Вершиной неровности является точка пересечения двух боковых дуг соседних сегментов (точка N). Две боковые дуги имеют одинаковый радиус.

Определяем высоту микронеровности  $h_1$ :

Хорда  $K_1K_2$  – это расстояние между двумя точками, которые располагаются между тремя пересечениями в центре дуг соседних сегментов, средним пересечением является точка N.

$$CD = R - \sqrt{R^2 - \frac{(K_1K_2)^2}{4}}, \quad (6)$$

$$ND = NP - DP, \quad (7)$$

$$DP = MO_1 = K_1O_1 \cdot \cos(\psi / 2) = r \cdot \cos(\psi / 2), \quad (8)$$

$$K_2E = (K_1K_2 / 2) / \sin(\psi / 2), \quad (9)$$

$$EO_2 = K_2 O_2 - K_2 E = r - K_2 E, \quad (10)$$

$$PO_2 = PO_1 = EO_2 \cdot \sin(\psi / 2), \quad (11)$$

$$NP = \sqrt{(NO_2)^2 - (PO_2)^2} = \sqrt{r^2 - (PO_2)^2}, \quad (12)$$

$$h_1 = CN = CD - ND. \quad (13)$$

### Заключение

Установлено, что по мере врезания зубьев фрезы в материал детали режущие кромки формируют сегмент определенной формы, анализ взаимного положения которых и позволяет вычислить упомянутую составляющую шероховатости. Величина шероховатости формируемая боковым режущим лезвием с  $30^\circ$  профилем практически в 2 раза меньше, чем шероховатость формируемая боковым режущим лезвием с профилем в  $10^\circ$ . Максимальная величина шероховатости для модулей 2 – 2,5 не превышает 9 – 12 мкм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анферов, В.Н. Особенности проектирования приводов машин с самотормозящими цилиндрическими спироидными передачами / В.Н. Анферов, А.В. Кузьмин // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 8. – С. 47 – 50.
2. Опыт применения спироидных передач в механизмах подъемно–транспортных машин / В.Н. Анферов [и др.] // Сибирский государственный университет путей сообщения. Вестник. – Новосибирск, 2012. – Вып. 28. – С. 179 – 190.
3. Спироидная передача в механизмах подъемно–транспортных машин / В.Н. Анферов, А.П. Ткачук, И.В. Сергеева, Ю.В. Корнеев, А.В. Кузьмин // Строительные и дорожные машины. – 2012. – № 1. – С. 14 – 18.
4. Анферов, В.Н. Сравнительная оценка антифрикционных свойств трансмиссионных масел для спироидных передач / В.Н. Анферов, А.П. Ткачук, И.В. Сергеева, А.В. Кузьмин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4 (3). – С. 671 – 675.
5. Гольдфарб, В.И. Научная школа института механики в области развития теории и практики спироидных передач / В.И. Гольдфарб // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – №2 (24). – С. 31 – 35.
6. Савельева, Т.В. Особенности проектирования спироидной передачи на основе унифицированного зуборезного инструмента / Т.В. Савельева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 56 – 59.
7. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.: ил.
8. Полохин, О.В. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2006. – 148 с.
9. Пешехонов, К.Ю. Особенности математического моделирования процесса нарезания зубьев спироидных колес / К.Ю. Пешехонов, А.С. Тарапанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2016. – № 6 (320). – С. 77 – 81.
10. Стеблецов, Ю.Н. Шероховатость поверхности зубьев зубчатых колес передачи Новикова / Ю.Н. Стеблецов // Материалы 3–ей международной научно–технической конференции "Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения". – Брянск: Брянский ГТУ. – 2011. – С. 228 – 229.

**Пешехонов Константин Юрьевич**  
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел  
Аспирант  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
E-mail: topmega2014@yandex.ru

**Тарапанов Александр Сергеевич**  
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
E-mail: tarapanov@rambler.ru

K.Yu. PESHEKHONOV, A.S. TARAPANOV

## PREDICTION OF ROUGHNESS IN THE FORMING OF THE TEETH SPIROID GEARS

**Abstract.** The article deals with the problems of forecasting the roughness of the surface of the spiroid wheel teeth from technological the processing conditions. The analysis of the available results of studies to determine the

*roughness in different modes of forming. Shown that to determine the component of the roughness profile caused by geometry and kinematics of the moving working part of the tool it is advisable to use a mathematical mapping to the cutting tooth of spiroid wheel cutter with an asymmetrical profile. Installed that as the teeth of the cutter are embedded into the part material, the cutting edges form a segment of a certain shape, the analysis of the mutual position of which allows to calculate the component  $h_1$  roughness. The roughness value formed by a side cutting blade with 30 profile is almost 2 times less than the roughness formed by a side cutting blade with a profile of 10. The maximum roughness for modules 2–2,5 does not exceed 9 – 12 microns.*

**Keyword:** spiroid gear, roughness, kinematic scheme cutting.

## BIBLIOGRAPHY

1. Anferov, V.N. Osobennosti proektirovaniya privodov mashin s samotormozyashchimi cilindricheskimi spiroidnymi peredachami / V.N. Anferov, A.V. Kuzmin // Stroitelnye i dorozhnye mashiny. – 2015. – № 8. – S. 47 – 50.
2. Opyt primeneniya spiroidnyh peredach v mekhanizmah pod"emno–transportnyh mashin / V.N. Anferov [i dr.] // Sibirskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. Vestnik. – Novosibirsk, 2012. – Vyp. 28. – S. 179 – 190.
3. Spiroidnaya peredacha v mekhanizmah pod"emno–transportnyh mashin / V.N. Anferov, A.P. Tkachuk, I.V. Sergeeva, YU.V. Korneev, A.V. Kuzmin // Stroitelnye i dorozhnye mashiny. – 2012. – № 1. – S. 14 – 18.
4. Anferov, V.N. Sravnitel'naya ocenka antifrikcionnyh svojstv transmissionnyh masel dlya spiroidnyh peredach / V.N. Anferov, A.P. Tkachuk, I.V. Sergeeva, A.V. Kuzmin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2011. – T. 13. – № 4 (3). – S. 671 – 675.
5. Goldfarb, V.I. Nauchnaya shkola instituta mekhaniki v oblasti razvitiya teorii i praktiki spiroidnyh peredach / V.I. Goldfarb // Intellektualnye sistemy v proizvodstve. – 2014. – №2 (24). – S. 31 – 35.
6. Saveleva, T.V. Osobennosti proektirovaniya spiroidnoj peredachi na osnove unificirovannogo zuboreznogo instrumenta / T.V. Saveleva // Intellektualnye sistemy v proizvodstve. – 2012. – № 2 (20). – S. 56 – 59.
7. Inzheneriya poverhnosti detalej / A.G. Suslov [i dr.], pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.: il.
8. Polohin, O.V. Issledovanie i proektirovanie processov zubonarezaniya instrumentami chervyachnogo tipa / O.V. Polohin, A.S. Tarapanov, G.A. Harlamov. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 148 s.
9. Peshekhonov, K.YU. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya processa narezaniya zubev spiroidnyh koles / K.YU. Peshekhonov, A.S. Tarapanov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU imeni I.S. Turgeneva. – 2016. – № 6 (320). – S. 77 – 81.
10. Steblecov, YU.N. SHerohovatost poverhnosti zubev zubchatyh koles peredachi Novikova / YU.N. Steblecov // Materialy 3–ej mezhdunarodnoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii "Modernizaciya mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii na nauchnyh osnovah tekhnologii mashinostroeniya". – Bryansk: Bryanskij GTU. – 2011. – S. 228 – 229.

**Peshekhonov Konstantin Yurevich**

OSU after I.S. Turgeneva, Orel

Postgraduate

302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95

E-mail: topmega2014@yandex.ru

**Tarapanov Aleksandr Sergeevich**

OSU after I.S. Turgeneva, Orel

Doctor of Engineering, professor

302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95

E-mail: tarapanov@rambler.ru

## РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ ПРИ ГЕТЕРОГЕННОМ УПРОЧНЕНИИ РЕЖУЩЕ–ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ ППД

**Аннотация.** Предложено использовать для повышения эксплуатационных свойств точных и нежестких деталей комбинированную режущо–деформирующую обработку поверхностным пластическим деформированием, позволяющую формировать гетерогенную структуру поверхностного слоя. Способ заключается в обкатывании нарезанного на заготовке волнистого рельефа. Проведено моделирование гетерогенного упрочнения режущо–деформирующей обработкой ППД методом конечных элементов в программе DEFORM 2D. С помощью моделирования установлено, что наиболее рациональным является нарезание перед ППД рельефа треугольного профиля с углом  $90^\circ$ , обеспечивающего в поверхностном слое упрочняемой детали наибольшую степень деформации и, следовательно, упрочнения, при отсутствии закатов. Исходя из условия равенства объемов металла до и после деформирования получена формула для расчета диаметра заготовки под режущо–деформирующую обработку наружных цилиндрических поверхностей ППД.

**Ключевые слова:** гетерогенное упрочнение, поверхностное–пластическое деформирование, режущо–деформирующая обработка, метод конечных элементов.

### Введение

Известно, что значительное повышение эксплуатационных свойств деталей машин может быть достигнуто путем формирования на их рабочих поверхностях гетерогенной структуры в виде чередующихся участков высокой и низкой твердости [1, 2, 3]. Чередование в гетерогенном слое упрочненных твердых участков с менее упрочненными вязкими способствует торможению развития микротрещин и повышению усталостной прочности материала [1, 2]. При абразивном изнашивании поверхности твердые включения в пластичной основе затрудняют контакт абразивных частиц с материалом основы, что позволяет многократно увеличить износостойкость по сравнению с равномерно упрочненным поверхностным слоем [3].

Одним из наиболее эффективных способов поверхностного гетерогенного упрочнения с точки зрения повышения усталостной прочности является обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) [2, 3]. Для получения гетерогенных структур при упрочнении точных и нежестких деталей целесообразно использовать комбинированную режущо–деформирующую обработку ППД [4]. При реализации режущо–деформирующей обработки ППД на упрочняемой поверхности заготовки вначале нарезается волнистый рельеф (рисунок 1) в направлении, близком к направлению оси заготовки. Затем деталь подвергается обкатыванию гладким цилиндрическим роликом с целью формирования гладкой рабочей поверхности детали. При деформировании металл перемещается роликом из выступов нарезанного рельефа во впадины. Рельеф на заготовке при этом располагается относительно номинального размера детали таким образом, чтобы объем его выступов был равен объему впадин.

### Основная часть

Степень и равномерность упрочнения при режущо–деформирующей обработке ППД будут зависеть от параметров волнистого рельефа: его формы, шага  $P$ , высоты  $h$ . Влияние формы и размеров инструмента менее значительно. С точки зрения технологии нарезания наиболее предпочтительными являются профили треугольной и круглой формы. Для сравнения результатов обкатывания рельефа различной формы проведено моделирование данного процесса. При моделировании был использован наиболее эффективный для исследования больших пластических деформаций метод конечных элементов (МКЭ) [4, 5]. Для моделирования ППД с помощью МКЭ использовалась программа DEFORM 2D.

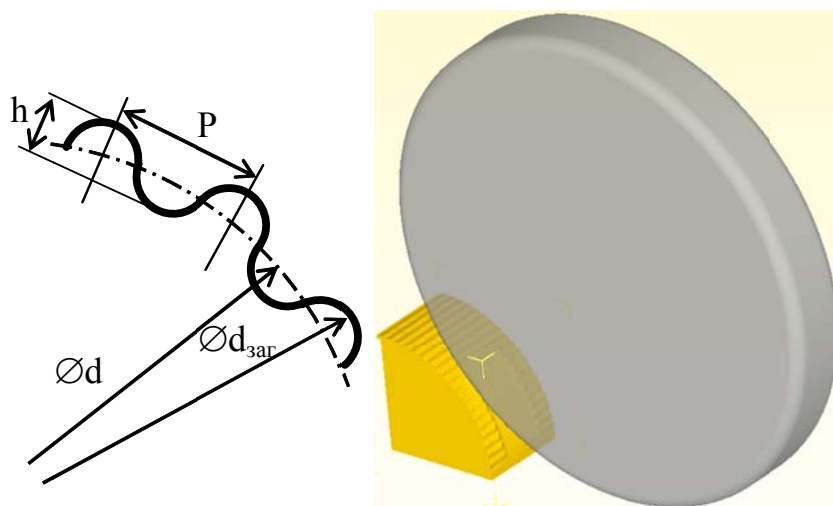


Рисунок 1 – Схема гетерогенного упрочнения режуще-деформирующей обработкой ППД

Механические свойства материала модели (сталь 45) задавались выбором диаграммы пластичности из встроенной базы DEFORM. Скорость накатывания при моделировании составляла 5 мм/с. Диаметр инструмента был принят равным 10 мм, шаг нарезаемого профиля 1 мм. Поскольку деформации от резания значительно меньше деформаций, возникающих при пластическом деформировании [6], предварительное моделирование нарезания не производилось, а нарезанный профиль задавался начальной геометрией заготовки.

Эквивалентные деформации при ППД волнистого рельефа с различной формой профиля, полученные при моделировании с помощью МКЭ, приведены на рисунке 2.

Распределение эквивалентных деформаций на глубине 0,1 мм под поверхностью детали при обкатывании круглого и треугольного профиля для 4-х крайних левых витков на рисунке 2 приведено на рисунке 3. Из рисунков 2 и 3 видно, что треугольный профиль обеспечивает большую степень деформации и, следовательно, упрочнения, по сравнению с круглым. Наибольшая степень деформации при этом обеспечивается более острым профилем. Однако при обкатывании острого профиля возможно образование складок – закатов. В связи с этим, наиболее предпочтительным для гетерогенного упрочнения режуще-деформирующей обработкой ППД представляется использование треугольного профиля с углом профиля 90°. Шаг рельефа ППД не должен превышать 1,5 мм, а высота 0,7 мм. Повышение усталостной прочности при этом может достигать 1,5 раз и более [4].

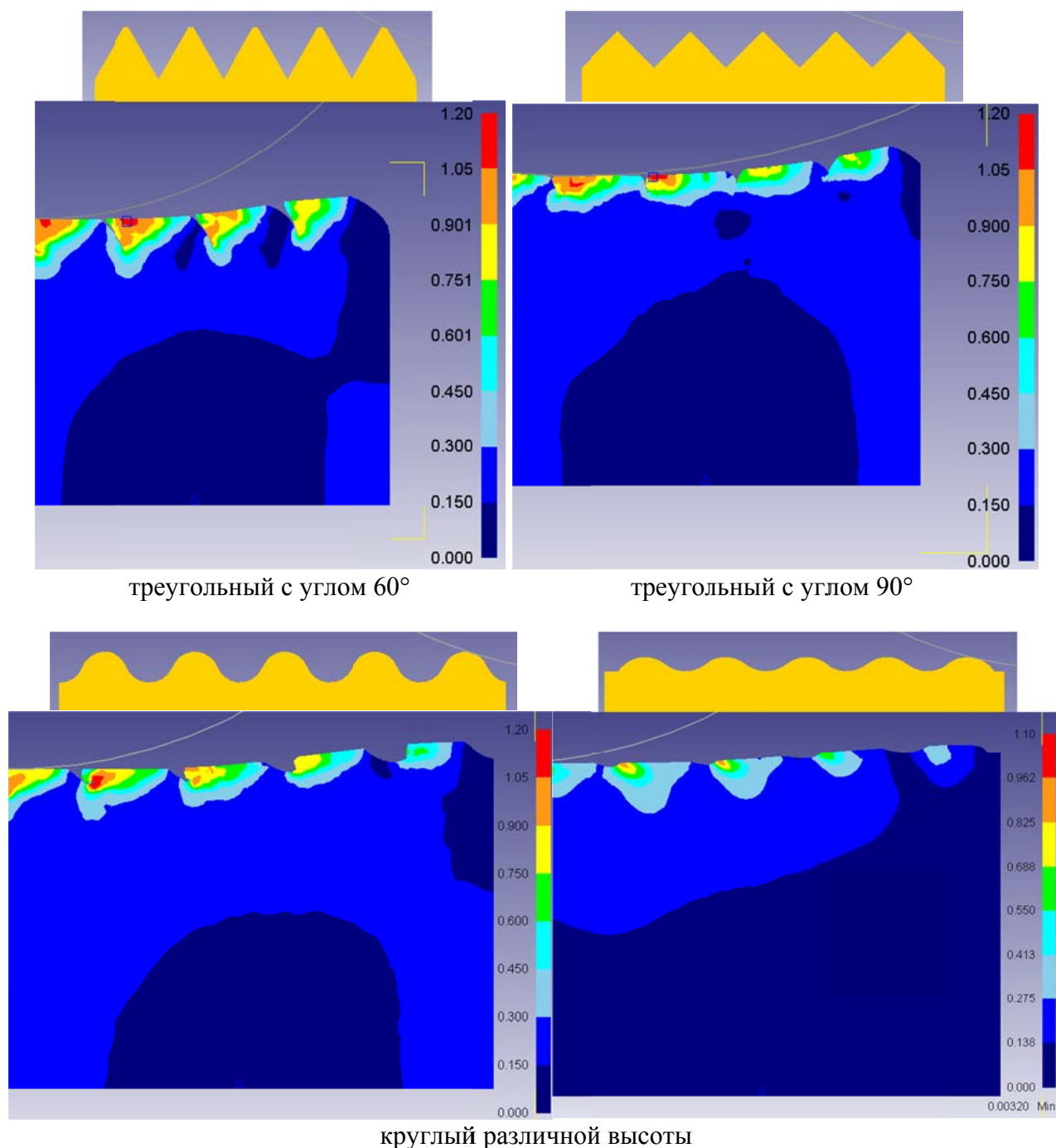
Крайне важным при режуще-деформирующей обработке является выбор диаметра заготовки. При последующем ППД упругим инструментом от диаметра заготовки будет зависеть получаемый окончательный диаметр детали. При ППД жестким инструментом неправильный выбор диаметра заготовки приведет либо к получению поверхности детали с раковинами из-за недостатка металла, либо к поломке инструмента из-за его избытка.

Диаметр заготовки под упрочнение ППД может быть рассчитан исходя из принципа равенства объемов материала до и после деформирования и отсутствия удлинения заготовки при ППД [7, 8]. При режуще-деформирующей обработке наружных цилиндрических поверхностей наружный диаметр заготовки с нарезанным на ней рельефом треугольного профиля может быть рассчитан по формуле

$$d_{\text{заг}} = \frac{\frac{P}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \sqrt{\left(\frac{P}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right)^2 - 4 \left(\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{3} - d^2\right)}}{2} \quad (1)$$

где  $d$  – номинальный диаметр детали;

$P$  – шаг нарезаемого рельефа;  
 $\alpha$  – угол профиля нарезаемого рельефа.



*Рисунок 2 – Эквивалентные деформации при ППД волнистого рельефа с различной формой профиля*

Контурный график зависимости диаметра заготовки от шага рельефа и номинального диаметра детали, при угле профиля нарезаемого рельефа 90°, полученный расчетом по формуле (1), приведен на рисунке 4.

При сложной криволинейной форме профиля предварительно нарезаемого рельефа диаметр заготовки может быть определен путем 3D моделирования в САД системах [7].

Формула (1) основана только на геометрических построениях и не учитывает механические свойства материала заготовки. В связи с этим, при выборе диаметра заготовки на практике, рассчитанный по данной формуле диаметр необходимо уточнять путем проведения пробного экспериментального накатывания на ступенчатой заготовке. Разница между диаметрами ступеней на пробной заготовке для диапазона номинальных диаметров

детали 20...200 мм принимается равной 0,01...0,10 мм, в зависимости от величины номинального диаметра. Количество ступеней выбирается в пределах 4–6 в меньшую и большую стороны от рассчитанного по формуле (1) диаметра. За диаметр заготовки окончательно принимается диаметр наименьшей ступени, на поверхности которой после пробного обкатывания жестким инструментом, настроенным на номинальный диаметр детали, не было раковин.

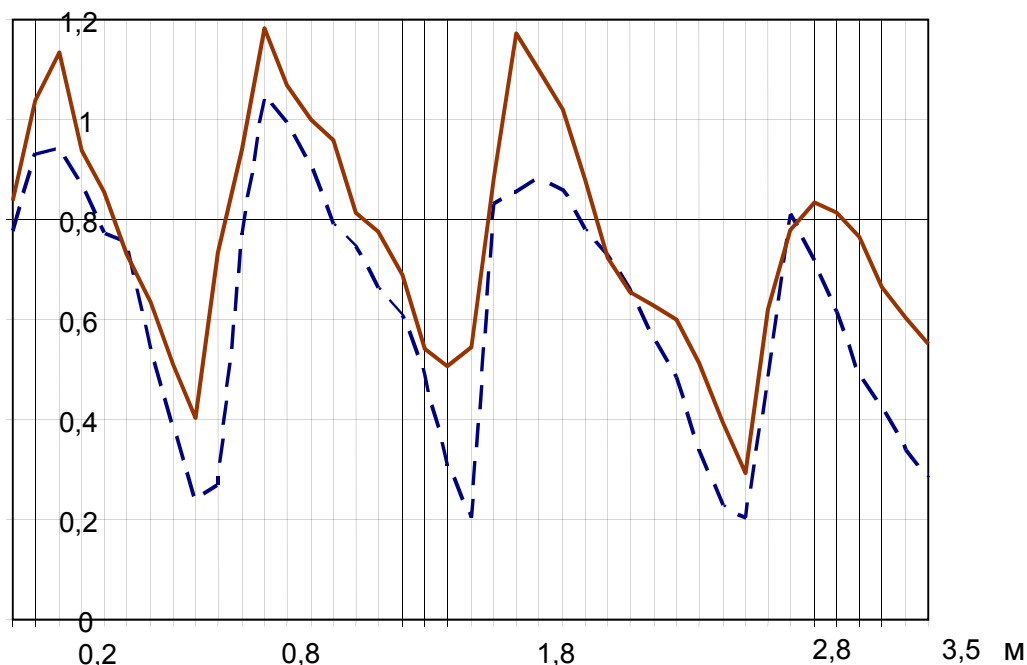


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных деформаций на глубине 0,1 мм под поверхность детали:

— треугольный профиль с углом 90°; — — — — — круглый профиль.

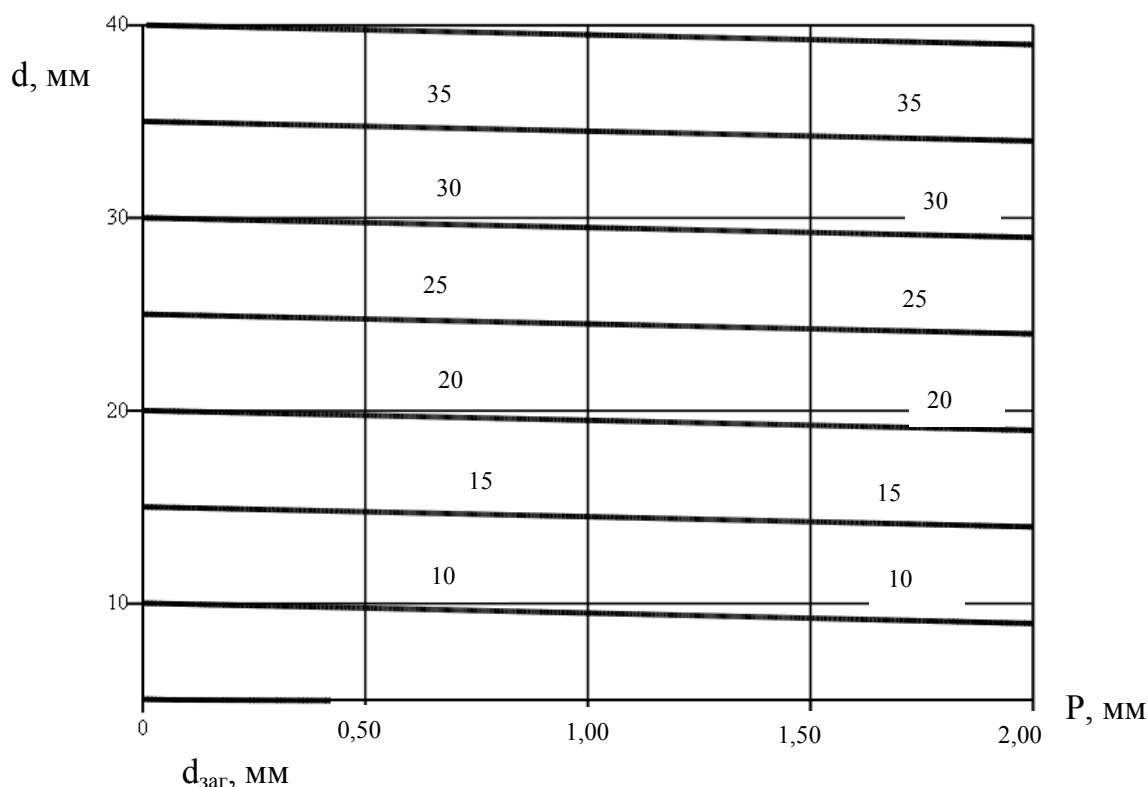


Рисунок 4 – Контурный график зависимости диаметра заготовки от шага треугольного рельефа  $P$  и номинального диаметра детали  $d$ , мм

Допуск на диаметр заготовки назначается равным допуску на номинальный диаметр детали.

### **Заключение**

Основными размерами заготовки при гетерогенном упрочнении цилиндрических поверхностей режуще–деформирующей обработкой ППД являются шаг и высота нарезанного рельефа и наружный диаметр заготовки. В результате проведенных теоретических исследований установлено, что наиболее предпочтительным для гетерогенного упрочнения режуще–деформирующей обработкой ППД представляется использование предварительно нарезанного рельефа треугольного профиля с углом 90° и шагом до 1,5 мм. Наружный диаметр заготовки может быть предварительно рассчитан исходя из равенства объемов до и после деформирования, а затем уточнен путем обкатывания пробной ступенчатой заготовки.

Выполнение приведенных рекомендаций позволит обеспечить существенное (до полутора раз) повышение усталостной прочности тяжело нагруженных поверхностей.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов, Г.П. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры / Г.П. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худошин // Строительные и дорожные машины. – 1997, № 1. – С. 33–34.
2. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико–импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2007, №12. – С. 28–31.
3. Смелянский, В.М. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий / В.М. Смелянский, В.А. Земсков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005, № 1. – С. 27–35.
4. Афонин, А.Н. Гетерогенное упрочнение деталей горно–металлургических машин поверхностным пластическим деформированием / А.Н. Афонин, А.И. Ларин, А.В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. Том 58. № 11. – С. 823 – 828.
5. Mohammadi, F. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process / F. Mohammadi, R. Sedaghati, A. Bonakdar // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February. – 2014, Volume 70, Issue 5–8. – Pp. 1337–1354.
6. Киричек, А.В. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе–режущей обработки. Коллективная монография / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.Р. Ингеманссон и др. Под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 328 с.
7. Киричек, А.В., Резьбонакатывание. Библиотека технолога / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
8. Лапин, В.В. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов, Ю.И. Сизов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 228 с.

#### **Афонин Андрей Николаевич**

НИУ «БелГУ», г.Белгород  
Доктор технических наук., проф. кафедры  
материаловедения и нанотехнологий  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85  
Тел. (4722) 30–18–28  
E-mail: afonin@bsu.edu.ru

#### **Ларин Анатолий Иванович**

СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол  
Аспирант кафедры ТОММ  
302020, Белгородская обл., г. Старый Оскол, мкр.  
Макаренко, 42  
Тел. (4725) 45–12–12  
E-mail: larin.a.i@yandex.ru

#### **Макаров Алексей Владимирович**

СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол  
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой ТОММ  
302020, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42  
Тел. (4725) 45–12–12  
E-mail: makarov.av@mail.ru

A.N. AFONIN, A.I. LARIN, A.V. MAKAROV

## CALCULATION OF DIMENSIONS OF WORKPIECE FOR HETEROGENEOUS HARDENING OF CUTTING–FORMING PROCESSING SPD

**Abstract.** *It is suggested to use combined cutting–forming processing with surface plastic deformation to increase the operational properties of precise and non–rigid parts, which makes it possible to form a heterogeneous structure of the surface layer. The method consists in rolling the undulating relief cut on the workpiece. Modeling of heterogeneous hardening by the cutting–forming processing of SPD by the finite element method in the DEFORM 2D program has been carried out. With the help of modeling it is established that the most rational is cutting before the SPD a relief of a triangular profile with an angle of 90°, which provides the greatest degree of deformation in the surface layer of the part to be cleaned and, consequently, hardening, in the absence of folds. Proceeding from the condition of equality of metal volumes before and after deformation, a formula is obtained for calculating the diameter of the workpiece for cutting and deforming treatment of external cylindrical surfaces of SPD.*

**Keywords:** *heterogeneous hardening, surface–plastic deformation, cutting–forming processing, finite element method.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Ivanov, G.P. Increase of wear resistance of parts by creation of a regular heterogeneous macrostructure / G.P. Ivanov, L.V. Kartanova, A.A. Khudoshin // *Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny*. – 1997, No. 1. – Pp. 33–34.
2. Kirichek, A.V. Creation of a heterogeneous material structure by static–pulse processing / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev // *STIN*. – 2007, №12. – Pp. 28–31.
3. Smelyansky, V.M. Technological increase in wear resistance of parts by the method of electroerosive coatings synthesis / V.M. Smelyansky, V.A. Zemskov // *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. – 2005, No. 1. – Pp. 27–35.
4. Afonin, A.N. Heterogeneous hardening of parts of mining and metallurgical machines by surface plastic deformation / A.N. Afonin, A.I. Larin, A.V. Makarov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. – 2015. Volume 58. № 11. – Pp. 823 – 828.
5. Mohammadi, F. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process / F. Mohammadi, R. Sedaghati, A. Bonakdar // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, February. – 2014, Volume 70, Issue 5–8. – Pp. 1337–1354.
6. Kirichek, A.V. Effective technologies of stretching, broaching and forming–cutting processing. Collective monograph / S.K. Ambrosimov, A.N. Afonin, A.R. Ingemansson et al. Ed. by A.V. Kirichek. – M.: "Spektr" Publishing House, 2011. – 328 p.
7. Kirichek, AV, Thread rolling. Library of the technologist / A.B. Kirichek, A.N. Afonin. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2009. – 312 p.
8. Lapin, V.V. Rolling of threads, worms, splines and gears / V.V. Lapin, M.I. Pisarevsky, V.V. Samsonov, Yu.I. Sizov. – L.: Mashinostroyeniye, Leningr. Deposition, 1986. – 228 p.

#### Afonin Andrey Nikolaevich

NIU "BelGU", Belgorod  
Doctor of Technical Sciences., Prof. Department of  
Materials Science and Nanotechnology  
308015, Belgorod, Pobedy str., 85  
Tel. +7 (4722) 30–18–28  
E-mail: afonin@bsu.edu.ru

#### Larin Anatoly Ivanovich

STI NITU "MISIS", Stary Oskol  
Post-graduate student of department TOMM  
302020, Belgorod Region, Stary Oskol, md. Makarenko,  
42  
Tel. +7 (4725) 45–12–12  
E-mail: larin.a.i@yandex.ru

#### Makarov Alexey Vladimirovich

STI NITU "MISIS", Stary Oskol  
PhD, Docent, Head. Chair of department TOMM  
302020, Stary Oskol, md. Makarenko, 42  
Tel. +7 (4725) 45–12–12  
E-mail: makarov.av@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ТОЛЩИНУ ДЕТАЛИ ПОЛУЧАЕМОЙ СОВМЕЩЕНИЕМ ОПЕРАЦИЙ РАЗДАЧИ, ОБЖИМА, ВЫТЯЖКИ И ОТБОРТОВКИ

**Аннотация.** В статье рассмотрено получение детали совмещением операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки. С помощью программного комплекса Autoform проведено моделирование процесса при использовании различной толщины исходной заготовки, определено влияние данного параметра на толщину полученной детали, представлены графики зависимости максимального относительного утонения и максимального относительного утолщения конической детали от относительной толщины исходной заготовки. Показаны участки с наибольшей и наименьшей толщиной полученного изделия.

**Ключевые слова:** совмещенная операция, раздача, обжим, вытяжка, отбортовка, моделирование, толщина исходной заготовки, максимальное относительное утонение, максимальное относительное утолщение.

### Введение

Во всех отраслях промышленности широко применяются конические детали для различных соединений трубных деталей. На данный момент чаще всего детали данного типа изготавливаются много переходной вытяжкой или совмещением раздачи и обжима из трубной заготовки [1]. Также известен способ получения подобных деталей совмещением операций вытяжки с обжимом и раздачей [2]. Однако данные способы помимо очевидных достоинств имеют ограничения по достижимому формоизменению. Для получения большего коэффициента формоизменения при наименьшем возможном расходе материала был предложен способ получения конических деталей путем совмещения операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки из предварительно вытянутого стаканчика с пробитым в доньшке отверстием [3]. Схема осуществления совмещенной операции представлена на рисунке 1. Совмещение четырех операций в одном технологическом переходе предопределяет наличие сложного очага пластической деформации.

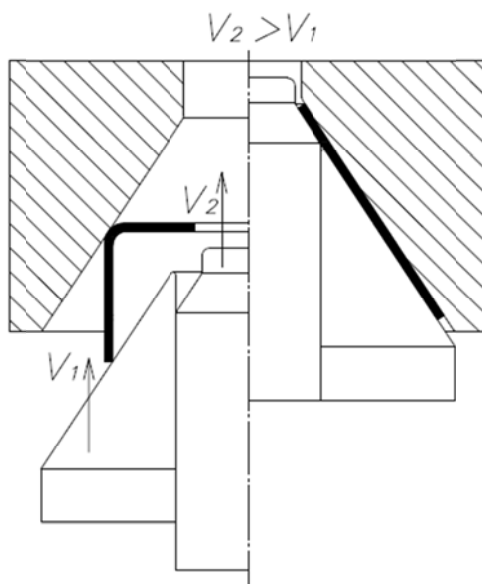


Рисунок 1 – Схема осуществления совмещенной операции

Исследование указанного очага пластической деформации аналитическими методами весьма затруднительно. Поэтому в качестве инструмента анализа был выбран метод математического моделирования в программе комплексе AutoForm.

### Основная часть

Одним из важных параметров в операциях листовой штамповки, является относительная толщина исходной заготовки  $S_{отн}$ , которая определяется как:

$$S_{отн} = \frac{S_{заг}}{D_{заг}}, \quad (1)$$

где  $S_{заг}$  – толщина заготовки,

$D_{заг}$  – диаметр исходной круглой заготовки, используемой для вытяжки стаканчика перед совмещенной операцией.

Для определения влияния относительной толщины исходной заготовки на толщину получаемой детали, было проведено моделирование процесса совмещения операций раздача, обжим, вытяжка и отбортовка из предварительно вытянутого стаканчика с пробитым отверстием в доньшке.

При этом с помощью программного комплекса AutoForm моделировался как процесс получения стаканчика, так и последующий процесс совмещения операций.

За основу была взята деталь из стали 08кп с размерами, указанными на рисунке 2, и имеющая коэффициент формоизменения (отношение диаметров) 4,5.

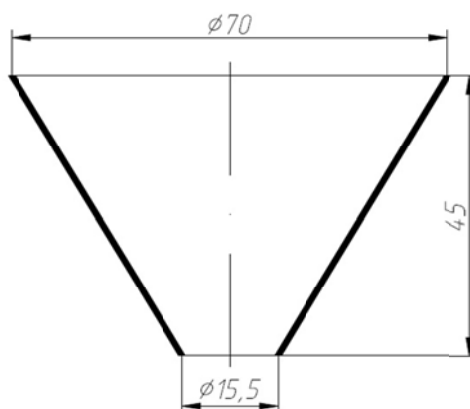


Рисунок 2 – Получаемая деталь

Для анализа и сравнения были взяты заготовки, имеющие следующие относительные толщины 0,005, 0,009, 0,014, 0,018, 0,023 и 0,028.

В процессе моделировании заготовок с различными относительными исходными толщинами внимание было обращено как на максимальное относительное утонение полученной детали  $\Delta S_{уто́н}$  и максимальное относительное утолщение  $\Delta S_{утолщ}$ , которые определяются как:

$$\Delta S_{уто́н} = \frac{S_{min} - S_{заг}}{S_{заг}}, \quad (2)$$

$$\Delta S_{утолщ} = \frac{S_{max} - S_{заг}}{S_{заг}}, \quad (3)$$

где  $S_{min}$  и  $S_{max}$  – минимальная и максимальная толщина полученной детали соответственно.

Анализ изменения максимального относительного утонения полученной детали показал, что с увеличением относительной толщины заготовки, абсолютное значение максимального относительного утонения детали увеличивается (рисунок 3).

При этом, как видно из графика (рисунок 3), максимальное относительное утонение незначительно уменьшается от (–0,174) до (–0,158), при относительной толщине заготовки 0,009, затем незначительно увеличивается до (–0,234) при относительной толщине 0,019, затем резко увеличивается до значения (–0,478) при относительной толщине 0,028.



Рисунок 3 – График зависимости максимального относительного утонения полученной детали от относительной толщины исходной заготовки

Анализ изменения максимального относительного утолщения полученной детали показал, что чем больше относительная толщина заготовки, тем меньше максимальное относительное утолщение полученной детали (рисунок 4).

Что касается максимального относительного утолщения, то оно практически линейно уменьшается от значения 0,135 при относительной толщине 0,005 до значения 0,093 при относительной толщине 0,028.

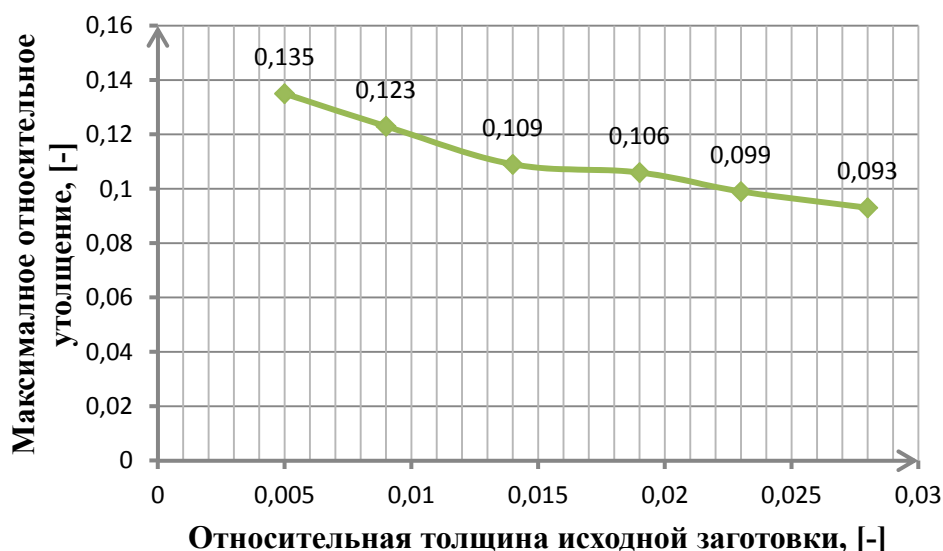
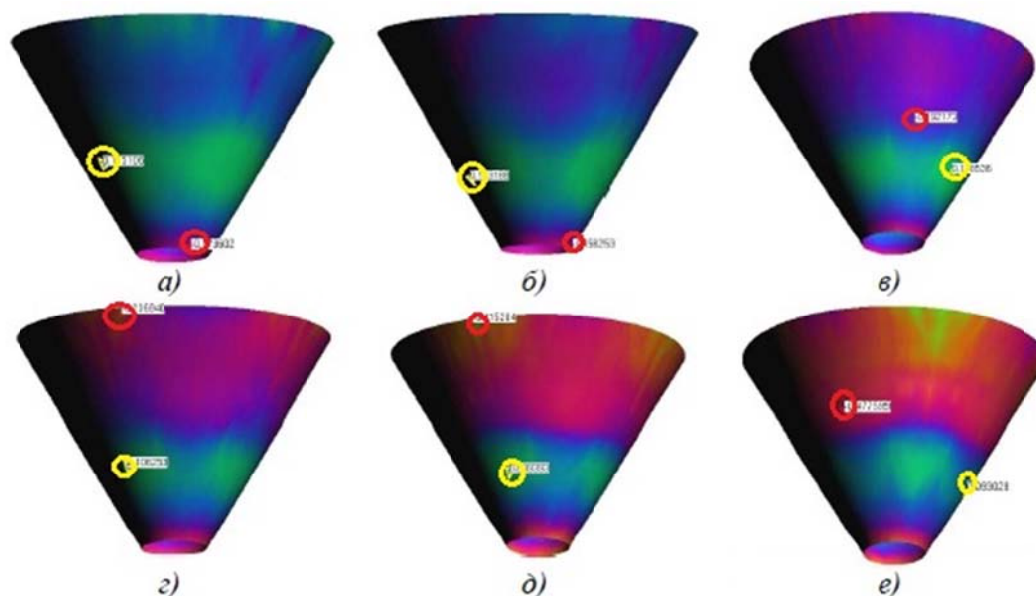


Рисунок 4 – График зависимости максимального относительного утолщения полученной детали от относительной толщины исходной заготовки

Дополнительно анализируя результаты моделирования совмещенного процесса операций раздача, обжим, вытяжка и отбортовка при различных толщинах заготовки, можно заметить, что при прочих равных условиях максимальное относительное утонение может наблюдаться как на краях заготовки по меньшему диаметру (в зоне отбортовки), по большему диаметру (в зоне раздачи), так и в середине (в зоне раздачи ближе к границе с зоной обжима).

Максимальное относительное утонение наблюдается на краю заготовки по меньшему диаметру – в зоне отбортовки (отмечено красным) для относительных толщин заготовки 0,005 (рисунок 5, а) и 0,009 (рисунок 5, б). Для относительных толщин заготовки 0,019 (рисунок 5, г) и 0,023 (рисунок 5, д) максимальное утонение наблюдается на краю заготовки по большему диаметру – в зоне раздачи; для 0,014 (рисунок 5, в) и 0,028 (рисунок 5, е) максимальное утонение наблюдается в середине заготовки – в зоне раздачи, ближе к границе с зоной обжима.



**Рисунок 5 – Относительное максимальное утонение и утолщение детали при относительной толщине исходной заготовки: а) 0,005; б) 0,009; в) 0,014; г) 0,019; д) 0,023; е) 0,028**

В отличие от максимального относительного утонения, максимальное относительное утолщение для всех относительных толщин заготовки находится в зоне обжима (на рисунке 5, а – е отмечены желтым).

### Заключение

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением относительной толщины исходной заготовки увеличивается абсолютное значение максимального относительного утонения получаемой детали.
2. С увеличением относительной толщины исходной заготовки практически линейно уменьшается максимальное относительное утолщение получаемой детали.
3. Максимальное относительное утонение может наблюдаться как на краях заготовки по меньшему диаметру (в зоне отбортовки), по большему диаметру (в зоне раздачи), так и в середине (в зоне раздачи ближе к границе с зоной обжима).
4. Максимальное относительное утолщение для всех относительных толщин исходной заготовки находится в зоне обжима.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсюков, С.А. Совмещение операций обжима и раздачи / С.А. Евсюков, Ю.А. Бочаров, А.П. Суворов // Известия вузов. Машиностроение. – 1992. – №10–12. – С. 106–110.
2. Евсюков, С.А. Исследование совмещенной операции вытяжки с обжимом и раздачей / С.А. Евсюков, А.А. Сулейман // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 11 [Электронный ресурс]. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/636247.html> (дата обращения 03.09.2017).
3. Евсюков С.А. Применение комбинаторных морфологических методов для разработки новых способов листовой штамповки // Вестник машиностроения. – 1997. – № 6. – С. 46–48.

**Яковлева Евгения Олеговна**  
Московский Государственный  
Технический Университет им. Н.Э.  
Баумана, г. Москва  
Аспирант 3-го курса кафедры МТ-  
6 «Технологии обработки  
давлением»  
Тел. (926)5956382  
E-mail: xpymk@inbox.ru

**Евсюков Сергей Александрович**  
Московский Государственный  
Технический Университет им. Н.Э.  
Баумана, г. Москва  
Доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
МТ-6 «Технологии обработки  
давлением»  
Тел. (499)2636901  
E-mail: mt6evs@yandex.ru

**Артюховская Татьяна Юрьевна**  
Московский Государственный  
Технический Университет им. Н.Э.  
Баумана, г. Москва  
Кандидат технических наук,  
доцент, заместитель заведующего  
кафедрой МТ-6 «Технологии  
обработки давлением»  
Тел. (499)2636681  
E-mail: tart11@mail.ru

---

E.O. YAKOVLEVA, S.A. EVSYUKOV, T.A. ARTYUKHOVSKAYA

## THE INFLUENCE OF THE INITIAL BLANK THICKNESS ON THE PART THICKNESS OBTAINED BY THE COMBINATION OF SUCH OPERATIONS AS EXPANSION, CRIMPING, DRAWING AND FLANGING

**Abstract.** *The article deals with production of parts by combining such operations as expansion, crimping, drawing and flanging. The process was simulated using the Autoform software with different thicknesses of the initial blank. The influence of this parameter on the thickness of the obtained part was determined. The graphs of the dependence of the maximum relative thinning and the maximum relative thickening of the conical part on the relative thickness of the initial blank are presented. The areas with the greatest and the smallest thickness of the received product are shown.*

**Keywords:** *combined operation, expansion, crimping, drawing, flanging, simulation, thicknesses of the initial blank, relative thinning, the maximum relative thickening.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Evsykov, S.A. Sovmestenie operatsiy obzhima i razdachi / S.A. Evsyukov, YU.A. Bocharov, A.P. Suvorov // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 1992. – №10–12. – S. 106–110.
2. Evsykov, S.A. Issledovanie sovmestnoy operatsii vytyazhk s obzhimom i razdachey / S.A. Evsyukov, A.A. Suleiman // Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno–tehnicheskoe izdanie – 2013. – № 11 [Elektronniy resurs]. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/636247.html> (data obrascheniya 03.09.2017).
3. Evsykov, S.A. Primenenie kombinatornykh morfologicheskikh metodov dlya razrabotki novykh sposobov listovoy shtampovki // Vestnik mashinostroeniya. – 1997. – № 6. – S. 46–48.

**Yakovleva Evgeniya Olegovna**  
Bauman Moscow State Technical,  
Moscow  
Postgraduate student of «Metal  
Forming Technology»  
Ph. (926)5956382  
E-mail: xpymk@inbox.ru

**Evsyukov Sergei Aleksandrovich**  
Bauman Moscow State Technical,  
Moscow  
Dr. of Science, Professor, Head of  
«Metal Forming Technology»  
Ph. (499)2636901  
E-mail: mt6evs@yandex.ru

**Artyukhovskaya Tatyana Yurevna**  
Bauman Moscow State Technical,  
Moscow  
Ph. D., assistant professor, Deputy  
Head of «Metal Forming  
Technology»  
Ph. (499)2636681  
E-mail: tart11@mail.ru

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.81

Е.В. МИЩЕНКО, В.Я. МИЩЕНКО

### **ОСОБЕННОСТИ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА «ДЕТАЛИ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ, РОБОТОВ И ИХ КОНСТРУИРОВАНИЕ»**

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности преподавания курса «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» на базе кафедры «Механика, мехатроника и робототехника» Юго-Западного государственного университета (г. Курск). Приведены цели и задачи изучения данной дисциплины, а также знания, умения и навыки, которыми обучающийся должен овладеть в процессе изучения данного курса.

**Ключевые слова:** мехатроника, робототехника, мехатронные модули и системы, бакалавры.

#### **Введение**

В настоящее время обозначились новые тенденции современного производства и управления, вызванные переходом к информационному обществу и обусловленные научно-техническим прогрессом и современными экономическими формами деятельности. Новый тип экономики предъявляет новые требования к выпускникам вузов, среди которых приоритет получают требования профессиональной компетентности, формирование которой сегодня является стратегической целью высшего образования. Поэтому преподавание новых дисциплин имеет свои особенности.

#### **Основная часть**

В середине XX века возникло новое научное направление – мехатроника, посвященное созданию и целенаправленной эксплуатации машин и систем, движение которых определяется электронно-вычислительной техникой. Она базируется на знаниях механики, микропроцессорной техники, информатики, электроники и компьютерном управлении движения агрегатов и машин [1]. Одним из направлений мехатроники является робототехника, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих).

Особенность обучения по данному направлению в сравнении с машиностроительными, технологическими, агропромышленными и другими направлениями заключается в том, что эта междисциплинарная подготовка выпускников включает в себя элементы подготовки инженера-механика, инженера по автоматическому управлению различными объектами и процессами, инженера-электроника, специалиста по вычислительной технике и технологии, инженера-приборостроителя.

Одной из дисциплин, необходимых для подготовки бакалавров, готовых к решению задач в области мехатроники и приборостроения, современного машиностроения, умеющих разрабатывать новые технологические процессы и автоматизированное оборудование, новые методики расчета и экспериментального исследования машин, мехатронных систем и оборудования, является курс «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование». Он изучается на 3 курсе по направлению подготовки бакалавров 15.03.06 – «Мехатроника и робототехника» направленности «Бытовые мехатронные системы» на кафедре «Механика, мехатроника и робототехника» ФГБОУ ВО Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ, г. Курск). В состав дисциплины входят лекции, практические занятия, лабораторные работы, курсовое проектирование и самостоятельное изучение материала.

Курс «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» формирует общинженерную подготовку специалиста в области мехатроники и робототехники, его знания, умения и навыки, необходимые для последующего изучения дисциплин

профессионального цикла, а также в дальнейшей его деятельности в качестве инженера–конструктора, инженера–эксплуатационника и других видах инженерной деятельности по освоению новой техники. Являясь частью раздела «Механика», данный курс содержит в себе основные сведения о динамике машин, деталях машин, основах конструирования элементов машин и механизмов, используемых в мехатронике и робототехнике.

Цель преподавания курса – дать обучающемуся знания об основных понятиях курса, основах синтеза и анализа различных механизмов, кинематике и динамике механизмов и машин, основах расчета и конструирования деталей и узлов, использующихся в мехатронных и робототехнических устройствах.

Задачи изучения курса:

1. На базе общинженерных дисциплин, предшествующих рассматриваемому курсу, изучить данный предмет, чтобы заложить прочный фундамент для профилирующих дисциплин и последующего выполнения выпускной квалификационной работы.

2. Овладеть основными принципами проектирования и конструирования элементов конструкций и механизмов мехатронных и робототехнических систем, в том числе с использованием современных технологий и автоматизированных систем (APM Win Machine, Компас и др.);

3. Уметь:

- конструировать механизмы, узлы и детали мехатронных модулей и роботов;
- производить расчеты передач на прочность;
- читать чертежи и текстовую документацию с целью оценки характеристики оборудования;

- самостоятельно проектировать узлы мехатронных и робототехнических систем по заданным входным данным;

- оформлять графическую и текстовую конструкторскую документацию в полном соответствии с требованиями ГОСТов;

- разрабатывать технические задания на проекты машин и механизмов;

В процессе учебы обучающиеся должны научиться владеть:

- навыками и методами конструирования новых мехатронных и робототехнических систем;

- приемами разработки конструкторской документации в виде чертежей деталей и сборочных единиц;

- приемами правильного и обоснованного выбора материалов для конструкций механизмов в соответствии с заданными требованиями;

- методами расчета мехатронных и робототехнических систем с применением современного вычислительного программного обеспечения.

Во время изучения курса у обучающихся формируются следующие общетехнические компетенции:

- способность производить расчеты и проектирование отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием;

- способность разрабатывать конструкторскую и проектную документацию механических, электрических и электронных узлов мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями.

Заключительным этапом освоения дисциплины является выполнение курсового проекта, который ставит перед собой две задачи:

1 – закрепление и углубление знаний, полученных при изучении общетехнических дисциплин;

2 – приобретение навыков конструирования на примере расчета приводного узла какого–либо мехатронного устройства.

Конструирование современных мехатронных систем осуществляется по модульному принципу, то есть существуют механические компоненты (передаточные механизмы, звенья), электромеханические компоненты (двигатели, тормоза, муфты), электронные,

микропроцессорные, информационные и сенсорные устройства, объединенные в одном корпусе [2]. В процессе выполнения курсового проекта обучающиеся должны овладеть навыками модульного принципа при конструировании и проектировании.

Основными преимуществами мехатронных модулей является следующее:

- исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации, упрощение кинематических цепей и, следовательно, высокая точность;
- конструктивная компактность;
- возможность объединения мехатронных модулей в сложные мехатронные системы;
- способность выполнять сложное движение благодаря применению методов адаптивного и интеллектуального управления.

Тематика курсовых проектов выбирается исходя из специфики выполняемых НИР на кафедре. Так обучающимися выполняются проекты по разработке приводов, используемых при проектировании технологического оборудования в машиностроении [3], для пищевой и перерабатывающей промышленности [4–6], при разработке роботизированных экзоскелетов для верхних и нижних конечностей [7, 8], беспилотных летающих аппаратов [9] и др. Качественно выполненные обучающимися курсовые проекты являются хорошей базой для выпускной квалификационной работы.

### Заключение

Дисциплина «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» существенно отличается от классического курса «Детали машин и основы конструирования» [10], поэтому нуждается в специализированном методическом обеспечении. Создание современных учебников и учебно-методических пособий для данного курса является в настоящее время весьма актуальной задачей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подураев, Ю.В. Основы мехатроники: учебн. пособие. – М.: МГТУ СТАНКИН, 2000. – 80 с.
2. Егоров, О.Д., Подураев, Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: учебник. – М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
3. Яцун, С.Ф. Кинематика, динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры: учебное пособие / С.Ф.Яцун, В.Я.Мищенко, Е.Н.Политов. – М.: Альфа-М: ИНФРА – М, 2012. – 208 с.
4. Яцун, С.Ф. Вибрационная техника в пищевой и перерабатывающей промышленности: учебное пособие / С.Ф.Яцун, В.Я.Мищенко, Е.В.Мищенко; Курск. гос. техн. ун-т Курск, 2009. —148 с.
5. Мищенко, Е.В., Мищенко, В.Я. Новые подходы к проектированию вибрационного технологического оборудования в пищевой и перерабатывающей промышленности // Вестник Брянского государственного технического университета. № 4 (52), 2016. – С. 116–121.
6. Мищенко, Е.В., Мищенко, В.Я. Актуальные вопросы создания современного вибрационного мехатронного оборудования // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей: материалы VI международного научн. Симпозиума / под ред. д.т.н., проф. Л.С. Ушакова. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017. – С. 215–220.
7. ЭКЗОСКЕЛЕТЫ: Анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования: монография: в 2-х ч. Ч. 1 / С.Ф.Яцун, С.И.Савин, О.В.Емельянова, А.С.Яцун, Р.Н.Турлапов; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – 179 с.
8. Яцун, С.Ф., Яцун, А.С., Корневский, Н.А. Опыт проектирования реабилитационных экзоскелетов // Медицинская техника. 2017, № 3 (303). – С. 48–51.
9. Емельянова, О.В., Казарян, К.Г., Мартинез Леон А.С., Яцун, С.Ф., Стуканева, С.П Синтез параметров электроприводов БПЛА типа «Конвертоплан-трикоптер» // Нелинейная динамика – School-NDM 2017, сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых, 2017. – С. 239–249.
10. Курсовое проектирование деталей машин на базе графических систем: учебное пособие / П.Н.Учаев, С.Г.Емельянов, Е.В.Мищенко [и др.]; под общ. ред. проф. П.Н.Учаева. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 428 с.

**Мищенко Елена Владимировна**  
ФГБОУ ВО Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина  
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Инженерная графика и механика»  
Г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69  
8–953–623–22–45  
art\_lena@inbox.ru

**Мищенко Владимир Яковлевич**  
ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет (г. Курск)  
Кандидат технических наук, доцент  
Г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94  
8–908–125–75–82  
mishenko47@mail.ru

E.V. MISHCHENKO, V.Ya. MISHCHENKO

## PECULIARITIES OF TEACHING THE COURSE DETAILS OF MECHATRONIC MODULES, ROBOTS AND THEIR DESIGN

**Abstract.** *The peculiarities of teaching the course «Details of mechatronic modules, robots and their design» at the Department «Mechanics, Mechatronics and Robotics» of the South–West State University (Kursk) are considered in the article. The goals and tasks of studying this discipline, and the knowledge, skills and abilities that students must master in the learning process of this course are given.*

**Keywords:** *mechatronics, robotics, mechatronic modules and systems, bachelors.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Poduraev, J.V. Fundamentals of mechatronics: educational book. – M.: MGТУ STANKIN, 2000. – 80 p.
2. Egorov, O.D., Poduraev, Y.V. Design of mechatronic modules: tutorial. – M.: IC MSTU "STANKIN", 2004. – 360 p.
3. Yatsun, S.F. Kinematics, dynamics and strength of machines, devices and equipment: textbook/ S.F.Yatsun, V.Y.Mishchenko, E.N.Politov. – Moscow: Alfa–M: INFRA – M, 2012. – 208 p.
4. Yatsun, S.F. Vibration machines in the food processing industry: textbook / S.F.Yatsun, V.Y.Mishchenko, E.V.Mishchenko; KurskSTU, Kursk, 2009. – 148 p.
5. Mishchenko, E.V., Mishchenko, V.Y. New approaches to the design of vibrating process equipment in the food processing industry // Vestnik of Bryansk state technical University. № 4 (52), 2016. – P. 116–121.
6. Mishchenko, E.V., Mishchenko, V.Y. Actual problems of modern mechatronic equipment vibration // Shock vibration systems and machines for building and mining industries: materials of VI international scientific. Symposium / edited by doctor of technical Sciences, Professor L.S.Ushakov. – Oryol: OSU named after I. S. Turgenev, 2017. – P. 215–220.
7. EXOSKELETONS: Analysis of structures, the principles of creation, framework modeling: monograph: in 2 h. h. 1 / S.F.Yatsun, S.I.Savin, O.V.Emelyanova, A.S.Yatsun, R.N.Turlapov; The South–West. State University – Kursk, 2015. – 179 p.
8. Yatsun, S.F., Yatsun, A.S., Korenevskii N.A. Experience in the design of rehabilitation exoskeletons // Medical equipment. 2017, № 3 (303). – P. 48–51.
9. Emelyanova, O.V., Kazaryan, K.G., Martinez Leon A. S., Yatsun, S.F., Stoyneva, S.P. Synthesis parameters of the actuators of the UAV type "Convertiplane–tricopter" // Nonlinear dynamics – School–NDM 2017, the collection of the IV International School–conference of young scientists, 2017. – P. 239–249.
10. Course design of machine parts on the basis of graphics systems: textbook / P.N.Uchaev, S.G.Emelyanov, E.V.Mishchenko [et al.]; under the General editorship of Professor P.N.Uchaev. – Stary Oskol: TNT, 2012. – 428 p.

#### **Mishchenko Elena Vladimirovna**

Orel state agrarian university named after N.V. Parahin  
Ph. D., associate Professor, head. department  
"Engineering graphics and mechanics"  
Orel, General Rodina St., 69  
8–953–623–22–45  
art\_lena@inbox.ru

#### **Mishchenko Vladimir Yakovlevich**

South–West state university (Kursk)  
Ph. D., associate Professor  
Kursk, St. 50 let Oktyabrya, 94  
8–908–125–75–82  
mishchenko47@mail.ru

УДК 629.1.02/.03:627.892

А.В. ГОРИН, Н.В. ТОКМАКОВ, А.В. ПРОСЕКОВА, М.А. ГОРИНА, В.А. КРАВЧЕНКО

## МЕХАТРОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА И ВЛИЯНИЕ ИХ НА БАЗОВУЮ МАШИНУ

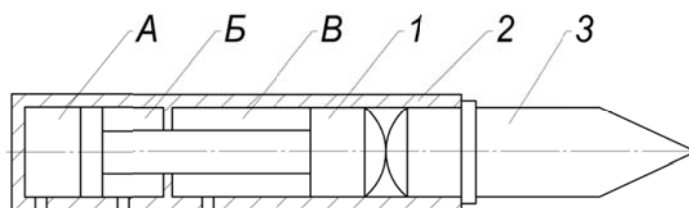
**Аннотация.** В статье представлены мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода (ударные машины) ряда производителей устанавливаемых на базовую машину. Мехатронные ударные механизмы являются активным типом оборудования, которое оказывает динамическое воздействие на базовую машину. Базовая машина, в свою очередь, является колебательной системой, которая создает негативные вибрационные воздействия на оператора. Указанный эффект обусловлен тем, что во время работы импульсного мехатронного механизма на машину действует знакопеременная сила, направленная вдоль продольной оси ударного мехатронного механизма, обусловленная возвратно–поступательным движением бойка.

Описан процесс «падения» базовой машины в процессе работы. Данный процесс связан с тем, что для уравнивания реактивной силы, возникающей при движении бойка, мехатронный импульсный механизм необходимо прижимать к объекту работы с помощью гидроцилиндров привода рабочего оборудования базовой машины. Представлен ряд применяемых структурных схем взаимодействия импульсного мехатронного механизма с базовой машиной.

**Ключевые слова:** мехатронные механизмы, импульсный гидравлический привод, силовое воздействие, демпфирующий механизм, ударные машины.

### Введение

Мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода (ударные машины) имеют широкую область применения в коммунальной, горно–рудной, геологоразведочная, дорожно–строительная отраслях. Создание импульсных усилий может осуществлять как на суши, так и под водой. Пример мехатронного механизма на основе импульсного гидравлического привода приведен на рисунке 1. Представленная ударная машина состоит из бойка 1, корпуса 2 и инструмента 3. Корпус и боек образуют три гидравлические камеры: рабочего А, обратного Б хода и вспомогательную камеру В.



**Рисунок 1 – Мехатронный механизм на основе импульсного гидравлического привода:**

1 – боек, 2 – корпус, 3 – инструмент, А – камера рабочего хода,  
Б – камера обратного хода, В – вспомогательная камера

В работах [1,2] движение бойка ударных машин изучалось при условии, что корпус неподвижен (относительное движение). Такой подход оправдан в стационарных условиях, когда усилие подачи равно или превышает максимальную силу отдачи, действующую на корпус механизма [3]. Однако, в других условиях мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода (ударные машины), в отличие от других видов сменных рабочих органов, являются активным типом оборудования, которое оказывает динамическое воздействие на базовую машину.

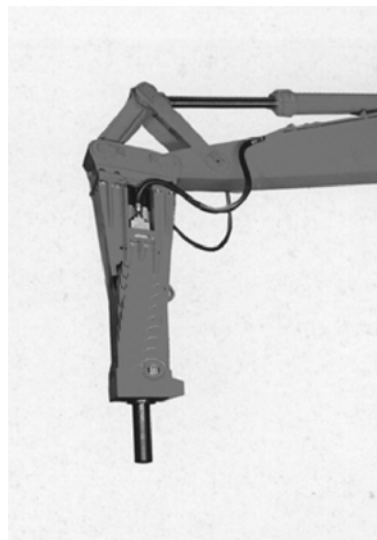
### Основная часть

Базовая машина с мехатронным механизмом на основе импульсного гидравлического привода представляет собой колебательную систему нескольких масс (масса молота, рукояти, стрелы и др.), имеющих шарнирные сочленения и упругие элементы, в том числе гидроцилиндры. Во время работы импульсного мехатронного механизма на машину

действует знакопеременная сила, направленная вдоль продольной оси гидромолота, обусловленная возвратно–поступательным движением бойка. В свою очередь динамическое воздействие ударной машины проявляется в создании более высокой, чем при использовании сменного оборудования других видов, вибрационной нагрузки на оператора.

Особенно это важно из–за вступления в силу Директивы Евросоюза по физическим воздействиям (вибрации) № 2002/44/ЕС, которая направлена на ужесточение требований по охране труда операторов машин, оснащенных ударными машинами.

Особенностью применения мехатронных ударных машин в составе рабочего органа гидравлического экскаватора, является их жесткое крепление к базовой машине представленное на рисунке 2. В этом случае, вся энергия отдачи передается через жесткие соединения, стреле экскаватора, вызывая динамические и вибрационные нагрузки.

*а**б*

**Рисунок 2 – Монтаж гидромолота на стрелу экскаватора: а) – сверху; б) – сбоку**

В работе [4] приводятся результаты исследований системы "гидромолот–экскаватор". Исследовалось влияние гидромолота СП–70 (энергия удара 3 кДж, частота ударов 180 уд/мин, масса ударной части 150 кг, масса молота 750 кг) на гидравлический экскаватор ЭО–3322Б. Ударная мощность гидромолота составляла 9 кВт. По результатам проведения экспериментальных исследований было выявлено, что наибольшие напряжения фиксировались на конце стрелы экскаватора и составляли 23 МПа. В начале рукояти эти напряжения составляли 12,5 МПа, что почти в два раза меньше. Наибольшее напряжение было зафиксировано у основания стрелы и составило 54 МПа.

При исследовании работы мехатронной ударной машины ПН–2400 (энергия удара 2,4 кДж, частота ударов 325 уд/мин, масса ударной части 70 кг, масса молота 560 кг) совместно с гидравлическим экскаватором ЭО–3322А, было выявлено, что напряжения в металлоконструкциях рабочего оборудования составляли 66 МПа в рукояти и 70 МПа в стреле. Ударная мощность пневмомолота при этом составляла 13 кВт [5].

В обоих случаях возникающие напряжения являются критическими, так как в 2 – 2,5 раза превышают допускаемые. Так авторы работ [4,5] отмечают то, что:

- максимальные уровни напряжений и вибрации возникали в момент удара;
- в сечениях металлоконструкций рабочего оборудования экскаватора присутствовали только высокочастотные составляющие спектра;
- в элементах платформы – составляющие в диапазоне от 2 Гц до 5 кГц.

Так же отмечалось, что распространение вибраций происходит во всех плоскостях, с преобладанием вертикальных составляющих. После завершения основного колебания платформы, наблюдается её повторное колебание поперёк продольной оси.

Авторы работы [6] также отмечают, что "проведенные эксперименты и исследования показали, что возникающие виброускорения в металлоконструкциях экскаватора не превышают санитарных норм, но находятся в верхнем пределе, особенно у экскаваторов 2-й размерной группы, поэтому возникла необходимость создания виброгасящего устройства".

Ещё одной негативной составляющей при работе базовой машины с импульсным механизмом, является так называемые "падения" базовых машин во время работы. Это связано с тем, что для уравнивания реактивной силы, возникающей при движении бойка, мехатронный импульсный механизм необходимо прижимать к объекту работы с помощью гидроцилиндров привода рабочего оборудования базовой машины.

Контролировать усилие прижатия оператору затруднительно, поэтому, как правило, базовая машина вывешивается, опираясь на ударный мехатронный механизм, а часть его колес или опорной поверхности гусениц отрывается от поверхности стоянки. Высота отрыва уменьшается по мере заглубления инструмента гидромолота в обрабатываемую среду.

После каждого удара корпус ударной мехатронной машины под действием силы прижатия опускается до упора в инструмент, т. е. базовая машина как бы падает с некоторой высоты, ударяясь о неподвижный инструмент. Это соударение вызывает реакцию, величина которой тем больше, чем больше внедрение инструмента за предыдущий удар. При внедрении инструмента за удар свыше 10...15 мм эта реакция может превышать величину реакции, возникающей при реверсировании бойка ударной мехатронной машины.

Самое большое негативное воздействие возникает при внезапном разрушении, например, негабаритных кусков горных пород или бетонных конструкций. В этих случаях «падение» экскаватора происходит с наибольшей высоты, ограниченной высотой отрыва колес или гусениц от поверхности стоянки. Как отмечается в работе [7], исследования, проведенные еще в 1980-е годы во ВНИИстройдормаше, показали, что отрыв колес или гусениц экскаватора свыше 150 мм при прижатии гидромолота и последующее «падение» экскаватора до удара о грунт в результате внезапного разрушения обрабатываемого материала приводит к возникновению в металлоконструкциях рабочего оборудования и ходовой рамы опасных напряжений, которые могут привести к серьезной поломке.

При эксплуатации ударных мехатронных машин в составе рабочего оборудования гидравлических экскаваторов были выявлены определенные сочетания, определяющие производительность и эффективность их работы. Специалисты фирмы "Раммер" (Финляндия) пришли к выводу, что масса базовой машины должна быть в 10–12 раз больше массы ударной мехатронной машины [8]. По их мнению, это должно компенсировать силовое воздействие на базовую машину.

Также для снижения силы отдачи в ударных машинах Раммер и других фирм используют пружины, устанавливаемые между корпусом и стрелой (манипулятором) базовой машины (рисунок 3).

В тоже время, как отмечается автором в работе [7], подобное подрессоривание, в случае "падения" экскаватора оказывается малоэффективным.

В ряде моделей зарубежных фирм для снижения воздействия гидромолота на машину и, соответственно, оператора, предусмотрены амортизаторы, выполненные из эластомеров [8]. В легких гидромолотах фирмы "Монтаберт" (Франция) имеются встроенные гидравлические амортизаторы отдачи. Однако, большинство фирм для снижения силы воздействия на базовую машину увеличивают массу ударных машин, помещая их в массивные кожуха.



*Рисунок 2 – Гидроударник фирмы "Раммер" с компенсацией отдачи посредством жестких пружин*

В ДонУГИ (совместно с КарПТИ) был разработан двухбойковый ударный мехатронный механизм на основе гидропривода с динамически уравновешенным механизмом [9]. Как показали испытания, усилие отдачи и частота вибрации корпуса ударной машины снизились более чем в два раза. Однако при этом существенно снизилось значение КПД – с 0,82 до 0,47. Так же увеличилась габаритная длина ударной машины.

В 80–х годах прошлого века в ВНИИстройдормаш была разработана так называемая виброзащитная подвеска ударной машины [10]. Как отмечают авторы: "При испытаниях было отмечено, что уровень амплитуды колебаний элементов рабочего оборудования экскаватора уменьшался в 2...2,5 раза по сравнению с жестким закреплением гидромолота в адаптере. Но главное то, что при внезапном разрушении негабарита экскаватор не ударяется о поверхность грунта, так как его колеса не были оторваны от поверхности стоянки при прижатии молота, а, следовательно, такая подвеска должна существенно увеличить ресурс экскаватора. Однако, как отмечают сами авторы, подвеска получилась слишком громоздкой и дальнейшего развития не получила.

По аналогичному пути пошли и авторы патента РФ [11].

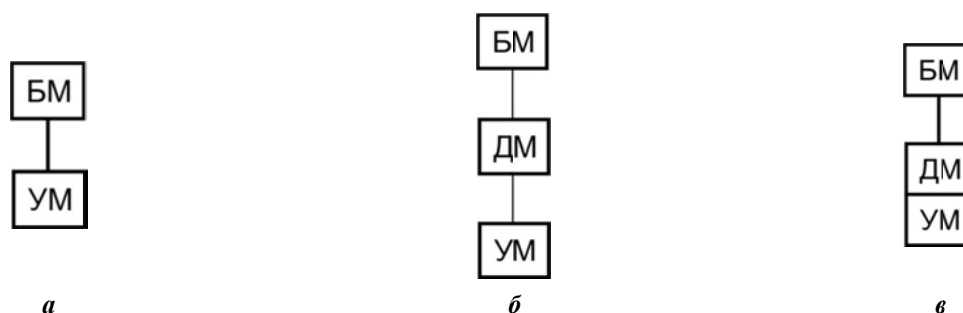
В обоих последних случаях в конструкциях подвесок используются обратные клапаны. Учитывая, частоту ударов 5–6 Гц, авторы данной статьи сомневаются в долговечности подобных устройств.

В ПНИЛ «Силовые импульсные системы» ОГУ имени И.С. Тургенева попытались решить проблему, установив гидравлический тормоз, интегрированный в ударную мехатронную машину [8,12]. Представленное конструктивное решение позволило исключить явление прострела при работе гидромолота, однако динамические нагрузки, при нормальной работе, оставались, достаточно велики.

### Заключение

Анализируя выше приведенный материал, представим в виде структурной схемы возможные варианты взаимодействия гидромолота и базовой машины, представленные на рисунке 4.

На данный момент применяется ряд структурных схем взаимодействия импульсного мехатронного механизма на базовую машину. Однако у каждой из них имеются как положительные, так и негативные стороны.



**Рисунок 4 Структурная схема взаимодействия ударного мехатронного механизма и базовой машины:**

БМ – базовая машина, УМ – ударный механизм, ДМ – демпфирующий механизм

а) – прямое взаимодействие; б) – взаимодействие через демпфирующий механизм;

в) – взаимодействие через демпфирующий механизм интегрированный в ударный механизм

Исходя из анализа выше приведенного материала, можно сделать следующие выводы:

1. Снижение силового воздействия работы ударного механизма на базовую машину является чрезвычайно актуальным;

2. Необходимо осуществлять защиту оператора базовой машины от негативных факторов при работе ударного мехатронного механизма;

3. Иностранные и отечественные разработчики ударных механизмов применяют ряд мер по снижению динамических и вибрационных нагрузок на базовую машину, но они не имеют систематизированного и научно–обоснованного подхода;

4. Для снижения динамических воздействий ударного механизма необходимо применять демпфирующие механизмы.

5. Необходимо выполнить анализ демпфирующих механизмов применяемых в дорожной и строительной технике для выбора рационального устройства и структурной схемы его взаимодействия с базовой машиной.

Представленный материал выполнен в рамках проекта №9.2952.2017/4.6. государственного задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котылев, Ю.Е. Прикладная теория гидравлических машин ударного действия / Ю.Е. Котылев, Д.Н. Ешуткин. – М.: Машиностроение–1, 2007. – 176с.
2. Горин А.В. Применение гидравлических машин ударного действия для образования скважин в грунтах: монография / А.В. Горин, Д.Н. Ешуткин, М.А. Горина. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 151 с.
3. Ушаков, Л.С. Машины ударного и периодического действия в импульсных технологиях / В.А. Голенков, Л.С. Ушаков.— Орел: ОрелГТУ, 2010.— 11 с. — IV Международный симпозиум. Ударно-вибрационные системы, машины и технологии. – 3 июня 2010 г., г. Орел. Секция № 1. Расчет и проектирование силовых импульсных систем. – С. 3–13
4. Песоцкая Р.И., Саблев А.В., Усенко В.Н. Взаимодействие гидромолота и гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. – 2010. – №8. – С. 11.
5. Недорезов И.А., Исаев О.К., Иванов Р.А., Пучков В.В. Опыт эксплуатации и результаты испытаний пневмомолотов на гидравлических экскаваторах // Строительные и дорожные машины. – 2005. – №5. – С. 7–10.
6. Иванов Р.А., Гераськин С.В. Амортизаторы к навесным ударным устройствам // Материалы Международного симпозиума "Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия". – Орел, 2000. – С. 56–59.
7. Дмитриевич Ю.В. Гидравлические молоты // Строительные и дорожные машины. – 1998. – №5. – С. 21–22.
8. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.
9. Гидроударники для проведения восстающих выработок в крепких породах / А.А. Алейников, П.М. Пересада, И.И. Сторчак // Уголь Украины. – 1994. – №5. – С. 25–26.
10. Виброзащитная подвеска ударной машины: а.с. СССР № 1240828/Юрьев Д.А.; заявл. 07.05.86; опубл. 07.06.87, Бюл. 21. 2с.
11. Устройство ударного действия для образования скважин в грунте: пат. Рос. Федерация №2556586/ Ешуткин Д.Н., Горин А.В., Горина М.А.; заявл. 17.02.14; опубл. 16.06.2015.
12. Горин А.В. Применение гидравлических машин ударного действия для образования скважин в грунтах: монография / А.В. Горин, Д.Н. Ешуткин, М.А. Горина. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 151 с.

**Горин Андрей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Орловский  
государственный университет  
имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры Мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. 8910–260–02–67  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Токмаков Никита Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Орловский  
государственный университет имени  
И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. 8910–260–65–08  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Просекова Анастасия Владимировна**  
ФГБОУ ВО «Орловский  
государственный университет имени  
И.С. Тургенева», г. Орел  
Старший преподаватель кафедры  
Мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8910–260–02–67  
E-mail: Proseкова Anastasi@yandex.ru

**Горина Мария Андреевна**  
ФГБОУ ВО «Орловский  
государственный университет  
имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. 8910–260–65–08  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Кравченко Валерий Анатольевич**  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С.  
Тургенева», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры Подъемно–транспортные,  
строительные и дорожные машины  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8910–260–02–67  
E-mail: gorin57@mail.ru

A.V. GORIN, N.V. TOKMAKOV, A.V. PROSEKOVA, M.A. GORINA, V.A. KRAVCHENKO

## MECHATRONIC MECHANISMS BASED ON PULSED HYDRAULIC DRIVE AND INFLUENCE ON THE BASIC MACHINE

**Abstract.** *The article presents mechatronic mechanisms based on a pulsed hydraulic drive (shock machines) of a number of manufacturers installed on a base machine. Mechatronic impact mechanisms are an active type of equipment that has a dynamic effect on the base machine. The base machine, in turn, is an oscillatory system that creates negative vibrational effects on the operator. This effect is due to the fact that during the operation of the pulsed mechatronic mechanism, a sign-alternating force acts on the machine along the longitudinal axis of the shock mechatronic mechanism, due to the reciprocating motion of the striker.*

*The process of "falling" the base machine in the process of work is described. This process is due to the fact that in order to balance the reactive force that occurs when the striker moves, the mechatronic pulse mechanism must be pressed against the object of work by means of hydraulic cylinders for driving the working equipment of the basic machine. A number of applied structural schemes of interaction of the pulsed mechatronic mechanism with the base machine are presented.*

**Keywords:** *mechatronic mechanisms, pulsed hydraulic drive, power action, damping mechanism, percussion machines.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Kotylev, Yu.E. Applied theory of hydraulic impact machines / Yu.E. Kotylev, D.N. Yeshutkin. – Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2007. – 176 p.
2. Gorin A.V. Application of hydraulic impact machines for the formation of wells in soils: monograph / A.V. Gorin, D.N. Eshutkin, M.A. Gorina. Eagle: State University – UNPK, 2015. – 151 p.
3. Ushakov, L.S. Machines shock and periodic action in impulse technologies / V.A. Golenkov, L.S. Ushakov. – The Eagle: Orel STU, 2010. – 11 with. – IV International Symposium. Shock-vibration systems, machines and technologies. – June 3, 2010, the city of Orel. Section 1. Calculation and design of power pulse systems. – P. 3–13
4. Pesotskaya RI, Sablev AV, Usenko V.N. Interaction of hydraulic hammer and hydraulic excavator // Construction and road machines. – 2010. – №8. – P. 11.
5. Nedorezov IA, Isaev OK, Ivanov RA, Puchkov VV Operational experience and test results of pneumatic hammers on hydraulic excavators // Construction and road machines. – 2005. – №5. – P. 7–10.
6. Ivanov RA, Geras'kin SV Shock absorbers to hinged impact devices // Materials of the International Symposium "Mechanisms and Machines of Impact, Periodic and Vibrational Action". – Eagle, 2000. – P. 56–59.
7. Dmitrevich Yu.V. Hydraulic hammers // Construction and road machines. – 1998. – №5. – P. 21–22.
8. Ushakov LS, Kotylev Yu.E., Kravchenko V.A. Hydraulic impact machines. – Moscow: Mechanical Engineering, 2000. – 416 p.
9. Hydraulic hammers for carrying out of the rising excavations in strong rocks / A.A. Aleynikov, P.M. Peresada, I.I. Storchak // Coal of Ukraine. – 1994. – №5. – P. 25–26.
10. A.S. № 1240828 (USSR).
11. Patent for utility model No. 58564.
12. Gorin A.V. Application of hydraulic impact machines for the formation of wells in soils: monograph / A.V. Gorin, D.N. Yeshutkin, M.A. Gorina. Eagle: State University – UNPK, 2015. – 151 p.

#### Gorin Andrei Vladimirovich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel  
Ph.D., associate professor of the department "Mechatronics, mechanics and robotics"  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: 8910-260-02-67  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### Tokmakov Nikita Vladimirovich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel  
Student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: 8910-260-65-08  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### Proseкова Anastasia Vladimirovna

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel  
Ph.D., senior lecturer of the department "Mechatronics, mechanics and robotics"  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: 8910-260-02-67  
E-mail: Proseкова Anastasi@yandex.ru

#### Gorina Maria Andreevna

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel  
Student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: 8910-260-65-08  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### Kravchenko Valeri Anatolievich

«Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel  
Ph.D., associate professor of the department "Mechatronics, mechanics and robotics"  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: 8910-260-02-67  
E-mail: gorin57@mail.ru

М.А. КОЖУХОВ, А.В. СЫТИН, А.Ю. РОДИЧЕВ

## СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ИЗНОСА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕПЕСТКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ В ПЕРИОД ПУСКА И ОСТАНОВА

**Аннотация:** в статье рассматриваются основные причины, сопутствующие износу упругих элементов лепестковых подшипников, что напрямую связано с уменьшением ресурса функционирования роторно–опорной системы. Изложены наиболее актуальные способы по минимизации негативных факторов, оказывающих влияние на износ лепестков газодинамической опоры. Приведена классификация изложенных способов с подробным описанием оказываемого влияния на обеспечение минимального износа. Сделаны выводы о положительных эффектах и негативных составляющих каждого отдельного способа.

**Ключевые слова:** лепестковый газовый подшипник (ЛГП); износ лепестковых элементов; ресурс роторно–опорной системы; комбинированные опоры; наддув; специальные покрытия рабочей поверхности лепестка.

### Введение

Современные тенденции реформации человеческих потребностей предопределяют необходимость стремительного развития отраслей машиностроения и других областей промышленности, констатируют факт повышения требований к функциональным возможностям и рабочим характеристикам механических систем. В конструкции высокоскоростных роторных турбомашин наиболее нагруженным и ответственным элементом, определяющим работоспособность и ресурс машины в целом, является роторно–опорный узел. Сравнительно недавно, при конструировании опор высокоскоростных роторов, предпочтение отдавалось подшипникам качения, что объяснялось удобством их монтажа, смазки и обслуживания, а также отсутствием износа опорных поверхностей ротора и постоянством коэффициента трения при изменении скоростей и нагрузок [1]. Однако неизбежное увеличение частот вращения ротора выявило существенные недостатки, наличие которых не позволяло даже теоретически рассматривать подшипник качения как базисный роторно–опорный узел высокоскоростных агрегатов. Перспективным, с позиции быстроходности и надежности, является использование лепестковых газовых подшипников скольжения (ЛГП), на рабочие поверхности которых наносятся покрытия с применением твердых смазочных материалов. Все же, несмотря на очевидные качественные улучшения рабочих характеристик технических машин, являющиеся производными от внедрения в конструкцию лепестковых подшипников скольжения, есть определенные негативные моменты. Прежде всего, к недостаткам ЛГП можно отнести наличие сухого трения между цапфой вала и лепестковыми элементами в периоды пуска и останова ротора, что является главной причиной износа лепестков. Для уменьшения этого недостатка и увеличения ресурса ЛГП стремятся к снижению скорости всплывтия, уменьшению времени разгона и останова, снижению коэффициента трения контактирующих поверхностей за счет применения специальных покрытий на лепестковых элементах и опорных поверхностях вала [2]. Помимо нанесения антифрикционных покрытий на контактирующие рабочие поверхности роторно–опорного узла, разрабатывают конструкции лепестковых подшипников, где есть интеграция элементов обеспечивающих наддув, заключающийся в создании в пространстве подлепестковой области зоны избыточного давления, для оказания дополнительного воздействия на ротор и придании ему устойчивого положения. Также к эффективным способам минимизации фрикционного влияния следует отнести научные исследования, направленные на проектирование и внедрение в реальные объекты комбинированных опор (КО). Это опора, в которой конструктивно объединены несколько типов подшипников, различающихся по способу создания несущей способности. Такое объединение позволяет добиться синергетического эффекта: исключить (или максимально снизить) недостатки, присущие каждому типу подшипников, и одновременно сохранить их достоинства [3].

### Основная часть

Схематично классификация основных, наиболее перспективных и эффективных способов обеспечения минимального износа рабочей поверхности ЛГП в экстремальных режимах работы, приведена на рисунке 1.

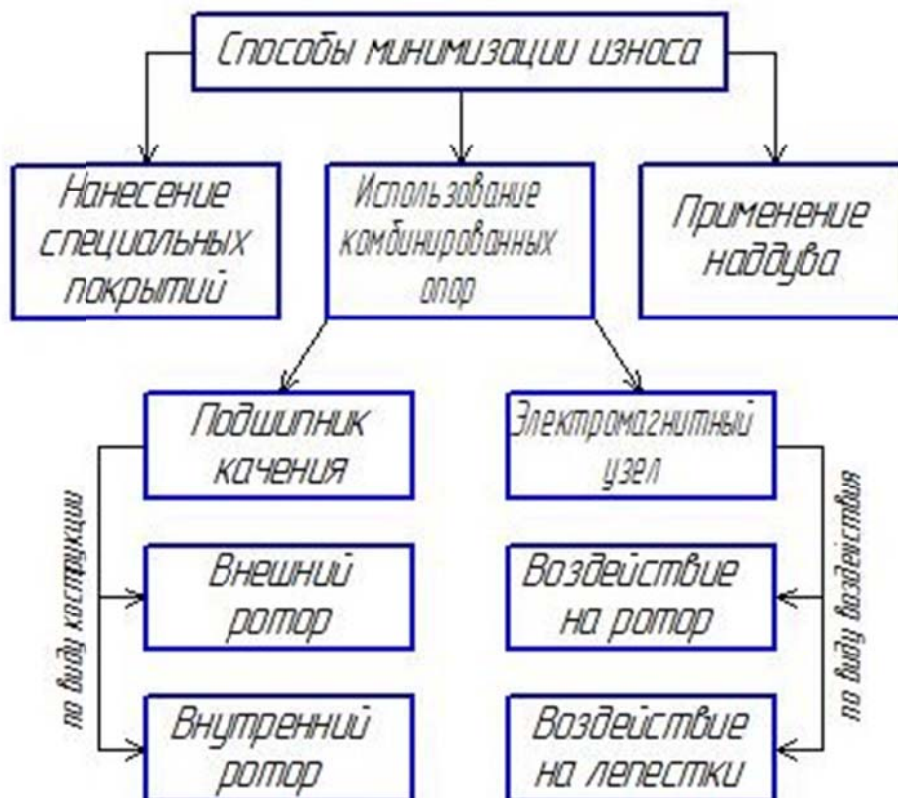


Рисунок 1 – Классификация способов минимизации износа на рабочую поверхность лепестка ЛГП

Согласно классификации, представленной на рисунке 1, для минимизации износа лепестковых элементов применяют три основных способа – нанесение специальных покрытий на рабочую поверхность лепестка, использование в конструкции роторной машины технических средств обеспечения наддува, применение лепестковых опор в комбинации с подшипниками качения. Рассмотрим принципиальные аспекты каждого отдельного способа более подробно.

На практике особенной популярностью пользуется способ, предполагающий минимизацию износа и увеличение срока службы машины путем нанесения специальных покрытий на контактирующие поверхности. Разработка новых технологий нанесения антифрикционных покрытий на детали, работающие в условиях трения (подшипники, втулки, направляющие вкладыши и т.п.), предполагает значительную прирабатываемость, износостойкость, низкий коэффициент трения и малый износ контактирующего материала. Появлению антифрикционных свойств в условиях трения способствует наличие в покрытиях таких металлов, как свинец, олово, или включения частиц компонентов, обладающих смазочным действием (сульфид молибдена, сульфид вольфрама). Высокими антифрикционными характеристиками обладает свинец. Сплавы, содержащие до 5 – 25% олова, применяются как антифрикционные [4, 5]. Известным тройным сплавом на свинцовооловянистой основе является сплав с сурьмой, обеспечивающий хорошую прирабатываемость, большую износостойкость и стойкость против эрозии. Для нанесения антифрикционных покрытий на детали подшипников скольжения с успехом применяют свинцово–оловянистые сплавы, содержащие медь и сурьму. К наиболее распространённым антифрикционным сплавам относятся сплавы системы Pb – Sb, Sn – Sb и Pb – Sn – Sb, а также цинковые баббиты на основе цинка (с добавками меди и алюминия) и алюминиевые баббиты на основе алюминия (с добавками меди, никеля, сурьмы).

Для нанесения металлопокрытий на тонкостенные упругие элементы возможно применение следующих технологий.

Метод гальванического нанесения антифрикционных покрытий из растворов позволяет проводить процесс при низких температурах и одновременно обрабатывать большое количество деталей. Кроме того, за счёт использования специальных приспособлений для крепления деталей, анодов сложной формы и экранов существует возможность размерного нанесения покрытий, что устраняет необходимость последующей механической обработки.

Одним из путей повышения качества металлопокрытий, а соответственно и повышения ресурса изделий, является внедрение в производство технологий нанесения металлопокрытий с использованием методов газотермического напыления металлических порошков (электродугового, детонационного, плазменного, газопламенного и др.), а также способами плазменной, газопламенной наплавки или напекания.

При плазменном напылении металлических покрытий для расплавления и переноса порошка на поверхность детали используются тепловые и динамические свойства плазменной струи, которую получают нагревом плазмообразующего газа в электрической дуге, горящей между катодом и анодом плазменной горелки (плазматрона) и очистке столба дуги потоком этого газа, для повышения плотности энергоносителя. В качестве плазмообразующих газов используется аргон, азот, гелий или смесь этих газов. Предварительная обработка поверхности перед напылением включает: механическую и (или) струйно-абразивную обработку.

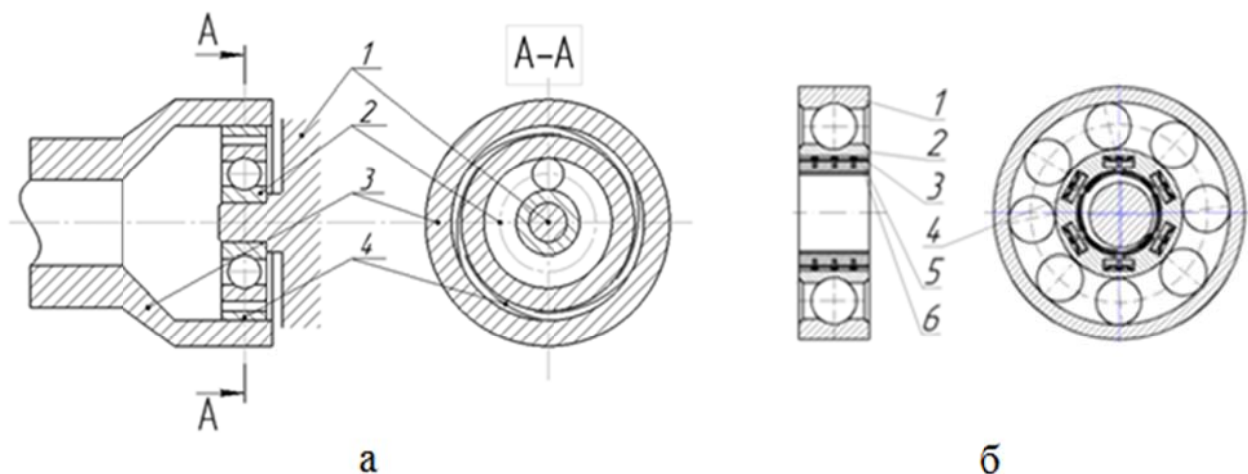
Метод детонационного напыления начал развиваться в конце 60-х годов. Большой объем исследований по разработке и совершенствованию метода, выполненных в нашей стране, позволил решить основные задачи в области техники и технологии этого метода. Суть его заключается в следующем: в рабочую камеру детонационной установки подаются горючая смесь и напыляемый порошок. С помощью электрической искры смесь поджигается, из рабочей камеры по стволу пламя распространяется с возрастающей скоростью до возникновения детонационной волны. Скорость распространения детонации  $1000 \div 3000$  м/с, зависит от характеристик горючей смеси. При истечении продуктов детонации последние увлекают за собой частицы порошка, которые, кроме тепловой, получают и кинетическую энергию. Скорость выноса порошка  $690 \div 1000$  м/с. Установленная на пути потока газов и порошка изношенная поверхность (подложка) покрывается частицами напыляемого материала. Детонационное напыление (покрытие) характеризуется высокой износостойкостью.

Способ электродугового напыления отличается высокой производительностью нанесения покрытий (до 21 кг/ч), получением покрытий толщиной в несколько миллиметров, высокой износостойкостью восстанавливаемых поверхностей (до 1,5÷2 раза выше износостойкости детали), простотой и технологичностью процесса, возможностью нанесения покрытия на поверхности деталей, изготавливаемых из различных материалов. Кроме того, покрытия, нанесенные способом электродугового напыления, обладают хорошей маслостойкостью, удерживая масло в поверхностных микропорах.

Газопламенное напыление включает в себя процессы нанесения покрытий, в основе которых лежит нагрев исходного материала до жидкого или пластического состояния и его распыление газовой струей. Его особенностями являются: высокая производительность (до 40 кг/ч); возможность получения слоев в достаточно диапазоне толщины (0,1÷3 мм) с широким спектром свойств (в том числе регулируемых по толщине); простота нанесения покрытия на детали различных геометрических форм и размеров; универсальность используемых материалов как по форме (порошки, проволоки), так и по физико-механическим характеристикам (металлы, сплавы, окислы, карбиды, пластмассы и т.д.). К достоинствам газопламенного напыления, особенно ценным для сельскохозяйственного машиностроения, относится возможность осуществления процесса в различных производственных условиях (от крупносерийного производства до единичного восстановления в ремонтных мастерских и даже непосредственно в поле). При этом достаточно легко механизировать процесс, в результате чего достигается повышение качества покрытия [6].

Выполненные рядом исследователей работы по изучению работоспособности деталей с покрытиями убедительно показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и основы. По указанной причине, серьезным ограничением на пути более широкого применения изделий, упрочненных покрытиями, следует считать прочность сцепления. Она зависит от механической и физико-химической совместимости компонентов, а также от предварительной подготовки поверхности.

Наиболее интересный, с научной точки зрения, способ повышения эффективности работы и долговечности элементов ЛПП, подвергающихся нежелательным воздействиям фрикционных процессов, является использование комбинированных подшипниковых узлов. Основным фактором, ограничивающим ресурс опор скольжения, является контакт поверхностей цапфы вала и лепестковых элементов подшипника во время пуска–останова роторного агрегата, а также переходных режимов работы узла. Изменение геометрических параметров упругих элементов лепесткового подшипника приводит к ухудшению рабочих характеристик опоры и может привести к потере работоспособности роторной системы в целом. Для роторных машин с многократными пусками и остановами (турбокомпрессоры химических топливных элементов электромобилей, турбодетандеры и различные виды насосов для криогенной техники и нефтехимической промышленности) актуальна задача обеспечения повышенной надежности, что предъявляет более жесткие требования к опорным узлам роторов такого рода машин. И когда ни один из существующих видов подшипников не удовлетворяет техническим требованиям роторной машины, как возможное решение данной проблемы рассматривают вариант совмещения опор различного принципа действия для повышения надежности опорного узла за счет разделения и дублирования функций подшипников [4]. В связи с этим, сегодня ведутся активные всесторонние исследования возможных, наиболее оптимальных вариантов конструкций, где в едином корпусе опорного узла совмещены подшипники качения и скольжения, позволяющие использовать преимущества и исключить недостатки, свойственные интегрированным опорам на различных режимах работы. На рисунке 2 представлены схемы комбинированных опорных узлов, принципиальные различия которых заключаются в способе расположения вала.

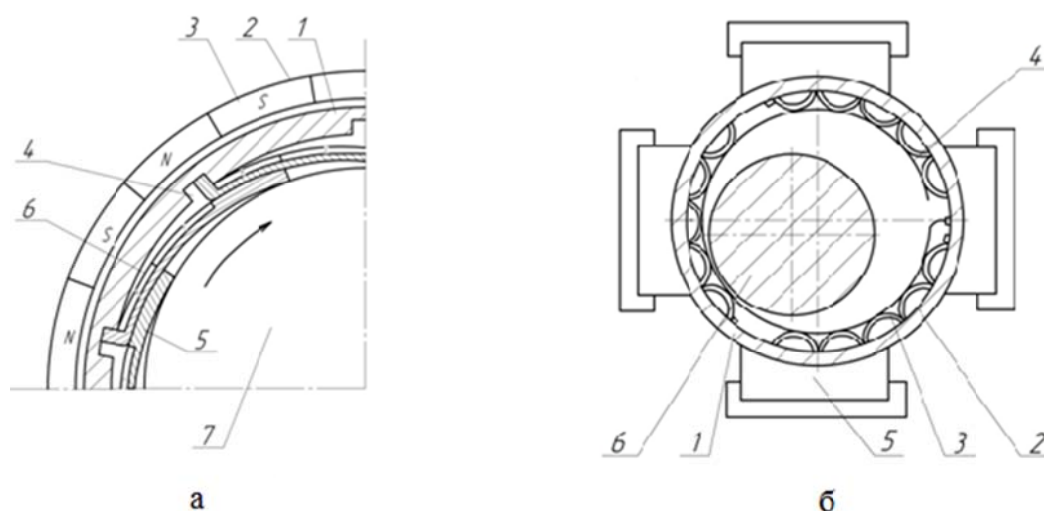


**Рисунок 2 – Схемы комбинированных опор роторов в зависимости от расположения вала в опорном узле:**  
 а) внешнее расположение вала; б) внутреннее расположение вала

Различают две принципиальные конструктивные схемы роторно–опорной системы. На рисунке 2, а представлена схема комбинированной опоры, где конструктивные элементы узла интегрированы во внутреннюю структуру вращающегося вала. Устройство работает следующим образом: в момент запуска машины вращение вала 3 и передача нагрузки на корпус 1 осуществляется через подшипник качения 2. Восприятие крутящего момента вала наружным кольцом подшипника качения реализуется за счет сил сцепления, возникающими между упругими металлическими пластинами 4 и наружным кольцом подшипника качения. При растущей частоте вращения происходит процесс деформации упругих металлических

пластин под действием центробежных сил, что приводит к образованию одной из поверхностей подшипника скольжения на внутренней поверхности вала. В этот момент прекращает свою работу опора качения, вращение наружного кольца которого, осуществляется за счет момента трения опоры скольжения. Когда механизм останавливается выполняются обратные процессы [7]. Преимуществом описанной выше схемы является оптимальность массогабаритных характеристик узла, недостатком – сложность изготовления. На рисунке 2, б представлена более традиционная схема проектирования КО, получившая широкое практическое применение в машиностроении. Принцип работы схож с изложенным выше: при запуске машины вал 4 опирается на подшипник качения, внутреннее кольцо 2 которого крепится на валу 4 с помощью лепестков 6. При достижении определенного значения окружной скорости происходит деформация упругих элементов переключения 7 под действием центробежной силы. При этом винты 8 системы крепления лепестков являются ограничителями максимального прогиба упругих элементов. Крепления лепестков 5 отходят назад и вал 4 вращается в лепестковом газодинамическом подшипнике, смонтированном внутри подшипника качения. С увеличением скорости вращения вала 4 крепления лепестков 5 под действием центробежных сил деформируют упругие элементы переключения 7 и смещаются по пазу в радиальном направлении, освобождая вал 4, который с этого момента может вращаться в режиме газодинамического трения. Далее передача нагрузки на корпус и поддержание вала в пространстве осуществляется за счет радиального лепесткового газодинамического подшипника скольжения, образуемого стальными упругими лепестками и антифрикционной втулкой. При уменьшении скорости вращения все процессы происходят в обратном порядке [8].

Широкой научной популярностью пользуется такое направление развития опорных узлов как создание магнитного подшипника. Интерес вызван рабочими характеристиками, согласно которым опора позволит работать роторной машине на неограниченных скоростях, без износа. Магнетизм, как физический процесс, применяется для усовершенствования известных конструкций роторно–опорных систем с целью минимизации износа контактирующих поверхностей. По принципу воздействия на элементы роторного механизма различают два вида таких систем. Рассмотрим их принцип действия и основные отличия на примере конструкций, представленных на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Схемы комбинированных опор роторов в зависимости от воздействия электромагнита на роторно–опорную систему: а) воздействие на лепестки; б) воздействие на вал**

На рисунке 3, а показана схема лепесткового газового подшипника, в конструкцию которого интегрированы магнитные элементы, оказывающие воздействия на лепестки в моменты пуска–останова роторной машины. Принцип работы заключается в следующем: лепестки 5 образуют многоклиновую упругую поверхность, при выходе на рабочие частоты вращения отделенную от вала 7 слоем газообразного смазочного материала. Перемещением подвижной обоймы 2 относительно неподвижного корпуса 1 можно регулировать

взаимодействие магнитов подвижной обоймы 3 и магнитов лепестков 6, меняя вектор их взаимодействия от полного притяжения до отталкивания, включая промежуточные положения. Это позволяет влиять на функцию радиального зазора и жесткость комплекта лепестков [9]. Таким образом, притягивая или отталкивая лепестки, происходит управление положением ротора и предотвращение вероятного контакта рабочих поверхностей узла и ротора в режиме номинального функционирования агрегата. На стартовых и финишных этапах работы влияние магнитных сил в совокупности с центробежными силами способствует максимально быстрому занятию валом номинального положения, тем самым уменьшая время контакта поверхностей лепестков о ротор. Основным отличием конструкции, представленной на рисунке 3, б от описанной выше является то, что воздействие магнитных сил направлено не на лепестки опорного узла, а на сам ротор. Круговые гофрированные элементы 3 и опорный лепесток 4, прикрепленные к внутренней поверхности 2 корпуса 1, плотно фиксируют вал 6 до начала вращения. В момент пуска и останова включаются магниты 5, которые приподнимают вал 6, практически, исключая контакт поверхности опорного лепестка 4 и вала 6 в режиме сухого трения [10]. Следует отметить, согласно анализу результатов научных исследований, разработки роторных опор с применением электромагнетизма являются весьма актуальными в научных коллективах, и предельно востребованы в отраслях промышленного машиностроения.

Не менее 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 нашем случае газовоздушной смеси) в момент старта и останова ротора, а также корректировать его положение во время работы, тем самым предоставляя возможность варьировать показателями жесткости 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 лепесткового подшипника, представленных на рисунке 4.

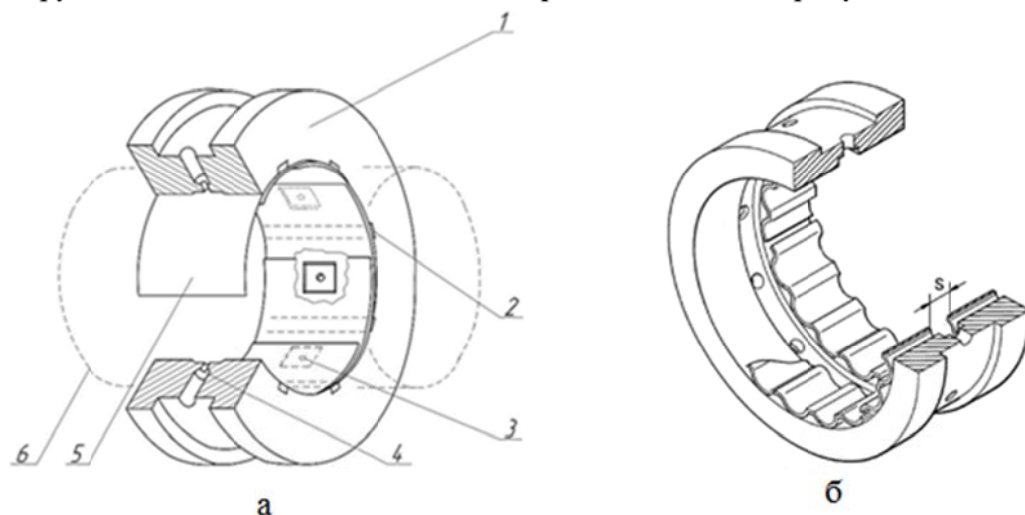


Рисунок 4 – Схема роторно–опорного узла с реализованной системой наддува

На рисунке 4, а приведена схема, отражающая конструктивные решения по обеспечению наддувом лепесткового гидростатического подшипника скольжения. Опора состоит из корпуса 1, пазов для крепления лепестков 2, прямоугольных питающих камер 3, подводящих каналов 4, лепестков 5 и работает следующим образом. При отсутствии вращения вал 6 плотно охвачен лепестками 5. В моменты пуска и останова лепестки 5 контактируют с валом 6, до набора им частоты всплытия. 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 турбомашин из строя. При вращении вала 6 лепестки и весь лепестковый гидростатический 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 гидростатическом подшипнике происходит за счет деформаций упругих элементов, трения между ними, а также за счет демпфирования гидродинамического слоя под лепестками [11]. Достоинства конструкции представленной на рисунке 4, б и способа в целом заключаются в том, что принудительное повышение давления смазочного материала значительно увеличивает жесткость подшипника, демпфирование колебаний и устойчивость движения, способствует снижению влияния температурных деформаций, что положительно влияет на ресурс работы подшипника, и самое главное предотвращает фрикционные процессы. Применение системы наддува позволяет повысить срок службы и снизить вероятность аварийной ситуации.

### Выводы.

На основе выполненного анализа и описания применяемых способов минимизации износа соприкасающихся рабочих поверхностей роторно–опорной системы представляется возможным назначать рекомендации и давать заключения по выбору отдельного способа или их синергетическом объединении применительно к каждой индивидуальной высокоскоростной турбомашине, а также позволяет выявить наиболее приемлемое перспективное развитие выбранного способа совершенствования лепестковых газовых опор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытин, А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис. кандидата техн. наук: 01.02.06 / Сытина Антона Валерьевича. – Орел, 2008. – 4 с.
2. Румянцев, М.Ю., Захарова Н.Е., Сигачев С.И. Применение лепестковых газодинамических подшипников в турбогенераторных агрегатах малой мощности. – Известия МГТУ «МАМИ». Транспортные средства и энергетические установки. Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 4(22), 2014, т. 1, 116 с.
3. Базлов, Д.О. Динамические характеристики комбинированных опор с упругими элементами переключения роторных машин: дис. кандидата техн. наук: 01.02.06 / Базлова Дениса Олеговича. – Орел, 2013. – 5 с.
4. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах Под ред. М. А. Шлугера, Л. Д. Тока. – М.: Машиностроение, 1985.
5. Казаков, В. А., Шлугер М. А. Износостойкие и антифрикционные гальва-нические покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
6. Родичев, А. Ю. Технологическое повышение прочности сцепления и изно-состойкости антифрикционного покрытия биметаллических подшипников скольжения. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 2011. – 224 с.
7. Кожухов, М.А., Комаров Н.В., Сытин А.В. Адаптивная комбинированная опора высокоскоростного ротора с упругими элементами механизма переключения. – Сборник научных статей II Международной научно–технической конференции (17–18 июня 2016 года), в 2-х томах, Том 1, / редкол.: Гречухин А.Н (отв. редактор); Юго–Западный гос. ун–т, Курск, 2016. 235 с.
8. Патент РФ № 2558161, 2015 Комбинированная опора // Патент России № 2558161, МПК: F16C17/12; F16C27/02; F16C 32/06 / Савин Л.А. (РФ), Сытин А.В. (РФ), Галичев А.С. (РФ) и др.
9. Патент США № 6921207, 2005 Лепестковый подшипник // Патент США № 6921207, МПК: F16C32/04 / Minoru Matsunaga (JP).
10. Патент США № 6353273, 2002 Гибридный лепестковый магнитный подшипник // Патент США № 6353273, МПК: F16C 32/06 / Hooshang Heshmat (US), H. Ming Chen (US), James F. Walton II (US).
11. Патент США № 5885004, 1999 Лепестковый гидростатический подшипник // Патент США № 5885004 МПК: F16C 17/03 / Joseph K. Scharrer (US), Robert F. Beatty (US).
12. Поляков, Р.Н. Повышение динамических качеств и ресурса опорных узлов роторов совмещением подшипников качения и скольжения: дис. кандидата техн. наук: 01.02.06 / Поляков Роман Николаевич. – Орел, 2005. – 158 с.

**Кожухов Максим Алексеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева»  
аспирант,  
maksimkakozhuhov@mail.ru

**Сытин Антон Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева»  
канд. техн. наук, доц.,  
sytin@mail.ru

**Родичев Алексей Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева»  
канд. техн. наук, доц.,  
rodfox@yandex.ru

M.A. KOZHUKHOV, A.V. SYTIN, A.Yu. RODICHEV

## MEANS OF PROVISION OF MINIMAL WEAR OF GAS FOIL BEARINGS SURFACE DURING TRANSITION REGIME

**Abstract.** *the present paper considers main reasons of wear of foil elements of a foil gas bearing, which is directly connected with decrease of lifetime expectancy of a rotor-bearing system. The most perspective means of minimization of negative factors impact that influences the wear rate of elastic elements of a gasdynamic bearing. Classification of the considered means has been presented along with a detailed description of an impact sufficient to minimize the wear rate. The conclusion has been made regarding positive and negative effects of every means presented.*

**Keywords:** *foil gas bearing; wear of foil elements; lifetime expectancy of rotor-bearing system; combined bearing; pressurization; special coating of foil elements.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Sytin A. V. Resheniye kompleksnoy zadachi rascheta kharakteristik radial nykh lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikov: dis. kandidata tekhn. nauk: 01.02.06 / Sytina Antona Valer'yevicha. – Orel, 2008. – 4 s.
2. Rumyantsev M.YU., Zakharova N.Ye., Sigachev S.I. Primeneniye lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikov v turbogeneratorykh agregatakh maloy moshchnosti. – Izvestiya MGTU «MAMI». Transportnyye sredstva i energeticheskiye ustanovki. Nauchnyy retsenziruyemyy zhurnal. – M., MGTU «MAMI», № 4(22), 2014, t. 1, 116 s.
3. Bazlov D.O. Dinamicheskiye kharakteristiki kombinirovannykh opor s uprugimi elementami pereklyucheniya rotornykh mashin: dis. kandidata tekhn. nauk: 01.02.06 / Bazlova Denisa Olegovicha. – Orel, 2013. – 5 s.
4. Gal vanicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii. Spravochnik. V 2–kh tomakh Pod red. M. A. Shlugera, L. D. Toka. – M.: Mashinostroyeniye, 1985.
5. Kazakov V. A., Shluger M. A. Iznosostoykiye i antifriktsionnyye gal va–nicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii. – L.: Mashinostroyeniye, 1981. – 212 s.
6. Rodichev A. YU. Tekhnologicheskoye povysheniye prochnosti stsepleniya i izno–sostoykosti antifriktsionnogo pokrytiya bimetallicheskikh podshipnikov skol zheniya. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. Orel, 2011. – 224 s.
7. Kozhukhov M.A., Komarov N.V., Sytin A.V. Adaptivnaya kombinirovannaya opora vysokoskorostnogo rotora s uprugimi elementami mekhanizma pereklyucheniya. – Sbornik nauchnykh statey II Mezhdunarodnoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii (17–18 iyunya 2016 goda), v 2–kh tomakh, Tom 1, / redkol.: Grechukhin A.N (otv. redaktor); Yugo–Zapadnyy gos. un–t, Kursk, 2016. 235 s.
8. Patent RF № 2558161, 2015 Kombinirovannaya opora // Patent Rossii № 2558161, MPK: F16C17/12; F16C27/02; F16S 32/06 / Savin L.A. (RF), Sytin A.V. (RF), Galichev A.S. (RF) i dr.
9. Patent SSHA № 6921207, 2005 Lepestkovyy podshipnik // Patent SSHA № 6921207, MPK: F16C32/04 / Minoru Matsunaga (JP).
10. Patent SSHA № 6353273, 2002 Gibridnyy lepestkovyy magnitnyy podshipnik // Patent SSHA № 6353273, MPK: F16C 32/06 / HooshangHeshmat (US), H. Ming Chen (US), James F. Walton II (US).
11. Patent SSHA № 5885004, 1999 Lepestkovyy gidrostaticheskiy podshipnik // Patent SSHA № 5885004 MPK: F16C 17/03 / Joseph K. Scharrer (US), Robert F. Beatty (US).
12. Polyakov R.N. Povysheniye dinamicheskikh kachestv i resursa opornykh uzlov rotorov sovmeshcheniyem podshipnikov kacheniya i skol zheniya: dis. kandidata tekhn. nauk: 01.02.06 / Polyakov Roman Nikolayevich. – Orel, 2005. – 158 s.

**Kozhuhov Maksim Alekseevich**  
FGBOU VO «ОГУ named after I.S.  
Turgenev».  
Graduate,  
maksimkakozhuhov@mail.ru

**Sytin Anton Valerevich**  
FGBOU VO «ОГУ named after I.S.  
Turgenev».  
candidate of technical science,  
docent,  
sytin@mail.ru

**Rodichev Alexey Yurievich**  
FGBOU VO «ОГУ named after I.S.  
Turgenev».  
candidate of technical science,  
docent,  
sytin@mail.ru

УДК 621.822

А.Ю. КОРНЕЕВ, ЛИ ШЕНБО

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ЖЕСТКОГО РОТОРА НА КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ С МЕТАЛЛОРЕЗИНОВЫМИ ДЕМПФЕРАМИ

**Аннотация.** Предложена методика расчета динамики жесткого ротора на конических подшипниках жидкостного трения с металлорезиновыми (МР) демпферами. Система уравнений движения записана для двухмассового двухопорного ротора на конических подшипниках скольжения с МР-демпферами. Результаты иллюстрируются характерными траекториями, полученными для конических подшипников, смазываемых водой.

**Ключевые слова:** динамика, конический подшипник, демпфер, металлорезина, уравнения движения, метод траекторий.

## Введение.

В предыдущей работе [1] была рассмотрена динамика роторов на конических опорах скольжения, жестко закрепленных в корпусе агрегата. Однако, в силу специфических свойств гидродинамических сил, действующих в смазочном слое, такое крепление подшипников скольжения может способствовать при вращении ротора возникновению опасных автоколебаний, развивающихся в широком диапазоне скоростей вращения [2]. В этой связи, в системе «ротор–подшипник» при определенных условиях могут возникнуть повышенные вибрации, что неблагоприятно сказывалось на работе всей машины. Одним из путей снижения нежелательных вибраций может стать конструкция конического подшипника жидкостного трения совместно с упруго–демпферной опорой. В качестве материала такой опоры предлагается использовать материал МР (металлорезина или металлический аналог резины), разработанный в Самарском государственном аэрокосмическом университете в 60–е годы прошлого столетия [3]. Материал МР обладают упругими свойствами, подобными свойствам как резины, так и пластмассы, но имеет в 10 раз большую прочность, не подвержен старению, в 2...3 раза лучше поглощают ударные и вибрационные нагрузки, может работать в агрессивных средах, не подвержен воздействию масел, грязи, пыли, выдерживает температуру от  $-50$  до  $+400$  °С, не боится радиации и не воспламеняются. Как показали исследования, в диапазоне частот 10 – 4000 Гц наилучшими вибропоглощающими свойствами обладает металлорезина с пористостью 0,75. Амплитуда колебаний при этом снижается в 6 – 10 раз. Варьировать свойства виброгасителей можно также подбором материала спирали, толщины проволоки, нанесением покрытий [3].

## Основная часть.

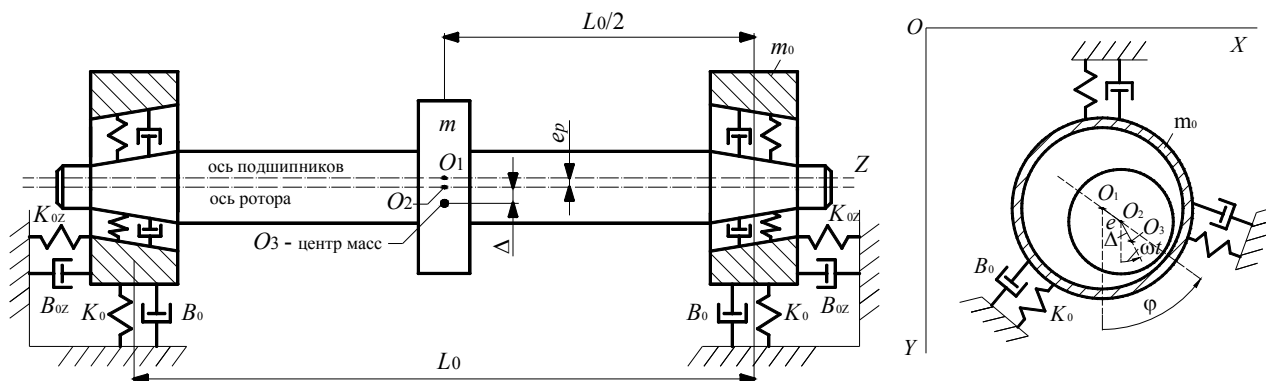


Рисунок 1 – Расчетная схема системы «ротор – конический подшипник с МР-демпфером»

Предлагаемая конструкция представляет собой втулку из МР-материала, охватывающую конический подшипник, что тем самым снижает уровень передаваемых на

корпус машины вибраций. Пусть исходная система представляет собой жесткий ротор массы  $m$ , опирающийся на два упругих конических подшипника жидкостного трения с металлорезиновым демпфером (рисунок 1). Для подавления автоколебаний в зоне повышенных скоростей вращения ротора исследуемый конический подшипник располагается в металлорезиновом демпфере, имеющем жесткость и демпфирование в радиальном направлении  $K_0$  и  $B_0$ , в осевом направлении  $K_{0Z}$  и  $B_{0Z}$  соответственно.

Для вывода уравнений движения введем неподвижную систему координат  $OXYZ$ . Пусть в этой системе  $X_1, Y_1, Z_1$  – координаты центра упруго–демпферной опоры  $O_1$ ;  $X_2, Y_2, Z_2$  – координаты центра шипа ротора  $O_2$ ;  $X_3, Y_3, Z_3$  – координаты центра масс (тяжести) ротора  $O_3$ ;  $\varphi$  – полярный угол линии центров (см. 1). Тогда, принимая во внимание, что  $X_3 = X_2 + \Delta \sin \omega t$ ,  $Y_3 = Y_2 + \Delta \cos \omega t$ , получим уравнения движения системы:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{X}_1 + B_0 \dot{X}_1 + K_0 X_1 = R_X; \\ m_0 \ddot{Y}_1 + B_0 \dot{Y}_1 + K_0 Y_1 = R_Y + m_0 g; \\ m_0 \ddot{Z}_1 + B_{0Z} \dot{Z}_1 + K_{0Z} Z_1 = R_Z; \\ m \ddot{X}_2 = -R_X + m \Delta \omega^2 \sin \omega t; \\ m \ddot{Y}_2 = -R_Y + m \Delta \omega^2 \cos \omega t + mg; \\ m \ddot{Z}_2 = -R_Z, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_0$  и  $m$  – масса опоры и ротора соответственно, при этом  $K_{0X} = K_{0Y} = K_0$ ,  $B_{0X} = B_{0Y} = B_0$ , поскольку МР–кольца обладают равножесткостными свойствами вдоль осей  $X$  и  $Y$ .

Первые три уравнения системы (1) являются уравнениями движения опоры под действием упругих сил  $K_{0X} X_1$ ,  $K_{0Y} Y_1$ ,  $K_{0Z} Z_1$ , сил демпфирования  $B_{0X} \dot{X}_1$ ,  $B_{0Y} \dot{Y}_1$ ,  $B_{0Z} \dot{Z}_1$  и реакций смазочного слоя  $R_X$ ,  $R_Y$ ,  $R_Z$ , направленных к опоре. Вторые три уравнения определяют уравнения движения ротора под действием реакций смазочного слоя  $R_X$ ,  $R_Y$ ,  $R_Z$ .

В целях упрощения записанной системы уравнений движения ротора (1) введем следующие предпосылки: будем полагать равным нулю дисбаланс ротора ( $\Delta = 0$ ) и отсутствие относительных перемещений в осевом направлении ( $Z_1 = Z_2 = 0$ ). Первое предположение обосновано тем, что пренебрежение дисбалансом ротора  $\Delta$ , как это подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями, практически не влияет ни на границу возникновения автоколебаний, ни на их интенсивность [2]. Отсутствие перемещений  $Z_i$  в осевом направлении связано с предположением, что система находится в условиях устойчивого (стационарного) положения. С учетом сделанных предположений система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{X}_1 + B_0 \dot{X}_1 + K_0 X_1 = R_X; \\ m_0 \ddot{Y}_1 + B_0 \dot{Y}_1 + K_0 Y_1 = R_Y + m_0 g; \\ m \ddot{X}_2 = -R_X; \\ m \ddot{Y}_2 = -R_Y + mg, \end{cases} \quad (2)$$

После обезразмеривания параметров и переменных, входящих в систему (2), согласно нижеприведенным выражениям:

$$\bar{X}\{\bar{Y}, \bar{Z}\} = \frac{X\{Y, Z\}}{h_0}; \quad \bar{R}_{X\{Y, Z\}} = \frac{R_{X\{Y, Z\}}}{p_0 r_0^2}; \quad \bar{G} = \frac{mg}{p_0 r_0^2}; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0};$$

$$K = \bar{K} \frac{p_0 r_0^2}{h_0}; \quad B = \bar{B} \frac{p_0 r_0^2}{\omega_0 h_0},$$

система уравнений движения для жесткого ротора в упруго–демпферных опорах примет вид:

$$\begin{cases} \Lambda_0 \bar{X}_1'' + \bar{B}_0 \bar{X}_1' + \bar{K}_0 \bar{X}_1 = \bar{R}_X; \\ \Lambda_0 \bar{Y}_1'' + \bar{B}_0 \bar{Y}_1' + \bar{K}_0 \bar{Y}_1 = \bar{R}_Y + \bar{G}_0; \\ \Lambda \cdot \bar{X}_2'' = -\bar{R}_X; \\ \Lambda \cdot \bar{Y}_2'' = -\bar{R}_Y + \bar{G}. \end{cases} \quad (3)$$

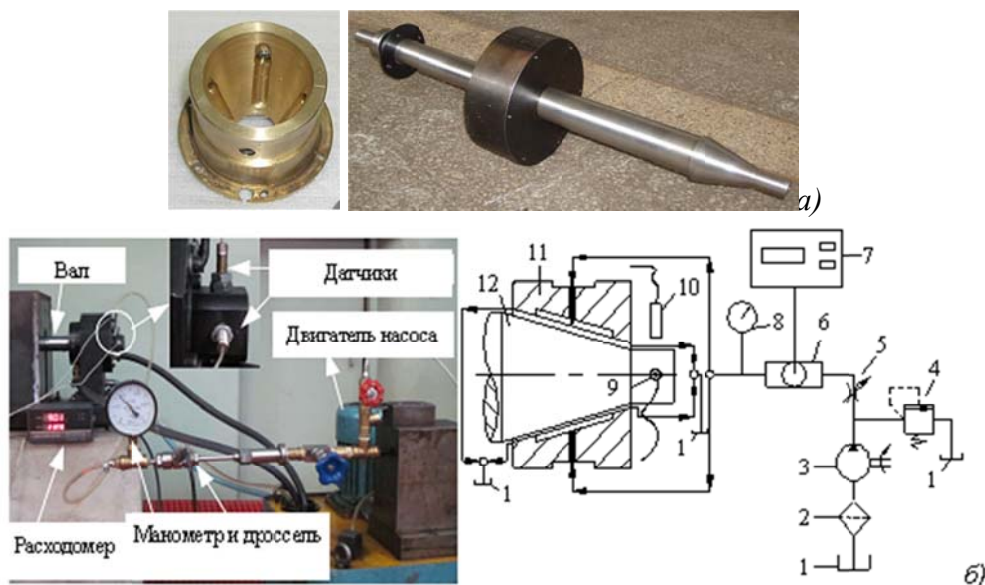
где  $\Lambda_0$  и  $\Lambda$  – приведенные массы упругой опоры и ротора соответственно:

$$\Lambda_{\{0\}} = \frac{m_{\{0\}} h_0}{p_0 r_0^2 t_0^2} = \frac{m_{\{0\}} h_0 \omega_0^2}{p_0 r_0^2}; \quad t_0 = \frac{1}{\omega_0}.$$

Аналитическое интегрирование полученной системы уравнений движения жесткого (3) ротора в упруго–демпферных опорах не представляется возможным ввиду отсутствия аналитических зависимостей для реакций смазочного слоя  $R_i$  и их производных. Поэтому для получения траекторий движения необходимо численное интегрирование уравнений системы (3). Алгоритм расчета траекторий движения центра цапфы в конических подшипниках скольжения подробно приведен в работе [1].

Как было отмечено в той же работе [1], одним из методов позволяющим судить об устойчивости системы «ротор – подшипники скольжения» является метод траекторий, являющийся эффективным средством [4 – 7] изучения влияния нелинейности реакций смазочного слоя и позволяющий моделировать реальное динамическое поведение ротора. Метод основан на совместном численном интегрировании системы уравнений гидродинамики несущего слоя и уравнений движения ротора. Поэтому можно отметить вклад различных эффектов, происходящих в смазочном слое, таких как вскипание и/или двухфазное состояние, на динамику ротора. Метод траекторий позволяет судить об устойчивости системы «ротор – подшипники скольжения» на основании вида траектории:

- если траектория центра цапфы ротора, беря начало в некоторой исходной точке, заканчивается либо фокусом, либо предельным циклом, то движение ротора устойчиво;
- если траектория центра цапфы либо монотонно удаляется от исходного положения, достигая со временем границы радиального зазора, либо постепенно заполняет некоторую область, не доходя до границы зазора, то движение ротора является неустойчивым.



**Рисунок 2 – Высокоскоростная роторная система с коническими подшипниками:**

(а) Конический подшипник и вал с конической поверхностью; (б) Фото и схема измерительной системы: 1–бак, 2–фильтр, 3–гидравлический насос, 4–перепускной клапан, 5–дроссель, 6–датчик расходомера, 7–расходомер, 8–манометр, 9,10–датчики перемещений по осям X и Y, 11–конический подшипник, 12–вал

Для проверки адекватности разработанных математических моделей были проведены экспериментальные исследования динамики ротора на коническом подшипнике жидкостного трения с металлорезиновым демпфером. На рисунке 2 представлены фото подшипника и ротора с нагрузочным диском, стенда и схема измерительной системы, позволяющая получать после соответствующей обработки полученных данных траектории движения центра цапфы. После установки подшипника в корпус установки определяется радиальный зазор, который составляет  $h_{0xy} = 137$  мкм, тогда полный зазор, определяемый зависимостью  $h_0 = h_{0xy} / \cos(\alpha/2)$ , составляет  $h_0 = 142$  мкм. При проведении эксперимента использовался расходомер марки LW6 для измерения расхода масла, на крышке в торце вала перпендикулярно друг другу устанавливались два датчика для измерения перемещений вала и построения траекторий движения (рисунок 2, б).

На диаграмме 3 (а) представлено сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета и измерения расхода смазочного материала в зависимости от давления подачи смазки в зазор подшипника при невращающемся вале. Можно отметить, что расход смазочного материала увеличивается с ростом давления подачи, теоретические и экспериментальные результаты имеют качественное согласование между собой.

На диаграмме 3 (б) представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния давления подачи смазочного материала на величину всплытия вала в зазоре подшипника при отсутствии вращения. Отмечается, увеличение давления подачи смазочного материала приводит к росту величины поднятия вала. Всплытие вала при заданных геометрических и рабочих параметрах происходит при достижении величины давления подачи  $p_0 = 0,24$  МПа, обеспечивая при этом достаточную статическую несущую способность.

Значительное расхождение в теоретических и экспериментальных результатах связано с тем, что испытываемый ротор поддерживался с одной стороны шарикоподшипником (фиксированное положение) и с другой стороны коническим гидростатическим подшипником. Следовательно, при всплытии вала появляется момент относительно фиксированного конца, не учтенный в теоретическом анализе, что и приводит к достаточно значительному расхождению данных теоретических и экспериментальных исследований.

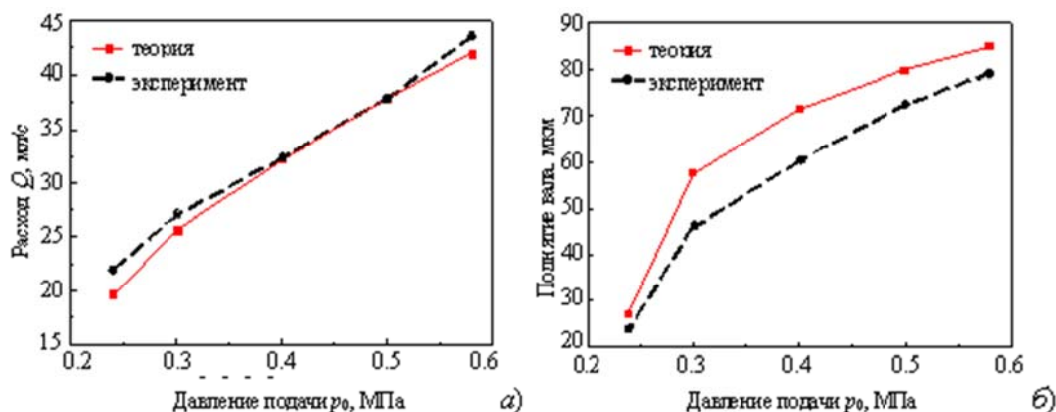


Рисунок 3 – Диаграммы расхода смазочного материала (а) и величины поднятия вала (б) от давления подачи

На рисунке 4 представлены кривые подвижного равновесия (точки устойчивого равновесия) при давлениях подачи смазочного материала  $p_0 = 0,16$  МПа;  $0,26$  МПа и  $0,36$  МПа и фиксированной внешней нагрузке. При проведении экспериментальных исследований угловая скорость ротора задавалась в интервале  $\omega_0 = 900 \div 7500$  об/мин с шагом в  $600$  об/мин. Как видно из графиков, при давлении подачи смазочного материала  $p_0 = 0,16$  МПа цапфа вала не всплывает, после начала вращения действие гидродинамического эффекта приводит к всплытию и смещению вала влево. При увеличении давления подачи смазочного материала до  $0,26$  МПа вал всплывает и при отсутствии вращения. С ростом угловой скорости положение центра цапфы (точка устойчивого равновесия) смещается в сторону

геометрического центра подшипника, т.е. уменьшается радиальный эксцентриситет. Это показывает рост гидродинамических эффектов в зазоре подшипника, обеспечивающих изменения в положении цапфы. Теоретические и экспериментальные кривые имеют схожий характер, однако есть и некоторые расхождения. Причина расхождения связана с тем, что в теоретических расчетах не было учтено влияние внешнего фиксированного момента. В процессе установки конического гидростатодинамического подшипника отклонения составили порядка  $6^\circ$  между средней и продольной осями камеры. Ошибка измерения датчиков также является одной из причин появления расхождения в значениях.

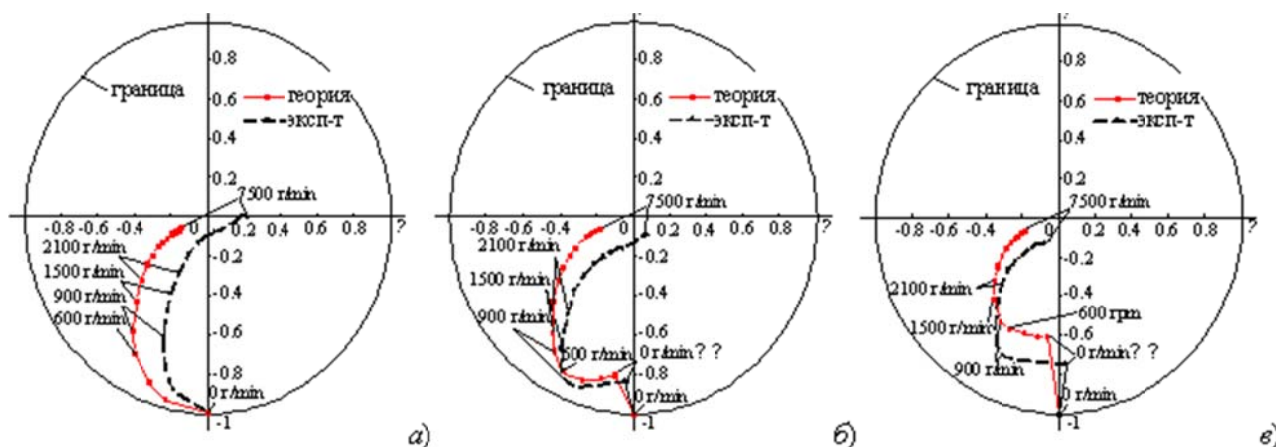


Рисунок 4 – Кривые подвижного равновесия при давлениях подачи: а – 0.16 МПа, б – 0.26 МПа, в – 0.36 МПа

### Закключение.

Решение обобщенного уравнения Рейнольдса и адиабатического уравнения баланса энергий с учетом турбулентных и тепловых эффектов для случая конического гидростатического подшипника с прямоугольными камерами подробно приведено в работе [8]. Проведя теоретические и экспериментальные исследования работы конического подшипника жидкостного трения с МР-демпфером, можно отметить, что подшипник обладает необходимыми статическими характеристиками, обеспечен достаточной смазкой в момент пуска и останова, эффективно избегает образования сухого трения в процессе работы. Течение смазки пропорционально давлению подачи смазочного материала, гидродинамический эффект возрастает с ростом угловой скорости. В случае небольших нагрузок подшипник работает при малых эксцентриситетах.

Отмечается, что теоретические и экспериментальные результаты имеют качественное согласование, теоретический анализ подтверждается обоснованным математическим аппаратом. Дальнейший анализ роторной системы на конических подшипниках с МР-демпферами будет представлен в следующих работах.

*Статья поддержана Государственным фондом естественных наук Китая (грант № 51405410) и Государственным фондом естественных наук провинции Фуцзянь (КНР) (грант № 2015J01228).*

*This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51405410) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (Grant No. 2015J01228).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев А.Ю. Математическая модель расчета динамики жесткого ротора на конических подшипниках скольжения методом траекторий // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 3–3/293, 2012. – С. 3 – 9.
2. Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
3. Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, Е.В. Колтыгин. Конструирование рабочих органов машин и оборудования из упругопористого материала МР // Учеб.– справ. пособие, НПЦ «Авиатор»: Самара, 1994. – Ч.1. – 156 с.
4. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Конические подшипники жидкостного трения: монография. М: Машиностроение–1, 2008. – 172 с.
5. Соломин О.В. Колебания и устойчивость роторов на подшипниках скольжения в условиях вскипания смазочного материала: Дисс. канд. техн. наук. – Орел, 2000. – 259 с.

6. Артеменко Н.П., Доценко В.Н., Чайка А.И. Траектории вынужденных колебаний и автоколебаний высокоскоростных роторов на ГСП // Исследование и проектирование гидростатических опор и уплотнений быстроходных машин. – Харьков: ХАИ, 1977. – Вып. 4. – С. 31–35.

7. Пешти Ю.В. Газовая смазка. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 382 с.

8. Корнеев А.Ю., Шенбо Ли. Расчет полей давлений и температур в смазочном слое конических гидростатодинамических подшипников // Вестник Брянского государственного технического университета. № 1 (54), 2017. – С. 12–24.

**Корнеев Андрей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
Декан факультета среднего профессионального образования,  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел. 8–953–474–62–62  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Ли Шенбо**

Институт машиностроения и автомобилестроения  
Сямыньского технологического университета  
361024, г. Сямынь, КНР, округ Джимей,  
ул. Лигонг, 600  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Мехатроника»  
Тел. +86–133–9599–4920  
E-mail: hit4057@xmut.edu.cn

---

A.Yu. KORNEYEV, LI SHENGBO

**THE CALCULATION PROCEDURE OF THE DYNAMICS  
OF RIGID ROTOR ON THE CONICAL LIQUID FRICTION BEARINGS  
WITH METAL–RUBBER DAMPERS**

**Abstract.** *The calculation procedure of the dynamics of rigid rotor on the conical liquid friction bearings with metal–rubber (MR) dampers is offered. The equations set of motion is written for two mass two–bearing rotor on the conical bearings with MR–dampers. The results are illustrated by the plots of trajectories for the conical bearings with water lubricant.*

**Keywords:** *dynamics, conical bearing, damper, metal–rubber, equations of motion, trajectory method.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Korneyev A.YU. Matematicheskaya model rascheta dinamiki zhestkogo rotora na konicheskikh podshipnikakh skolzheniya metodom trayektoriy // Izvestiya OrelGTU. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. № 3–3/293, 2012. – С. 3 – 9.

2. Kelzon A.S., Tsimanskiy YU.P., Yakovlev V.I. Dinamika rotorov v uprugikh oporakh. – М.: Nauka, 1982. – 280 s.

3. D.Ye. Chegodayev, O.P. Mulyukin, Ye.V. Kolygin. Konstruirovaniye rabochikh organov mashin i oborudovaniya iz uprugoporistogo materiala MR // Ucheb.– sprav. posobiye, NPTS «Aviator»: Samara, 1994. – CH.1. – 156 s.

4. Korneyev A.YU., Savin L.A., Solomin O.V. Konicheskiye podshipniki zhidkostnogo treniya: monografiya. M: Mashinostroyeniye–1, 2008. – 172 s.

5. Solomin O.V. Kolebaniya i ustoychivost rotorov na podshipnikakh skolzheniya v usloviyakh vskipaniya smazochnogo materiala: Diss. kand. tekhn. nauk. – Orel, 2000. – 259 s.

6. Artemenko N.P., Dotsenko V.N., Chayka A.I. Trayektorii vynuzhdennykh kolebaniy i avtokolebaniy vysokoskorostnykh rotorov na GSP // Issledovaniye i proyektirovaniye gidrostaticheskikh opor i uplotneniy bystrokhodnykh mashin. – Kharkov: KHAI, 1977. – Vyp. 4. – С. 31–35.

7. Peshti YU.V. Gazovaya smazka. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 382 с.

8. Korneyev A.YU., Shenbo Li. Raschet poley davleniy i temperatur v smazochnom sloye konicheskikh gidrostatodinamicheskikh podshipnikov // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. № 1 (54), 2017. – С. 12–24.

**Korneev Andrey Yurievich**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
Декан факультета среднего профессионального образования,  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел. 8–953–474–62–62  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Li Shengbo**

Институт машиностроения и автомобилестроения  
Сямыньского технологического университета  
361024, Xiamen, China, Jims District,  
ул. Лигонг 600  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Мехатроника»  
Тел. + 86–133–9599–4920  
E-mail: hit4057@xmut.edu.cn

## **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 531.385

Д.М. МАЛЮТИН

### **ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ГРАВИМЕТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**Аннотация.** Рассмотрена схема индикаторного гиростабилизатора гравиметра с комбинированным управлением. Приведено математическое описание системы. Исследованы различные структурные решения построения цепей компенсации возмущающих воздействий. Получены соотношения для выбора параметров цепей компенсации возмущений, обеспечивающих их эффективное функционирование.

**Ключевые слова:** морской гравиметр, гиростабилизатор, комбинированное управление.

#### **Введение**

В настоящее время продолжают активные исследования в области гравиметрии. Если в глобальном плане гравитационное поле Земли известно по результатам спутниковых съемок, то крупномасштабные карты отдельных участков практически отсутствуют, хотя в них имеется большая потребность [1–5].

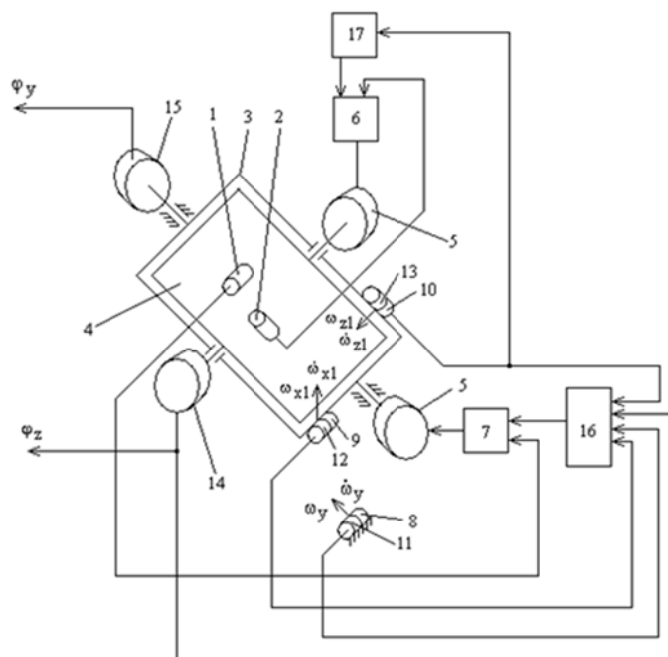
Задача повышения точности гравиметрических измерений является актуальной и сегодня [2,6,7]. Уровень точности применяемой аппаратуры для целей разведки месторождений углеводородного сырья должен обеспечивать уверенное обнаружение аномалий с амплитудой 0,1–0,2 мГал. Перспективной является задача увеличения точности гравиметрических измерений до уровня 0,01–0,05 мГал. Обеспечение перспективной точности возможно при проведении работ, связанных с совершенствованием гиростабилизаторов (ГС), гравиметрического датчика, увеличением точности обработки гравиметрической информации, методики проведения гравиметрической съемки, увеличением точности навигационной информации о параметрах движения объекта-носителя.

Совершенствование ГС возможно не только при использовании новых чувствительных и исполнительных элементов повышенной точности [8], но и за счет использования метода комбинированного управления [9], включая компенсацию возмущающих воздействий (особенно при работе на малотоннажных судах или малоразмерных летательных аппаратах в условиях повышенного уровня возмущений), исследования различных структурных решений при построении цепей компенсации возмущающих воздействий, получения соотношений для выбора параметров цепей компенсации возмущений, обеспечивающих их эффективное функционирование.

ГС с комбинированным управлением представляет собой объединение в одну систему замкнутой системы управления по отклонению и разомкнутой системы управления по возмущающему воздействию. Принцип компенсации возмущений позволяет существенно повысить точность стабилизации за счет использования информации о внешней ситуации.

#### **Функциональная схема**

В работе [10] предложена схема компенсации возмущений, действующих на систему стабилизации и наведения линии визирования в процессе трехкомпонентной качки подвижного объекта. Рассмотрим функциональную схему контуров стабилизации ГС с комбинированным управлением, работающего в режиме гировертикали (рисунок 1). Для формирования компенсирующих сигналов используется информация с дополнительных датчиков угловой скорости (ДУС) и углового ускорения (ДУУ), установленных на основании и наружной рамке ГС. Актуальной является задача выбора структуры и параметров схемы компенсации возмущений, при которых обеспечивается лучшее качество компенсации внешних возмущений, а следовательно, увеличение точности стабилизации.



**Рисунок 1 – Функциональная схема контуров стабилизации ГС с комбинированным управлением:**

- 1, 2 – ДУС контуров стабилизации платформы относительно осей  $y_2, z_2$ ,  
 3 – наружная рамка ГС, 4 – стабилизируемая платформа, 5 – исполнительные двигатели (датчики моментов),  
 6, 7 – усилители, 8, 9, 10 – ДУС цепей компенсации возмущений,  
 11, 12, 13 – ДУУ цепей компенсации возмущений, 14, 15 – датчики углов,  
 16, 17 – вычислители компенсирующих сигналов

### Математическая модель ГС с комбинированным управлением

Математическая модель контуров стабилизации двухосного ГС с комбинированным управлением имеет вид (1). В уравнениях (1) проекции абсолютной угловой скорости носителя на его главные оси обозначены  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ , где система координат  $x_0y_0z_0$  жестко связанная с основанием. Положение осей гиросtabilизированной платформы с установленной на ней гравиметрической аппаратурой  $x_2y_2z_2$  относительно  $x_0y_0z_0$  задано углами  $\varphi_y, \varphi_z$ .  $\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2}$  – проекции абсолютной угловой скорости платформы. С наружной рамкой ГС связаны оси координат  $x_1y_1z_1$ .  $M_{ds1}, M_{ds2}$  – моменты, развиваемые исполнительными двигателями (датчиками момента) наружной рамки и платформы соответственно,  $M_{bn1}, M_{bn2}$  – возмущающие моменты относительно осей наружной рамки и платформы соответственно,  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции платформы относительно соответствующих осей;  $J_{x1}, J_{y1}, J_{z1}$  – моменты инерции наружной рамки относительно соответствующих осей;  $b_1, b_2$  – удельные демпфирующие моменты относительно осей наружной рамки и платформы соответственно,  $K_{ymi}$  – коэффициент передачи усилителя контура стабилизации,  $K_{dsi}$  – коэффициент передачи датчиков момента (ДМ),  $W_{kz1}(p)$ ,  $W_{kz2}(p)$  – передаточные функции корректирующих звеньев контуров стабилизации,  $p$  – оператор дифференцирования,  $T_{ds1}, T_{ds2}$  – электромагнитные постоянные времени датчиков момента;  $K_3, K_4, K_5, K_6$  – коэффициенты передачи цепей компенсации возмущений,  $K_{dys1}$ ,  $K_{dys2}$  – коэффициенты передачи ДУС контуров стабилизации платформы относительно осей  $y_2, z_2$  соответственно,  $W_{kz3}(p), W_{kz4}(p), W_{kz5}(p), W_{kz6}(p)$  – передаточные функции цепей компенсации возмущений,  $K_{dyy(y)}, K_{dyy(x1)}, K_{dyy(z1)}, K_{dys(y)}, K_{dys(x1)}, K_{dys(z1)}$  – коэффициенты передачи дополнительных ДУУ и ДУС, оси чувствительности которых

направлены вдоль осей  $y, x_1, z_1$ .  $T_{dys}, T_{dyy}$  – постоянные времени ДУС и ДУУ,  $\xi_{dyy}, \xi_{dys}$  – коэффициенты демпфирования собственных колебаний ДУУ и ДУС.

$$\left\{ \begin{aligned} & (J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1}) \dot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z + b_1 \omega_{y2} / \cos \varphi_z - M_{ds1} = \\ & -(J_x - J_z) \omega_{z2} \omega_{x2} \cos \varphi_z - (J_z - J_y) \omega_{z2} \omega_{y2} \sin \varphi_z + M_{bn1} + b_1 \omega_y - \\ & - b_1 (\omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z) - J_{y1} (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y) - \\ & - (J_{x1} - J_{z1}) \omega_{x1} \omega_{z1} - (J_x + J_{y1}) \dot{\omega}_{x1} \operatorname{tg} \varphi_z - (J_x + J_{y1}) (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{x2} \operatorname{tg} \varphi_z \sin \varphi_z + \\ & + \omega_{y2} \sin \varphi_z), \\ & J_z \dot{\omega}_{z2} + b_2 \omega_{z2} - M_{ds} = M_{bn2} - b_2 (-\omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y) - (J_y - J_x) \omega_{x2} \omega_{y2}, \\ & \alpha = \int_0^t \omega_{y2} dt, \quad \beta = \int_0^t \omega_{z2} dt, \\ & U_{dys1}(p) = K_{dys1} \omega_{y2}(p) / (T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1), \\ & U_{dys2}(p) = K_{dys2} \omega_{z2}(p) / (T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1), \\ & U_1(p) = K_{ym1} W_{kz1}(p) U_{dys1}(p), \quad U_2(p) = K_{ym2} W_{kz2}(p) U_{dys2}(p), \\ & U_3(p) = \omega_y(p) \left( \frac{K_{dyy(y)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} + \frac{K_{dys(y)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} \right) W_{kz3}(p) K_3, \quad K_3 = b_1, \\ & U_4(p) = \omega_{x1}(p) \left( \frac{K_{dyy(x1)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} + \frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} \right) W_{kz4}(p) K_4, \quad K_4 = b_1 \operatorname{tg} \varphi_z, \\ & U_5(p) = \omega_{x1}(p) \left( \frac{K_{dyy(x1)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right) W_{kz5}(p) K_5, \quad K_5 = (J_x + J_{y1}) \operatorname{tg} \varphi_z, \\ & U_6(p) = \omega_{z1}(p) \left( \frac{K_{dyy(z1)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} + \frac{K_{dys(z1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} \right) W_{kz6}(p) K_6, \quad K_6 = b_2, \\ & U_7(p) = U_1(p) + U_3(p) - U_4(p) - U_5(p), \quad U_8(p) = U_2(p) + U_6(p), \\ & T_{ds1} M_{ds1}(p) p + M_{ds1}(p) = K_{ds1} U_7(p), \quad T_{ds2} M_{ds2}(p) p + M_{ds2}(p) = K_{ds2} U_8(p), \\ & \omega_{z1} = \omega_z \cos \varphi_y + \omega_x \sin \varphi_y, \quad \omega_{x1} = \omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y, \\ & \omega_{x2} = \omega_x \frac{\cos \varphi_y}{\cos \varphi_z} - \omega_z \frac{\sin \varphi_y}{\cos \varphi_z} + \omega_{y2} \frac{\sin \varphi_z}{\cos \varphi_z}, \quad \dot{\varphi}_z = \omega_{z2} - \omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y, \\ & \dot{\varphi}_y = \omega_{y2} / \cos \varphi_z + \omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_y - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z, \quad \varepsilon_{x1} = \dot{\omega}_{x1}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

### Передаточные функции цепей компенсации возмущающих моментов

Запишем передаточные функции цепей компенсации возмущающих моментов ( $\Delta M_i$  – возмущающий момент после компенсации) в случае использования для измерения абсолютных угловых скоростей основания и наружной рамки ГС ДУС и ДУУ. Передаточная функция цепи компенсации составляющей момента сил вязкого трения  $b_1 \omega_y$  имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{\Delta M_1(p)}{b_1 \omega_y(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(y)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(y)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz3}(p). \quad (2)$$

Передаточная функция цепи компенсации составляющей момента сил вязкого трения  $b_1 \operatorname{tg} \varphi_z \omega_{x1}$  имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{\Delta M_2(p)}{b_1 t g \varphi_z \omega_{x1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(x1)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz4}(p). \quad (3)$$

Передаточная функция цепи компенсации составляющей момента сил вязкого трения  $b_2 \omega_{z1}$  имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{\Delta M_3(p)}{b_2 \omega_{z1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds2}}{T_{ds2} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(z1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(z1)} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] \cdot W_{kz6}(p). \quad (4)$$

Передаточная функция цепи компенсации инерционного возмущающего момента  $(J_{y1} + J_{x2}) t g \varphi_z \dot{\omega}_{x1}$  имеет вид:

$$W_4(p) = \frac{\Delta M_4}{(J_{y1} + J_{x2}) t g \varphi_z \dot{\omega}_{x1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1} p + 1} \left[ \frac{K_{dyy(x1)}}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz5}(p). \quad (5)$$

Запишем передаточные функции цепей компенсации возмущающих моментов в случае использования для измерения абсолютных угловых скоростей основания и наружной рамки ГС только ДУС.

$$W_5(p) = \frac{\Delta M_5(p)}{b_1 \omega_y(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(y)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} \right] W_{kz3}(p) \quad (6)$$

Передаточная функция цепи компенсации составляющей момента сил вязкого трения  $b_1 t g \varphi_z \omega_{x1}$  имеет вид:

$$W_6(p) = \frac{\Delta M_6(p)}{b_1 t g \varphi_z \omega_{x1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} \right] W_{kz4}(p). \quad (7)$$

Передаточная функция цепи компенсации составляющей момента сил вязкого трения  $b_2 \omega_{z1}$  имеет вид:

$$W_7(p) = \frac{\Delta M_7(p)}{b_2 \omega_{z1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds2}}{T_{ds2} p + 1} \left[ \frac{K_{dys(z1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} \right] W_{kz6}(p). \quad (8)$$

### Структурные решения и соотношения для выбора параметров цепей компенсации внешних возмущений

1. Для измерения угловых скоростей основания и наружной рамки ГС используется ДУС. Передаточная функция корректирующего звена цепи компенсации  $W_{kz}(p) = 1$ . Передаточная функция цепи компенсации в обобщенном виде для случаев (6,7,8) запишется в виде:

$$W(p) = 1 - \frac{K_{ds}}{T_{ds} p + 1} \cdot \frac{K_{dys}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} = \frac{A(p)}{B(p)}.$$

$$A(p) = T_{ds} T_{dys}^2 p^3 + (2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} + T_{dys}^2) p^2 + (T_{ds} + 2\xi_{dys} T_{dys}) p + 1 - K_{ds} K_{dys}.$$

$$B(p) = T_{ds} T_{dys}^2 p^3 + (2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} + T_{dys}^2) p^2 + (T_{ds} + 2\xi_{dys} T_{dys}) p + 1.$$

Очевидно, что минимуму модуля частотной передаточной функции  $W(j\omega)$  соответствует соотношение:

$$K_{ds} K_{dys} = 1.$$

Для оценки влияния параметров ДУС на эффективность цепи компенсации построим график зависимости модуля частотной передаточной функции цепи компенсации от постоянной времени ДУС (например, на частоте  $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$ ) (рисунок 2). Как видно из графика увеличение эффективности компенсации ограничено только постоянной времени ДУС. На рисунке 3 приведена ЛАЧХ цепи компенсации со следующими параметрами:

$T_{ds} = 0,01$  с;  $K_{ds}K_{dys} = 1$ ;  $T_{dys} = 0,00265$  с;  $\xi = 0,8$ . На частоте  $\omega = 10$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -17 дБ. На частоте  $\omega = 1$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -36,8 дБ.

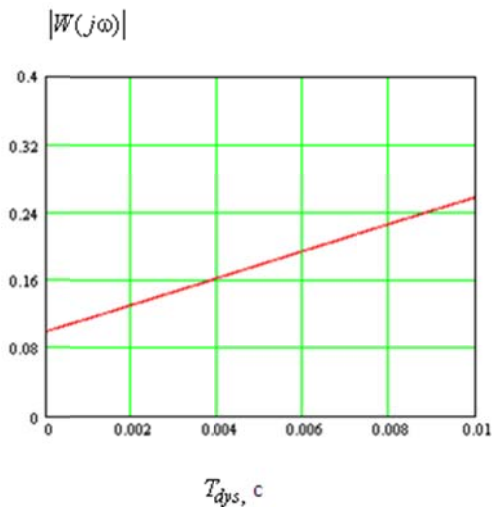


Рисунок 2 – График модуля частотной передаточной функции цепи компенсации

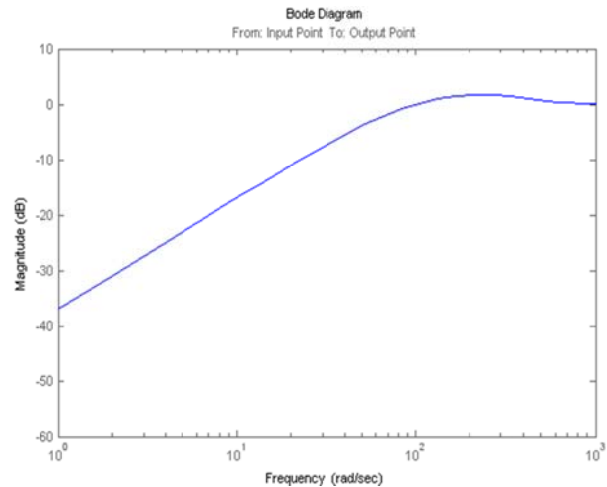


Рисунок 3 – ЛАЧХ цепи компенсации

2. Для измерения угловых скоростей основания и наружной рамки ГС используется ДУС. Передаточная функция корректирующего звена цепи компенсации  $W_{kz}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$ .

Передаточная функция вида цепи компенсации для случаев (6, 7, 8) в обобщенном виде запишется:

$$W(p) = 1 - \frac{K_{ds}(T_1 p + 1)K_{dys}}{(T_{ds} p + 1)(T_2 p + 1)(T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1)} = \frac{A_1(p)}{B_1(p)}.$$

$$A_1(p) = T_{ds} T_{dys}^2 T_2 p^4 + (T_{ds} T_{dys}^2 + T_{dys}^2 T_2 + 2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} T_2) p^3 + (T_{dys}^2 + 2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} + 2\xi_{dys} T_{dys} T_2 + T_{ds} T_2) p^2 + (2\xi_{dys} T_{dys} + T_{ds} + T_2 - T_1 K_{ds} K_{dys}) p + 1 - K_{ds} K_{dys}.$$

$$B_1(p) = T_{ds} T_{dys}^2 T_2 p^4 + (T_{ds} T_{dys}^2 + T_{dys}^2 T_2 + 2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} T_2) p^3 + (T_{dys}^2 + 2\xi_{dys} T_{ds} T_{dys} + 2\xi_{dys} T_{dys} T_2 + T_{ds} T_2) p^2 + (2\xi_{dys} T_{dys} + T_{ds} + T_2) p + 1.$$

Из полученных выражений следует, что минимум модуля частотной передаточной функции обеспечивается при выполнении соотношений:

$$K_{ds} K_{dys} = 1 \text{ и } T_1 = T_{ds} + 2\xi_{dys} T_{dys} + T_2. \quad (9)$$

Построим график зависимости значений модуля частотной передаточной функции (на частоте  $\omega = 10$  с<sup>-1</sup>) от постоянной времени ДУС (рисунок 4). Зададимся следующими параметрами:  $T_{ds} = 0,01$  с;  $K_{ds}K_{dys} = 1$ ;  $T_1 = 0,01724$  с;  $T_2 = 0,003$  с;  $\xi = 0,8$ . Значение постоянной времени  $T_1$  определено из условий (9) при  $T_{dys} = 0,00265$  с. Из графика видно, что минимальное значение модуля частотной передаточной функции цепи компенсации на частоте  $\omega = 10$  с<sup>-1</sup> действительно соответствует постоянной времени ДУС  $T_{dys} = 0,00265$  с. Дальнейшее увеличение точности ограничивается постоянной времени ДУС. На рисунке 5 представлена ЛАЧХ цепи компенсации. На частоте  $\omega = 10$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -40,7 дБ. На частоте  $\omega = 1$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -80,2 дБ.

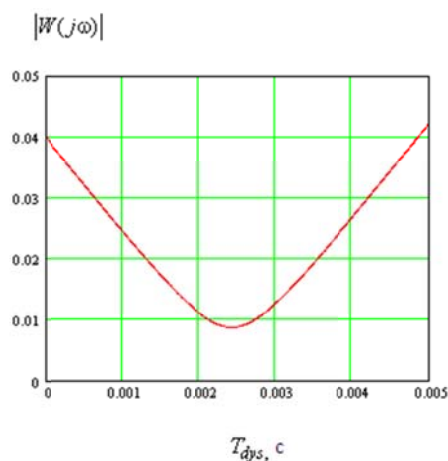


Рисунок 4 – График модуля частотной передаточной функции цепи компенсации

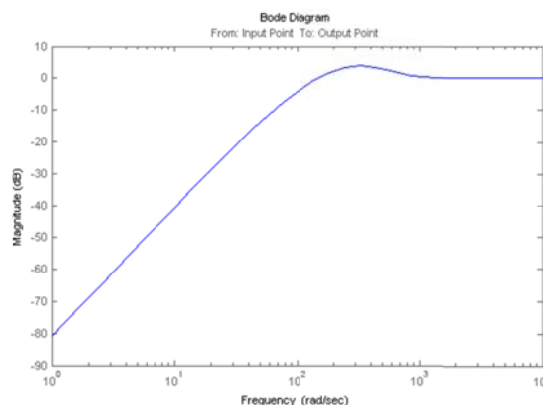


Рисунок 5 – ЛАЧХ цепи компенсации

3. Для измерения угловых скоростей основания и наружной рамки ГС используется ДУС. Передаточная функция корректирующего звена цепи компенсации

$$W_{kz}(p) = \frac{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1}.$$

Передаточная функция цепи компенсации для случаев (6, 7, 8) в обобщенном виде запишется:

$$W(p) = 1 - \frac{K_{ds}(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)K_{dys}}{(T_{ds} p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)(T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1)} = \frac{A_2(p)}{B_2(p)}.$$

пусть  $\xi_1 = \xi_2 = \xi_{dys} = \xi$ , тогда:

$$\begin{aligned} A_2(p) &= T_{dys}^2 T_2^2 T_{ds} p^5 + (2\xi T_{dys}^2 T_2 T_{ds} + 2\xi T_{dys} T_2^2 T_{ds} + T_{dys}^2 T_2^2) p^4 + (T_{dys}^2 T_{ds} + 4\xi^2 T_{dys} T_2 T_{ds} + \\ &+ T_2^2 T_{ds} + 2\xi T_{dys}^2 T_2 + 2\xi T_{dys} T_2^2) p^3 + (2\xi T_{dys} T_{ds} + 2\xi T_2 T_{ds} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_2 + T_2^2 - \\ &- K_{ds} K_{dys} T_1^2) p^2 + (T_{ds} + 2\xi T_{dys} + 2\xi T_2 - 2\xi T_1 K_{ds} K_{dys}) p + 1 - K_{ds} K_{dys}. \\ B_2(p) &= T_{dys}^2 T_2^2 T_{ds} p^5 + (2\xi T_{dys}^2 T_2 T_{ds} + 2\xi T_{dys} T_2^2 T_{ds} + T_{dys}^2 T_2^2) p^4 + (T_{dys}^2 T_{ds} + 4\xi^2 T_{dys} T_2 T_{ds} + \\ &+ T_2^2 T_{ds} + 2\xi T_{dys}^2 T_2 + 2\xi T_{dys} T_2^2) p^3 + (2\xi T_{dys} T_{ds} + 2\xi T_2 T_{ds} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_2 + T_2^2) p^2 + \\ &+ (T_{ds} + 2\xi T_{dys} + 2\xi T_2) p + 1. \end{aligned}$$

Минимизация значения модуля частотной передаточной функции достигается при  $K_{ds} K_{dys} = 1$ . Выбирая такие параметры корректирующего звена, при которых коэффициенты при  $p$  и при  $p^2$  полинома  $A_2(p)$  обращаются в нуль удастся уменьшить значение модуля частотной передаточной функции:

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= \frac{\frac{T_{ds}^2}{4\xi^2} + \frac{T_{ds} T_{dys}}{\xi} - 2\xi T_{dys} T_{ds}}{2\xi T_{ds} + 4\xi^2 T_{dys} - \frac{T_{ds}}{\xi} - 2T_{dys}}, \\ T_1 &= \frac{T_{ds}}{2\xi} + T_{dys} + T_2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Зададимся параметрами цепи компенсации:  $T_{ds} = 0,01$  с;  $K_{ds} K_{dys} = 1$ ;  $T_{dys} = 0,00265$  с;

$\xi = 0,8$ . Параметры фильтра  $T_1 = 0,0148766$  с,  $T_2 = 0,0059766$  с вычислены на основании (10). На рисунке 6 представлена ЛАЧХ цепи компенсации. На частоте  $\omega = 10$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -59,5 дБ. На частоте  $\omega = 1$  с<sup>-1</sup> значение ЛАЧХ составляет -119 дБ.

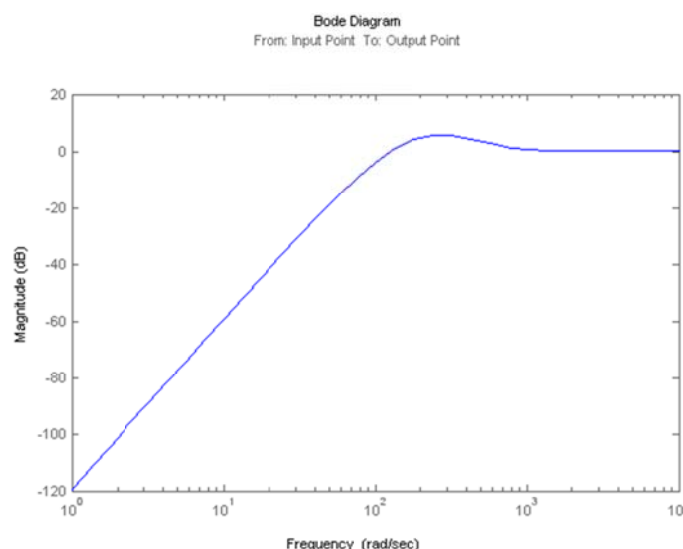


Рисунок 6 – ЛАЧХ цепи компенсации

Сведем результаты пунктов 1, 2, 3 в таблицу 1.

Таблица 1 – Соотношения для выбора параметров цепей компенсации

№	Вид корректирующего фильтра цепи компенсации	Соотношения для выбора параметров	Численные значения параметров	Уровень подавления возмущения на частоте $\omega = 1$ с <sup>-1</sup> , дБ.
	1	2	3	4
1	$W_{kz}(p) = 1$	$K_{ds} K_{dys} = 1$	$T_{ds} = 0,01$ с; $T_{dys} = 0,00265$ с; $\xi_{dys} = 0,8$ .	-36,8
2	$W_{kz}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$	$K_{ds} K_{dys} = 1$ , $T_1 = T_{ds} + 2\xi_{dys} T_{dys} + T_2$ .	$T_{ds} = 0,01$ с; $T_{dys} = 0,00265$ с; $T_1 = 0,01724$ с; $T_2 = 0,003$ с; $\xi_{dys} = 0,8$ .	-80,2
3	$W_{kz}(p) = \frac{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1}$ $\xi_1 = \xi_2 = \xi_{dys} = \xi$	$K_{ds} K_{dys} = 1$ , $T_2 = \frac{T_{ds}^2}{4\xi^2} + T_{ds}(\frac{T_{dys}}{\xi} - 2\xi T_{dys})$ , $T_1 = \frac{T_{ds}(2\xi - \frac{1}{\xi}) + T_{dys}(4\xi^2 - 2)}{2\xi}$ , $T_1 = \frac{T_{ds}}{2\xi} + T_{dys} + T_2$ .	$T_{ds} = 0,01$ с; $T_{dys} = 0,00265$ с; $T_1 = 0,01487$ с; $T_2 = 0,005977$ с; $\xi = 0,8$ .	-119

4. Для измерения угловых скоростей основания и наружной рамки ГС используется ДУС и ДУУ. Передаточная функция корректирующего звена цепи компенсации  $W_{kz}(p) = 1$ . Передаточная функция цепи компенсации для случаев (2, 3, 4) в обобщенном виде запишется:

$$W(p) = 1 - \frac{K_{ds}}{T_{ds}p + 1} \left[ \frac{K_{dys}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] = \frac{A_3(p)}{B_3(p)}.$$

Пусть  $\xi_{dys} = \xi_{dyy} = \xi$ .

$$A_3(p) = T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2 p^5 + (2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{ds} T_{dyy}^2 T_{dys} + T_{dys}^2 T_{dyy}^2) p^4 + (T_{ds} T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} + T_{ds} T_{dyy}^2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{dyy}^2 T_{dys} - T_{dys}^2 K_{ds} K_{dyy}) p^3 + (2\xi T_{ds} T_{dys} + 2\xi T_{ds} T_{dyy} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} + T_{dyy}^2 - T_{dyy}^2 K_{ds} K_{dys} - 2\xi T_{dys} K_{ds} K_{dyy}) p^2 + (T_{ds} + 2\xi T_{dys} + 2\xi T_{dyy} - 2\xi T_{dyy} K_{ds} K_{dys} - K_{ds} K_{dyy}) p + 1 - K_{ds} K_{dys}.$$

$$B_3(p) = T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2 p^5 + (2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{ds} T_{dyy}^2 T_{dys} + T_{dys}^2 T_{dyy}^2) p^4 + (T_{ds} T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} + T_{ds} T_{dyy}^2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{dyy}^2 T_{dys}) p^3 + (2\xi T_{ds} T_{dys} + 2\xi T_{ds} T_{dyy} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} + T_{dyy}^2) p^2 + (T_{ds} + 2\xi T_{dys} + 2\xi T_{dyy}) p + 1.$$

Уменьшить значение модуля частотной передаточной функции можно выполнив условия (11) и (12):

$$K_{ds} K_{dys} = 1 \text{ и } K_{ds} K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys}. \quad (11)$$

$$T_{dyy} = \frac{4\xi^2 T_{dys}^2 - T_{dys}^2}{2\xi T_{ds} + 4\xi^2 T_{dys}} = \frac{T_{dys}^2 (4\xi^2 - 1)}{2\xi (T_{ds} + 2\xi T_{dys})}. \quad (12)$$

На рисунке 7 представлена зависимость значений модуля частотной передаточной функции цепи компенсации от постоянной времени ДУУ на частоте  $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$  при следующих параметрах:  $T_{ds} = 0,01 \text{ с}$ ;  $K_{ds} K_{dys} = 1$ ;  $T_{dys} = 0,008 \text{ с}$ ;  $\xi = 0,785$ . На основании (11)  $K_{dyy} = 0,02256 \text{ с}$ . На основании (12)  $T_{dyy} = 0,00265 \text{ с}$ . Как видно из графика постоянная времени ДУУ  $T_{dyy} = 0,00265 \text{ с}$  соответствует минимуму значения модуля частотной передаточной функции. На рисунке 8 представлена ЛАЧХ цепи компенсации, из которой видно, что значение ЛАЧХ на частоте  $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$  составляет  $-77 \text{ дБ}$ . Значение ЛАЧХ на частоте  $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$  составляет  $-136 \text{ дБ}$ .

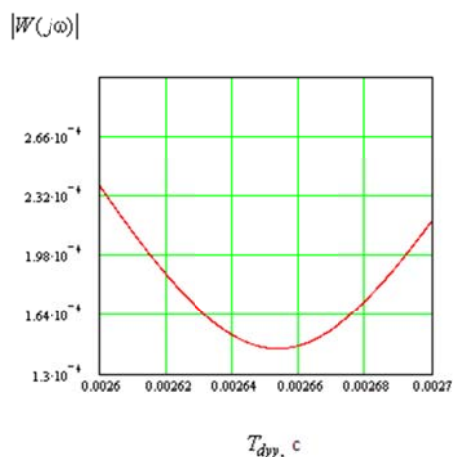


Рисунок 7 – График модуля частотной передаточной функции цепи компенсации

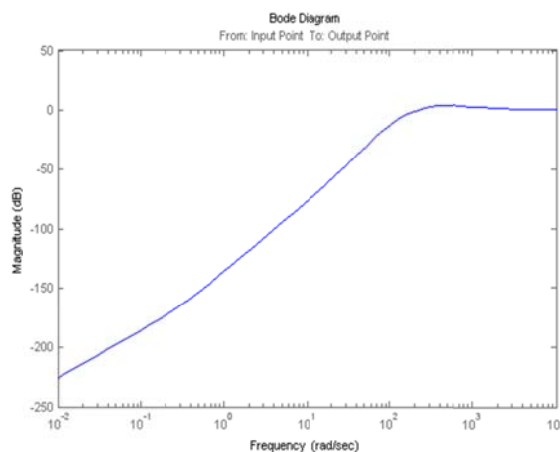


Рисунок 8 – ЛАЧХ цепи компенсации

5. Для измерения угловых скоростей основания и наружной рамки ГС используется ДУС и ДУУ. Передаточная функция корректирующего звена цепи компенсации  $W_{kz}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$ .

Передаточная функция цепи компенсации для случаев (2, 3, 4) запишется в обобщенном виде:

$$W(p) = 1 - \frac{K_{ds}(T_1 p + 1)}{(T_{ds} p + 1)(T_2 p + 1)} \left[ \frac{K_{dys}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy} p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] = \frac{A_4(p)}{B_4(p)}.$$

Пусть  $\xi_{dys} = \xi_{dyy} = \xi$ .

$$\begin{aligned} A_4(p) = & T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2 T_2 p^6 + (2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dys} T_2 + T_{dys}^2 T_{dyy}^2 T_2 + T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2) p^5 + \\ & + (T_{ds} T_{dys}^2 T_2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} T_2 + T_{ds} T_{dyy}^2 T_2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dys} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} + \\ & + 2\xi T_{ds} T_{dyy}^2 T_{dys} + T_{dys}^2 T_{dyy}^2 - T_{dys}^2 T_1 K_{ds} K_{dyy}) p^4 + (2\xi T_{ds} T_{dys} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dyy} T_2 + T_{dys}^2 T_2 + \\ & + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} T_2 + T_{dyy}^2 T_2 + T_{ds} T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} + T_{ds} T_{dyy}^2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{dyy}^2 T_{dys} - \\ & - T_{dyy}^2 T_1 K_{ds} K_{dys} - K_{ds} K_{dyy} (2\xi T_{dys} T_1 + T_{dys}^2)) p^3 + (T_{ds} T_2 + 2\xi T_{dys} T_2 + 2\xi T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys} + \\ & + 2\xi T_{ds} T_{dyy} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} + T_{dyy}^2 - K_{ds} K_{dys} (2\xi T_{dyy} T_1 + T_{dyy}^2) - K_{ds} K_{dyy} (T_1 + 2\xi T_{dys})) p^2 + \\ & + (T_2 + T_{ds} + 2\xi T_{dys} + 2\xi T_{dyy} - K_{ds} K_{dys} (T_1 + 2\xi T_{dyy}) - K_{ds} K_{dyy}) p + 1 - K_{ds} K_{dys}. \\ B_4(p) = & T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2 T_2 p^6 + (2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dys} T_2 + T_{dys}^2 T_{dyy}^2 T_2 + T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy}^2) p^5 + \\ & + (T_{ds} T_{dys}^2 T_2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} T_2 + T_{ds} T_{dyy}^2 T_2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dys} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys}^2 T_{dyy} + \\ & + 2\xi T_{ds} T_{dyy}^2 T_{dys} + T_{dys}^2 T_{dyy}^2) p^4 + (2\xi T_{ds} T_{dys} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dyy} T_2 + T_{dys}^2 T_2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} T_2 + T_{dyy}^2 T_2 + \\ & + T_{ds} T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{ds} T_{dys} T_{dyy} + T_{ds} T_{dyy}^2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{dyy}^2 T_{dys}) p^3 + (T_{ds} T_2 + 2\xi T_{dys} T_2 + \\ & + 2\xi T_{dyy} T_2 + 2\xi T_{ds} T_{dys} + 2\xi T_{ds} T_{dyy} + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} + T_{dyy}^2) p^2 + (T_2 + T_{ds} + 2\xi T_{dys} + \\ & + 2\xi T_{dyy}) p + 1. \end{aligned}$$

Уменьшить значение модуля частотной передаточной функции можно выполнив условия:

$$K_{ds} K_{dys} = 1, \quad K_{ds} K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys} + T_2 - T_1. \quad (13)$$

Положим  $T_1 = T_{ds}$ . Дальнейшее уменьшение модуля возможно при одновременном выполнении условий:

$$\begin{cases} 2\xi T_{dyy} T_2 + T_{dys}^2 + 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} - 4\xi^2 T_{dys}^2 = 0 \\ 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} T_2 + T_{dyy}^2 T_2 + 2\xi T_{dys}^2 T_{dyy} + 2\xi T_{dyy}^2 T_{dys} - 2\xi T_{dys}^3 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Первое уравнение системы (14) – это коэффициент при  $p^2$  полинома  $A_4(p)$ , а второе – общие члены выражений при  $p^3$  и  $p^4$  полинома  $A_4(p)$ . Решение системы (14) позволяет найти такие параметры датчиков и корректирующего фильтра, при которых будет обеспечен минимум модуля частотной передаточной функции цепи компенсации:

$$\left. \begin{aligned} T_{dys} &= \frac{8\xi^3 T_{dyy} + \frac{T_{dyy}}{2\xi} - 4\xi T_{dyy}}{8\xi^3 - 4\xi}, \\ T_2 &= \frac{4\xi^2 T_{dys}^2 - 4\xi^2 T_{dys} T_{dyy} - T_{dys}^2}{2\xi T_{dyy}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ЛАЧХ цепи компенсации при следующих параметрах:  $T_{ds} = 0,01 \text{ с}$ ;  $K_{ds}K_{dys} = 1$ ;  $T_{dyy} = 0,00265 \text{ с}$ ;  $\xi = 0,745$ ;  $T_1 = 0,01 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,0081 \text{ с}$ ;  $T_{dys} = 0,008073 \text{ с}$ ,  $K_{dyy} = 0,02013847 \text{ с}$  представлена на рисунке 9. На частоте  $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$  значение ЛАЧХ составляет  $-90 \text{ дБ}$ . На частоте  $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$  значение ЛАЧХ составляет  $-167 \text{ дБ}$ .

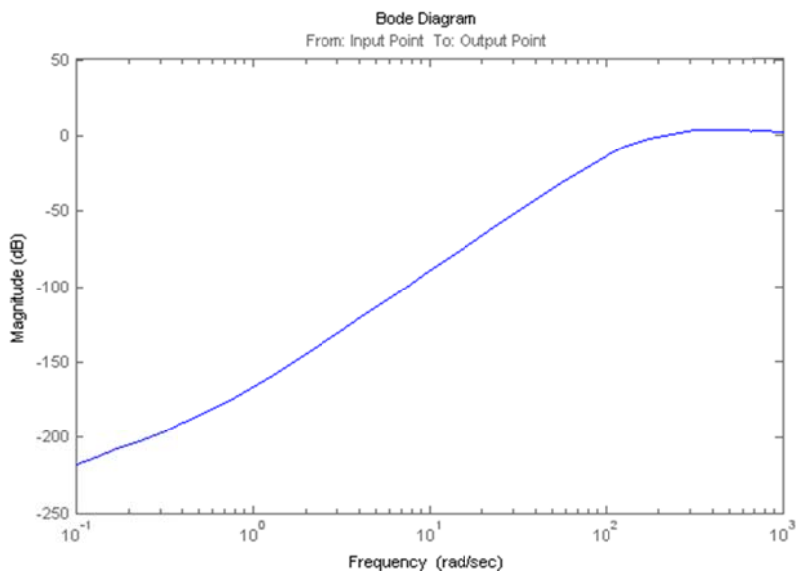


Рисунок 9 – ЛАЧХ цепи компенсации

Сведем результаты пунктов 4, 5 в таблицу 2.

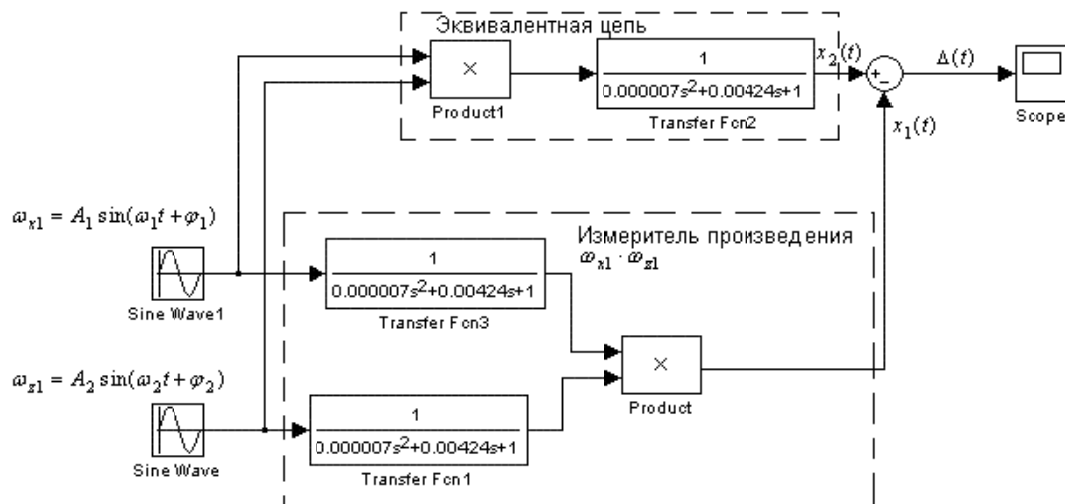
Таблица 2 – Соотношения для выбора параметров цепей компенсации

№	Вид корректирующего фильтра цепи компенсации	Соотношения для выбора параметров	Численные значения параметров	Уровень подавления возмущения на частоте $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$ , дБ.
4	$W_{kz}(p) = 1$	$K_{ds}K_{dys} = 1,$ $K_{ds}K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys},$ $T_{dyy} = \frac{T_{dys}^2(4\xi^2 - 1)}{2\xi(T_{ds} + 2\xi T_{dys})}.$	$T_{ds} = 0,01 \text{ с};$ $T_{dys} = 0,008 \text{ с};$ $T_{dyy} = 0,00265 \text{ с};$ $\xi = 0,785;$ $K_{dyy} = 0,02256 \text{ с}.$	-136
5	$W_{kz}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$	$K_{ds}K_{dys} = 1,$ $K_{ds}K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys} + T_2 - T_1,$ $T_1 = T_{ds}$ $T_{dys} = \frac{8\xi^3 T_{dyy} + \frac{T_{dyy}}{2\xi} - 4\xi T_{dyy}}{8\xi^3 - 4\xi},$ $T_2 = \frac{4\xi^2 T_{dys}(T_{dys} - T_{dyy}) - T_{dys}^2}{2\xi T_{dyy}}.$	$T_{ds} = 0,01 \text{ с};$ $T_{dys} = 0,008073 \text{ с};$ $T_{dyy} = 0,00265 \text{ с};$ $T_1 = 0,01 \text{ с};$ $T_2 = 0,0081 \text{ с};$ $\xi = 0,745;$ $K_{dyy} = 0,02013847.$	-167

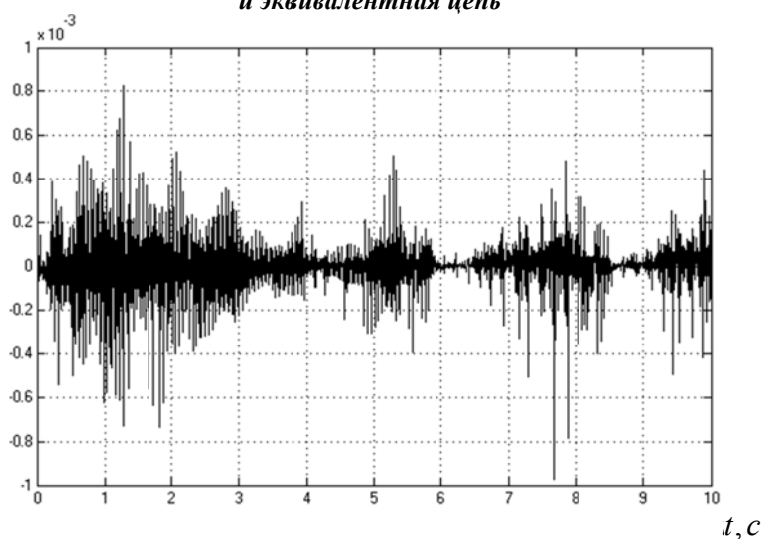
**Компенсация инерционного возмущающего момента  $(J_{y1} + J_{x2})tg\varphi_z \dot{\omega}_{x1}$  и центробежного возмущающего момента  $(J_{y1} + J_{z1} - J_{x1})\omega_{x1}\omega_{z1}$ .**

При реализации цепи компенсации инерционного возмущающего момента (5) в качестве чувствительного элемента применяется датчик углового ускорения. Однако структура цепи компенсации аналогична структуре рассмотренной в пунктах 1, 2, 3. Выбор параметров в этом случае осуществляется по соотношениям, приведенных в таблице 1, с условием замены обозначений  $K_{dys}$  на  $K_{dyy}$ , а  $T_{dys}$  на  $T_{dyy}$ ,  $\xi_{dys}$  на  $\xi_{dyy}$ .

Для того, чтобы получить аналитические выражения, позволяющие рассчитать параметры цепи компенсации центробежного возмущающего момента, осуществим следующее преобразование. На рисунке 10 представлена модель измерителя произведения угловых скоростей  $\omega_{x1}$  и  $\omega_{z1}$ , и эквивалентная ему цепь. Результаты моделирования доказывают, что структура измерителя произведения угловых скоростей  $\omega_{x1}$  и  $\omega_{z1}$  может быть заменена эквивалентной цепью с точностью не хуже 0,1%. На рисунке 11 представлен график ошибки  $\Delta(t) = x_2(t) - x_1(t)$ . Параметры ДУС:  $T_{dys} = 0,00265c$ ;  $\xi = 0,8$ ;  $K_{dys} = 1$ . Параметры источников синусоидальных колебаний:  $A_1 = A_2 = 1$ ;  $\omega_1 = 1 c^{-1}$ ;  $\omega_2 = 1,3 c^{-1}$ ;  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ .



**Рисунок 10 – Модель измерителя произведения угловых скоростей  $\omega_{x1}$  и  $\omega_{z1}$  и эквивалентная цепь**



**Рисунок 11 – График ошибки**

При замене структуры измерителя эквивалентной цепью появляется возможность определения передаточной функции цепи компенсации центробежного возмущающего момента:

$$W(p) = \frac{\Delta M(p)}{(J_{y1} + J_{z1} - J_{x1})\omega_1(p)} \approx 1 - \frac{K_{ds}}{T_{ds}p + 1} \cdot \frac{K_{dys}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys}T_{dys}p + 1} \cdot W_{kz}(p), \quad (16)$$

$$\omega_1(p) = \omega_{x1}(p)\omega_{z1}(p).$$

Вид передаточной функции (16) тождественен передаточной функции цепи компенсации момента сил вязкого трения, поэтому при выборе параметров цепи компенсации центробежного возмущающего момента также справедливы соотношения, приведенные в таблице 1.

### Заключение

На основе метода комбинированного управления рассмотрена схема компенсации возмущений по каналам наружной и внутренней рамок ГС гравиметра. Схема компенсации позволяет повысить точность работы ГС. Рассмотрены различные структурные решения построения цепей компенсации возмущений. Полученные в работе соотношения позволяют рассчитать параметры цепей компенсации, при которых обеспечивается лучшее качество работы схемы. Применение фазопередающих корректирующих фильтров позволяет компенсировать собственную инерционность датчиков цепей компенсации и инерционность исполнительного двигателя и приводит к увеличению степени компенсации возмущений. Выбор структурного решения построения цепи компенсации определяется потребной точностью.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант №17-08-00434 А.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ривкин С. С., Береза А.Д. Гироскопическая стабилизация морских гравиметров. – М.: Наука, 1985. – 176 с.
2. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И. и др. / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова; научн. редактор О.А. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 390 с.
3. Форсберг Р. Проведение аэрогравиметрических измерений гравиметрами «ЛАКОСТА-РОМБЕРГ» и «ЧЕКАН-АМ» с целью определения геоида / Форсберг Р., Олесен А.В., Эйнарссон И. // Гироскопия и навигация. №3 (90). 2015. С.19–29.
4. Глазко В.В. Морские гравиметрические комплексы и гравиметры гидрографической службы военно – морского флота РФ / Глазко В.В., Шустов Е.Б., Филакок И.Н. // Навигация и гидрография. №32. 2011. С.79–87.
5. Железняк Л.К. Гравиметры двойного назначения для измерений с морских и воздушных носителей / Железняк Л.К., Конешов В.Н., Несенюк Л.К. и др. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2005. Т. 48. № 5. С. 23–28.
6. Малютин Д.М. Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров / Малютин Д.М., Распопов В.Я. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.9.Ч.2. 2017. С.96–104.
7. Малютин Д.М. Система для морских гравиметрических измерений повышенной точности с самонастройкой параметров гиросtabilизатора // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №5 (325). 2017. С. 147–156.
8. Распопов В.Я. Инерциальные датчики и системы ориентации, стабилизации и навигации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №5 (295). 2012. С. 125–135.
9. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. С–П.: Профессия., 2004. – 752с.
10. Грязев Б.В. О повышении точности гироскопической системы стабилизации и наведения линии визирования / Б.В. Грязев, Д.М. Малютин, В.В. Савельев, В.А. Смирнов // X Санкт–Петербургская конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2003 г. С.189–191.

**Малютин Дмитрий Михайлович**

ФГБОУ ВО Тульский государственный университет

Кандидат технических наук, доцент, профессор

г. Тула., пр. Ленина 92

тел. 89105511329

E–mail: Malyutindm@yandex.ru

D.M. MALYUTIN

## GYROSTABILIZER OF GRAVIMETER WITH COMBINED CONTROL

**Abstract.** *The scheme of indicator gyrostabilizer of gravimeter with combined control is considered. Mathematical description of the system is given. Various structural solutions for the construction of compensation circuits for disturbing effects are investigated. Relations are obtained for the choice of the parameters of the disturbance compensation circuits that ensure their effective functioning.*

**Keywords:** *sea gravimeter, gyrostabilizer, combined control.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rivkin S.S. Giroskopicheskaja stabilizacija morskih gravimetrov [Gyroscopic stabilization sea gravimeter]. – M.: Nauka, 1985. – 176 p.
2. Sovremennye metody i sredstva izmerenija parametrov gravitazionnogo polja Zemli / Pesheonov V.G., Stepanov O.A., Avgustov L.I. [ Modern methods and means of measurement of parameters of a gravitational field of the Earth] / SPb.: GNC Russia AO «Konzern «CNII «Elektropribor», 2017.–390 p.
3. Forsberg R. Provedevie aerogravimetricheskikh izmerenii gravimetrami «LACOSTE-ROMBERG» и «Chekan-AM» s celiu opredelenija geoida [Carrying out gravimeter measurements gravimeter " La Coste Romberg " and «Chekan-AM» with the purpose of definition geoid ] / Forsberg R., Olesen A.V., Inarsson I. // Giroskopija i navigazija., №3 (90), 2015, pp.19–29.
4. Glazko V.V. Morskie gravimrtricheskie kompleksi i gravimrtri gidrograficheskoi slugbi voenno – morskogo flota Russia [Sea gravimeter complexes and gravimeters hydrographic service military a marine sea fleet of Russia] / Glazko V.V., Shustov E.B., Filakov I.N. // Navigizija i gidrografia. №32, 2011, pp.79–87.
5. Gelezniak L.K., Krasnov A.A., Socolov A.V. Vlijanie inercionnich uscorenii na tochnost gravimetra «Chekan-AM» [Influence of inertial accelerations on accuracy gravimeter «Chekan-AM»] / Fizika Zemli, 2010, N7, pp.29–32.
6. Malyutin D.M., Raspopov V.Ja. Issledovanie dinamiki girostabilizatora morskogo gravimetra s samonastroikoi parametrov [Research dynamics gyrostabilizer of sea gravimeter with self-adjustment of parameters ] / Izvestija Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. Vip.9(2). 2017, pp.96–104.
7. Malyutin D.M. Sistema dlya morskih gravimetricheskikh izmerenii povichennoi tochnosti s samonastroikoi parametrov girostabilizatora [System for marine gravimetric measurements of increased accuracy with self-tuning of the gyrostabilizer parameters ] / Fundamentalnie i prikladnie problemi tehniki i tehnologii. Vip.5(325). 2017, pp.147–156.
8. Raspopov V. Ja. Inercialnie datchiki i sistemi orientacii, stabilizacii i navigacii [Inertial sensors and systems of orientation, stabilization and navigation] / Fundamentalnie i prikladnie problemi tehniki i tehnologii. Vip.5(295). 2012, pp.125–135.
9. Bessekersky V.A., Popov E.P. Teoria system avtomaticheskogo upravlenia [Theory of automatic control] / Profession. 2004. –752 pp.
10. Gryazev B.V., Malyutin D.M., Savelyev V.V., Smirnov V.A. On improving the accuracy of the gyroscopic stabilization system and guidance line of sight, 10th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2003, pp.189–191.

**Malyutin Dmitriy Mikhailovich**

Tula State University,  
candidate of technical science, docent, professor,  
Tula, Lenina 92,  
89105511320,  
Malyutindm@yandex.ru

УДК 629.7.021.6

О.В. ЕМЕЛЬЯНОВА, Р.Ю. ПОЛЯКОВ, С.В. ЕФИМОВ, С.Ф. ЯЦУН

## МОБИЛЬНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ

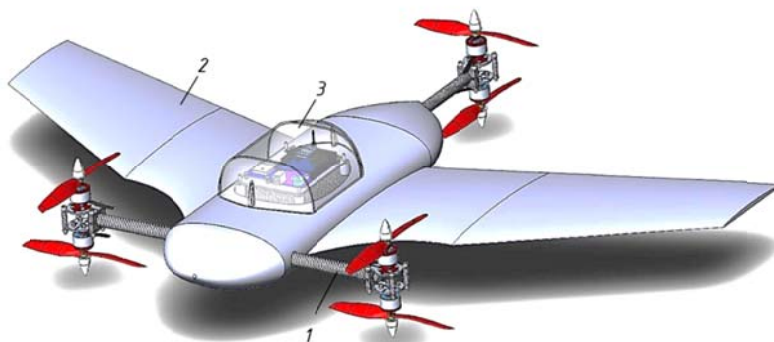
**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию методов и средств мониторинга окружающей среды на основе использования газовых анализаторов для контроля концентрации СО.

Объединение анализатора газа и мобильного беспилотного летательного комплекса (БЛК) позволяет создать новые средства для раннего обнаружения источника возгорания. Применение таких устройств открывает новые возможности для оперативного определения источника возгорания, реагирования и устранения возникающих нештатных ситуаций на ранних стадиях. В качестве транспортной платформы, особенно эффективными могут оказаться БЛК, позволяющие осуществлять вертикальный взлет, зависание над объектом, горизонтальный полет. Особое внимание уделено вопросам поиска источника возгорания и планирования траектории движения к нему с учетом окружающей среды и препятствий. В качестве основного критерия использован уровень концентрации СО в воздухе, регистрируемый БЛК. Возрастание концентрации является определяющим признаком для движения мобильной платформы в сторону источника возгорания.

**Ключевые слова:** газовый анализатор, трикоптер, зондирование пространства

**Введение.** Последние годы в ведущих странах мира активно исследуются и получают практическую реализацию беспилотные летательные комплексы (БЛК) для наблюдений, оценки и прогноза состояния окружающей среды под действием природных и антропогенных факторов. Такие комплексы оснащены датчиками и сенсорами, использующие активные и пассивные сигналы различной природы (световые, звуковые, инфракрасные и др.), предназначенные для обнаружения и детектирования элементов внешней среды [1–3].

Применение беспилотных летательных комплексов в интересах МЧС России для оперативной разведки местности в пожароопасный период, мониторинга лесных пожаров, а также обнаружения на ранних стадиях очагов возгорания, является весьма актуальным. В качестве транспортной платформы БЛК, особенно эффективными могут оказаться малогабаритные летательные аппараты, типа трикоптер, позволяющие осуществлять вертикальный взлет, зависание над объектом, горизонтальный полет (рисунки 1) [4].



**Рисунок 1 – Общая модель трикоптера, типа конвертоплан:**

1 – рама, 2 – фюзеляж, 3 – узел для размещения электронных компонентов и газочувствительных сенсоров

Любое возгорание сопровождается распространением газообразных продуктов горения. Монооксид углерода (СО) – один из наиболее опасных токсичных газов, повышенные концентрации которого оказывают негативное влияние на здоровье человека. Применение газочувствительных сенсоров–измерителей концентрации СО в системах БЛК позволяет обнаружить пожароопасную обстановку на ранней стадии, когда можно принять меры по остановке опасного процесса и предотвратить пожар [5, 6].

На начальном этапе, когда тлеет небольшое количество материала, угарный газ растворяется в объеме и его концентрация мала. Отсюда применение высокочувствительных полупроводниковых сенсоров СО газоанализаторов (ГА), позволит повысить эффективность методов раннего обнаружения возгорания. В этом случае БЛК должен рассматриваться как автономная робототехническая система (РТС). Функционирование РТС складывается из четырех составляющих: перемещение РТС в пространстве (механическое движение), измерение состояния окружающей среды, измерение состояния размещенных на его борту источников энергии, наконец, осуществление взаимодействия РТС с окружающими препятствиями или другими РТС. Это свидетельствует о том, что с системно-кибернетической точки зрения РТС представляет собой сложную неоднородную динамическую систему.

Такой подход к функционированию РТС выделяет его как объект, задачи управления которым принципиально отличаются от традиционных. В данном случае главную роль играет управление движением в процессе мониторинга окружающей среды, остальные функции РТС (работа бортовой аппаратуры, расход ресурса) являются вспомогательными, обеспечивающими решение главной задачи. В роли объекта управления может выступать как отдельная РТС, так и система РТС (однородная или разнородная). Последний случай характерен для мониторинга больших по площади территорий [1–3, 5].

Таким образом, дальнейшее распространение и развитие этого важного в системе мониторинга окружающей среды направления, сдерживается из-за отсутствия методов расчета, построенных на математических моделях адекватно, описывающих основные режимы движения БЛК. Особое внимание необходимо уделить решению научно-технической задачи по разработке методов планирования траектории движения летательного комплекса к источнику возгорания, моделированию режимов его движения, связанных с измерением концентрации СО, которые на сегодняшний день изучены недостаточно.

**Основная часть.** Рассмотрим задачу поиска источника возгорания и планирования траектории движения к нему с учетом окружающей среды [6]. В качестве основного критерия используем уровень концентрации СО в воздухе, регистрируемый ГА. Возрастание концентрации является определяющим признаком для движения мобильной платформы в сторону источника возгорания (рисунок 2).

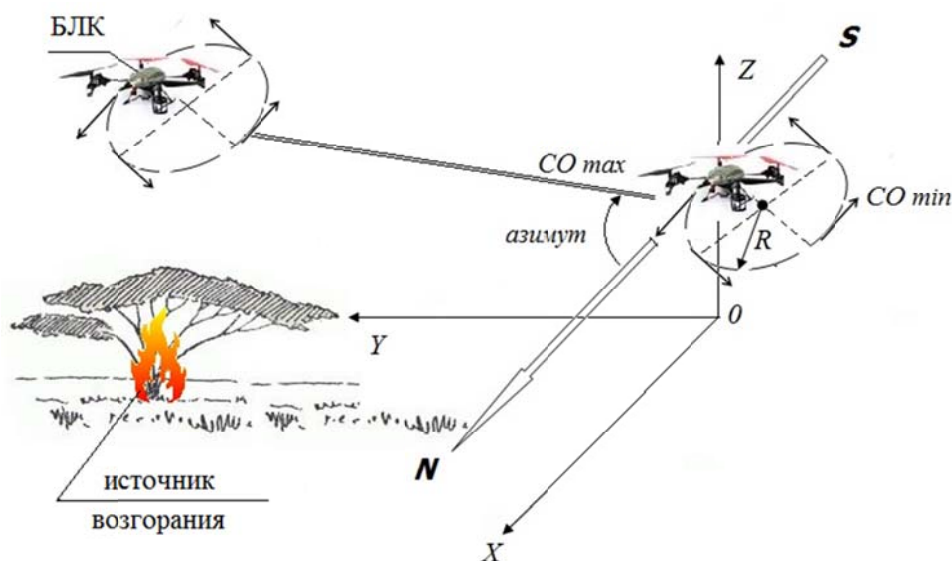


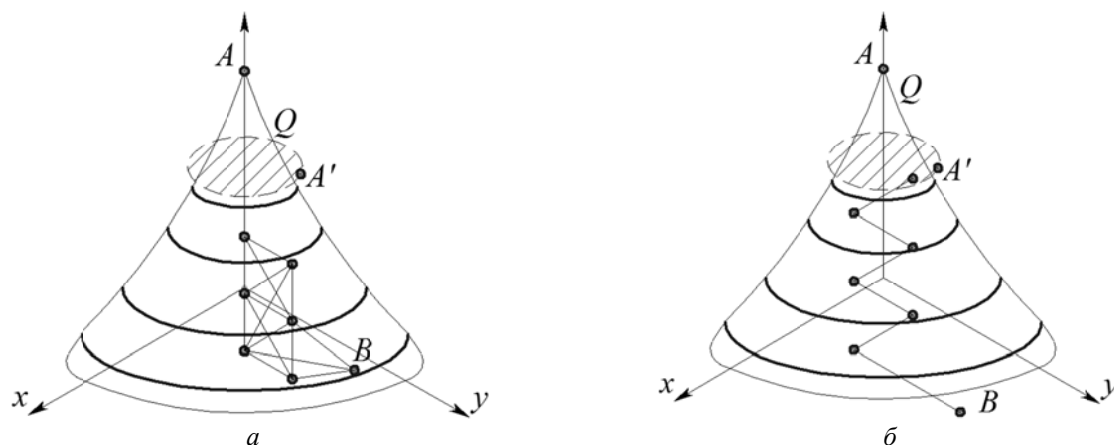
Рисунок 2 – Движение мобильного летательного комплекса к источнику возгорания

Взлет БЛК происходит с любой горизонтальной поверхности на определенную высоту  $H$  в соответствии с полетным заданием. Далее, для выбора направления движения аппарат начинает движение по окружности, радиуса  $R$ , по следующему закону:  $Z=H$ ,

$X=R \cos(\Omega t)$ ,  $Y=R \sin(\Omega t)$ , где  $R$  – радиус зоны облета,  $\Omega R$  – максимальная скорость движения центра масс конвертоплана по траектории. Уравнение траектории имеет вид:  $X^2 + Y^2 = R^2$  [7–10].

Будем считать, что режим движения определяется условием, при котором центр масс аппарата движется по заданной траектории и отклоняется от неё на величину, не превышающую  $\delta R$ .

В процессе движения по окружности происходит зондирование пространства и определение траектории, гарантированно позволяющий перемещаться БЛК в сторону увеличения концентрации  $CO$  в соответствии с симплекс–методом (рисунок 3, а) и методом Кифера (рисунок 3, б).



**Рисунок 3 – Пространственная схема движения БЛК к источнику возгорания по:**  
а – симплекс–методу; б – методу Кифера; Q – концентрация  $CO$ ; B – начальное положение БЛК

Направление движения БЛК определяется углом азимута, отсчитываемым от северного направления меридиана, и направлением на ориентир с максимальным содержанием  $CO$ .

По методу Кифера требуется знание числа точек эксперимента для определения экстремума. Концепция  $D$ –оптимальности, развиваемая Кифером–Вольфовицем рассматривается как концепция совместных эффективных оценок. В этой теории эффективность оценок задается оптимальным способом обработки результатов наблюдений.

Метод Кифера–Вольфовица отличается от обычного метода градиента тем, что если в первом из них размеры интервалов варьирования  $Dx_i$  при постановке пробных опытов и параметр  $r_{cp}$  рабочего шага остаются неизменными на любом рабочем шаге, то в методе Кифера  $Dx_{ik}$  и  $r_{cpk}$  выбирают в зависимости от номера  $k$  рабочего шага.

Если в методе градиента фактический размер  $k$ –го рабочего шага уменьшается только из–за уменьшения градиента, т. е. крутизны наклона поверхности отклика, при приближении к области экстремума, то в методе Кифера–Вольфовица фактический размер рабочего шага уменьшается в прямой зависимости от номера этого шага.

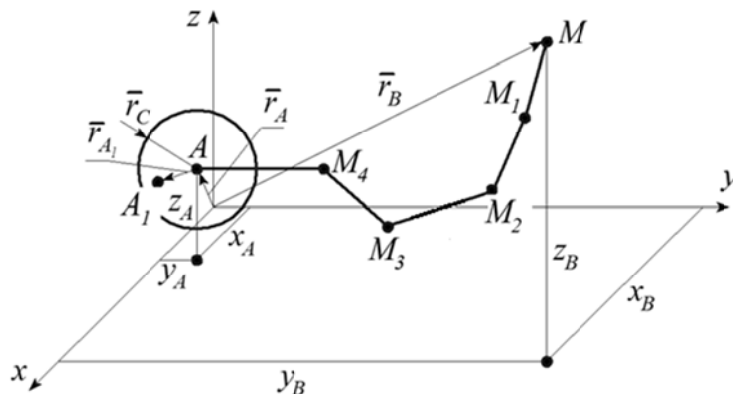
Достоинством метода Кифера–Вольфовица по сравнению с немодифицированным методом является его повышенная точность отыскания экстремальной точки, если поверхность отклика достаточно крутая, а экстремум находится от базовой точки не слишком далеко. Недостатком этого метода является его низкая эффективность в условиях пологих поверхностей отклика. При очень пологих поверхностях отклика метод Кифера – Вольфовица вообще не приводит к цели: рабочие шаги становятся сравнимыми с погрешностями измерения до достижения экстремума.

Поэтому, движение в пространстве начинается с использованием двухмерных симплексов, а по мере приближения к источнику, предложено осуществлять поиск на основе планирования отрезков прямой, позволяющих двигаться в сторону увеличения концентрации  $CO$  с фиксацией одной из координат.

Положение источника возгорания  $A$  (точка с максимальной концентрацией  $CO$ ) задается неизвестным радиус–вектором  $r_A$ , а положение БЛК в начальный момент времени, соответственно, радиус– вектором  $r_B$  (рисунок 4). Задача состоит в том, чтобы определить положение точки  $A$ , то есть, найти радиус–вектор  $r_A$  по измеряемым бортовым датчиком значениям концентрации  $CO$ , заданному начальному положению БЛК, определяемому вектором  $r_B$ , определенных вектором  $r_C$  за минимальное время.

Процесс поиска завершается если БЛК оказывается в точке  $A^I$ , определяемой радиус – вектором  $r_{A^I}$ , положение которой, определяется радиус –вектором  $r_{A^I} = r_A + r_{eA}$ . Точка  $A^I$  находится внутри сферы с радиусом  $r_C$  положение которой, определяется радиус –вектором  $r_C = r_A + r_e$ .

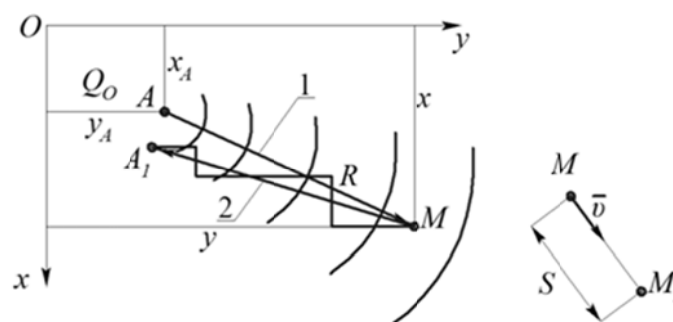
Модуль радиус–вектора  $r_e$  определяет допустимую погрешность, возникающую при определении положения точки  $A$  в пространстве.



**Рисунок 4 – Схема движения БЛК к источнику возгорания:**

$A$  – источник возгорания;  $M$  – начальное и  $M_i$  – промежуточные положение БЛК

На рисунке 5 представлена плоская схема движения БЛК к источнику возгорания. В начальный момент времени БЛК находится в произвольной точке  $M(x, y)$ . Далее осуществляется его перемещение по дискретной траектории в сторону возрастания  $CO$ . Очевидно, что реальная траектория выводит БЛК к источнику возгорания с некоторой погрешностью  $AA_1$ . Задача системы управления состоит в минимизации этой погрешности при заданном быстродействии БЛК.



**Рисунок 5 – Плоская схема движения БЛК к источнику возгорания на участке  $BM_1$ :**

$A$  – источник возгорания с координатами  $x_A, y_A$ ;  $M$  – точка определяющая положение БЛК в пространстве;  $M_1$  – положение БЛК после первого шага;  $v$  – скорость движения БЛК;  $S$  – расстояние, пройденное БЛК на первом шаге; 1 – желаемая траектория движения, 2 – реальная траектория

### Заключение.

В результате проведенных исследований разработан метод определения координат источника возгорания с использованием комбинированного метода измерения концентрации  $CO$  с помощью беспилотного летательного комплекса, основанного на симплекс методе и методе Кифера–Вольфовица.

Разработан алгоритм управления пространственным движением мобильной ГПИ к источнику *СО* с учетом изменения концентрации, и выбора вида заданной траектории движения.

Предложен алгоритм управления мобильным ГПИ при раннем обнаружении источников возгорания на основе зондирования пространства и определения концентрации *СО*.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков Р.Ю. Ефимов С.В. Яцун С.Ф. Проведение исследования управляемого синхронного движения летающего многозвенного робота Вестник Воронежского института МВД России №1 2015 С. 37–44.
2. Поляков Р.Ю. Изучение движения взлета летающего робота с машущим крылом / Р.Ю. Поляков, С.В. Ефимов, Р.И. Праслов // Вестник Воронежского института МВД России.– 2014.– №3. – С90–97.
3. Поляков Р.Ю. Разработка летательных робототехнических средств для мониторинга окружающей среды на основе бионических идей // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: материалы XIII научно–практической конференции. М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России. 2014.– С.101–102.
4. Emelyanova O. V. The Synthesis of Electric Drives Characteristics of the UAV of “Convertiplane–Tricopter” Type //MATEC Web of Conferences, 2017. – Т. 99. – С. 02002.
5. Поляков Р.Ю. Исследование движения летающего робота с машущим крылом при взлете / Р.Ю. Поляков, С.В. Ефимов, Н.В. Мозговой // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж: Издательский дом «Кварта».– 2014.– № 3. – С41–45.
6. Поляков Р. Ю., Ефимов С. В., Яцун С. Ф. Робот–инсектоптер для проведения разведки на объектах химической и атомной промышленности //Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2015. – Т. 1. – №. 1 (6).
7. Емельянова О. В., Казарян Г. К., Яцун С. Ф. Синтез параметров электроприводов БПЛА типа «конвертоплан–трикоптер» //Cloud of science. – 2017. – Т. 4. – №. 2.
8. Моделирование полета конвертоплана в различных режимах движения. / С.Ф Яцун, О.В Емельянова, А.И Савин, С.П. Стуканева // Известия ЮЗГУ, 2015. №1(14) – С. 55 – 66.
9. Яцун С.Ф. Алгоритм управления беспилотным летательным аппаратом типа конвертоплан / С.Ф Яцун, О.В Емельянова, К.Г. Казарян //Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС–ИИ–2016): труды третьего Всероссийского научно–практического семинара. – Иннополис: Изд–во «Перо», 2016. С. 147–157.
10. Яцун С. Ф. Исследование режима зависания летающего пятизвенного робота //Фундаментальные исследования. – 2016. – №. 12–2. – С. 354–359.

#### Емельянова Оксана Викторовна

Юго–Западный государственный университет  
Кандидат технических наук, доцент  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94  
тел. +7 (4712) 22–26–26  
e–mail: teormeh@inbox.ru

#### Поляков Роман Юрьевич

Воронежский государственный технический университет.  
Аспирант  
394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.  
тел. (473) 2437–670.  
e–mail: polyakov\_gps@mail.ru

#### Ефимов Сергей Венедиктович

Воронежский институт ГПС МЧС России  
Кандидат педагогических наук, доцент  
394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231.  
тел. +7 (473) 236–70–77  
e–mail: sergey160@mail.ru

#### Яцун Сергей Федорович

Юго–Западный государственный университет  
Доктор технических наук, профессор  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94  
тел. +7 (4712) 22–26–26  
e–mail: teormeh@inbox.ru

---

O.V. YEMELYANOVA, R.Yu. POLYAKOV, S.V. YEFIMOV, S.F. YATSUN

### MOBILE FLYING COMPLEX FOR EARLY DETECTION OF FOCUSES OF FIRE FIGHTERS

**Abstract.** The article is devoted to the improvement of methods and means of monitoring of the environment based on the using of gas analyzers, which control the concentration of CO.

The combination of gas analyzer and mobile unmanned flying complex (UFC) allows to create new means for early detection of focuses of fire fighters. The use of such devices opens up new possibilities for promptly determining the source of ignition, reacting and eliminating emerging contingencies in the early stages. As a transport platform, UFC can be particularly effective, if they allow to take–off vertically, hover over the object, fly horizontally. Particular attention is paid to the search for a source of ignition and planning the trajectory of movement to it, taking into account

*the environment and obstacles. As the main criterion the concentration of CO in the air, recorded by the UFK was used. The increase in concentration is the determining feature for the movement of the mobile platform towards the ignition source.*

**Keywords:** *gas analyzer, tricopter, sounding of space.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Polyakov R.YU. Efimov S.V. YAcun S.F. Provedenie issledovaniya upravlyаемого sinhronnogo dvizheniya letayushchego mnogozvennogo robota Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii №1 2015 S. 37–44.
2. Polyakov R.YU. Izuchenie dvizheniya vzleta letayushchego robota s mashushchim krylom / R.U. Polyakov, S.V. Efimov, R.I. Praslov // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii.– 2014.– №3. – S90–97.
3. Polyakov R.YU. Razrabotka letatel nyh robototekhnicheskikh sredstv dlya monitoringa okruzhayushchej sredy na osnove bionicheskikh idej // Problemy prognozirovaniya chrezvychajnykh situacij: materialy XIII nauchno–prakticheskoy konferencii. M.: FKU Centr «Antistihiya» MCHS Rossii. 2014.– S.101–102.
4. Emelyanova O. V. et al. The Synthesis of Electric Drives Characteristics of the UAV of “Convertiplane–Tricopter” Type //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – T. 99. – S. 02002.
5. Polyakov R.U. Issledovanie dvizheniya letayushchego robota s mashushchim krylom pri vzlete / R.U. Polyakov, S.V. Efimov, N.V. Mozgovoy // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. Voronezh: Izdatel skij dom «Kvarta».– 2014.– № 3. – S41–45.
6. Polyakov R. U., Efimov S. V., Yatsun S. F. Robot–insekopter dlya provedeniya razvedki na obektah himicheskoy i atomnoj promyshlennosti //Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy. – 2015. – T. 1. – №. 1 (6).
7. Emelyanova O. V., Kazaryan G. K., Yatsun S. F. Sintez parametrov ehlektroprivodov BPLA tipa «konvertoplan–trikopter» //Cloud of science. – 2017. – T. 4. – №. 2.
8. Modelirovanie poleta konvertoplana v razlichnykh rezhimakh dvizheniya. / S.F Yatsun, O.V Emelyanova, A.I Savin, S.P. Stukaneva // Izvestiya YUZGU, 2015. №1(14) – S. 55 – 66.
9. Yatsun S.F. Algoritм upravleniya bespilotnym letatel nym apparatom tipa konvertoplan / S.F Yatsun, O.V Emelyanova, K.G. Kazaryan //Bespilotnye transportnye sredstva s ehlementami iskusstvennogo intellekta (BTS–II–2016): trudy tret ego Vserossiyskogo nauchno–prakticheskogo seminar. – Inopolis: Izd–vo «Pero», 2016. S. 147–157.
10. Yatsun S. F. i dr. Issledovanie rezhima zavisaniya letayushchego pyatizvennogo robota //Fundamental nye issledovaniya. – 2016. – №. 12–2. – S. 354–359.

### **Emelyanova Oksana Viktorovna**

Southwest State University

PhD

305040 Kursk, street 50 years of October, 94

tel. +7 (4712) 22–26–26

e–mail teormeh@inbox.ru

### **Polyakov Roman Yurievich**

Voronezh State Technical University

Postgraduate student

394026, Voronezh, Moscovskiy prospect, 14.

tel. +7(473) 2437–670

e–mail: polyakov\_gps@mail.ru

### **Efimov Sergey Venegditovich.**

Voronezh Institute of state fire service of EMERCOM of Russia

PhD

394052, Voronezh, Krasnoznamyonnaya Str., 231.

tel. +7 (473) 2363–305.

e–mail: sergey160@mail.ru

### **Jatsun Sergei Feodorovich**

Southwest State University

Doctor of Technical Sciences, Professor

305040 Kursk, street 50 years of October, 94

tel. +7 (4712) 22–26–26

e–mail teormeh@inbox.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ КОНВЕЙЕРОВ В СЛОЖНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**Аннотация.** В статье рассматривается актуальная проблема очистки несущего полотна ленточного конвейера большой мощности от прилипшего или примерзшего материала в сложных климатических условиях. Подробно описывается физика процесса очистки полотна с помощью скребкового очистительного устройства, основное внимание уделено зависимостям для определения сопротивления очистительного устройства, напряжений в примерзшем материале. Особо отмечается, что общее сопротивление очистительного устройства записано с учетом физико-механических свойств транспортируемого материала. Установлено, что в настоящее время нет единой классификации очистительных устройств, а имеющиеся классификации не лишены недостатков. На основе описанной классификации с целью установления критерия эффективности сделана попытка формализации по внутренним связям средств очистки, разделенным на структурные элементы по функциональным признакам независимо от исполнения и выраженным структурными формулами.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, несущее полотно, очистка, надежность, скребок.

### Введение

Налипание транспортируемого материала на несущее полотно конвейера, роlikоопоры, звездочки и барабаны препятствует равномерному ходу рабочего полотна, вызывая увеличение сопротивления движению и снижение производительности конвейера. Особенно это влияет на надежность и работоспособность конвейеров в сложных климатических условиях, так как из-за осадков и низких температур транспортируемый материал примерзает к рабочим поверхностям и затрудняет их очистку.

### Основная часть

Распространенным способом очистки рабочих поверхностей конвейеров является механический. Процесс механического отделения налипшего материала сопровождается сдвигом, резанием, вдавливанием рабочего элемента, отрывом частиц и характеризуется сопротивлением прилипшего или примерзшего материала [1, 2]. Для практических расчетов при определении суммарного сопротивления движению конвейеров сопротивление очистительного устройства определяют по эмпирическим формулам:

а) при щеточном очистителе:

$$W_{\text{щ}} = 0,2 \cdot v_{\text{щ}} \cdot q_{\text{щ}} \cdot b; \quad (1)$$

б) при скребковых или плужковых очистителях:

$$W_{\text{с}} = q_{\text{ос}} \cdot b. \quad (2)$$

где  $v$  – скорость щетки;

$q_{\text{щ}}$  и  $q_{\text{ос}}$  – прижатие рабочего органа очистителя;

$b$  – ширина ленты.

Как видно из формул (1) и (2), в расчетах не учтены физико-механические свойства транспортируемого материала, внешние факторы, такие как температура окружающей среды и продолжительность транспортирования. Невозможно определить и основные параметры очистителя (потребляемую мощность устройства, размеры рабочего органа, тип рабочего органа, усилие прижатия). Сопротивление очистительного устройства – с учетом сопротивления примерзшего материала в зависимости от температуры, времени транспортирования, усилия прижатия – можно выразить формулой:

$$W_0 = R + P_{\text{пр}} \cdot f, \quad (3)$$

где  $R$  – сила сопротивления сдвигу примерзшего материала в зависимости от влажности, температуры, времени транспортирования;

$P_{\text{пр}} = Q \cdot F$  – усилие прижатия скребка к очищаемой поверхности;

$f$  – коэффициент трения скребка о рабочую поверхность конвейера;

$Q$  – удельная сила прижатия;

$F$  – площадь контакта скребка с поверхностью.

Рассмотрим схемы, отображающие процесс разрушения налипшего, примерзшего

материала при очистке скребком (рисунок 1). В процессе транспортирования слой материала в зоне контакта с рабочей поверхностью ленты конвейера уплотняется за счет сил давления вышележащих слоев материала [3]. Вследствие наличия в материале рыхлосвязанной и свободной воды возникают электромолекулярные силы притяжения между частицами и рабочей поверхностью, обуславливающие сцепление частиц между собой и с рабочей поверхностью. Как известно, с понижением температуры силы поверхностного натяжения воды увеличиваются – в нашем случае – увеличиваются силы сцепления частиц с рабочей поверхностью.

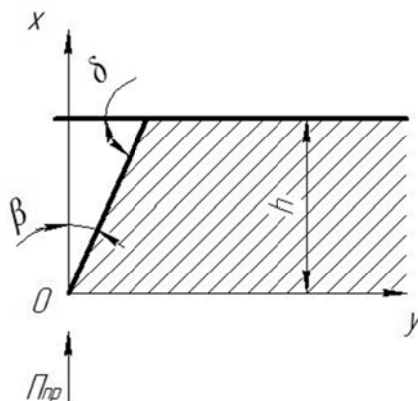


Рисунок 1 – Схема взаимодействия скребка с очищаемой поверхностью

Для определения сопротивления сдвигу примерзшего материала делают следующие допущения. Примерзший слой материала представляют как сыпучую среду с малой вязкостью. Считают примерзший слой однородным, во всех точках свойства материала одинаковыми. Толщину примерзшего слоя принимают постоянной.

Воспользуемся теорией предельного равновесия, по которой напряжение при сдвиге по данной площадке может быть выражено линейной зависимостью

$$|\tau_n| = \sigma_n + \operatorname{tg} \rho + k, \quad (4)$$

где  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на рассматриваемой площадке;

$\rho$  – угол внутреннего трения.

Заметим, что в выражении (4), согласно построению диаграммы Мора, под сцеплением  $k$  следует понимать сцепление частиц материала с очищаемой поверхностью или так называемую удельную силу примерзания. Напряжения в рассматриваемой точке М определяются системой трех уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta x} + \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} &= \nu; \\ \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} + \frac{\Delta \sigma_y}{\Delta y} &= 0; \\ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}{(\sigma_x + \sigma_y + 2k \operatorname{ctg} \rho)^2} &= \sin^2 \rho. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из рисунка 2, где показан элементарный параллелепипед с действующими компонентами напряжений в прямоугольной системе координат, для случая очистки составляющая нормального напряжения  $\sigma_x = 0$ .

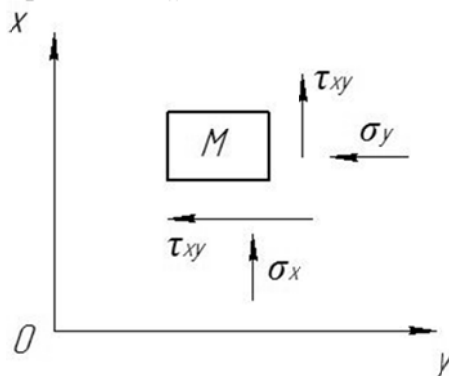


Рисунок 2 – Элементарный параллелепипед с действующими напряжениями

Пользуясь методом В.В. Соколовского, найдем нормальную составляющую  $\sigma_y$  напряжения по поверхности контакта скребка с примерзшим материалом:

$$\sigma_n = \sigma_y = k \operatorname{ctg} \rho \left( e^{\left(\frac{\pi}{2} - 2\beta + \rho\right) \operatorname{tg} \rho} \cdot \cos^2 \rho - 1 \right), \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол наклона скребка.

Значения удельной силы примерзания в зависимости от влажности, температуры окружающей среды, длительности примерзания определялись экспериментально [3]. Исследованиям подвергался суглинок влажностью 21,4 % при естественных отрицательных температурах фракции пробы менее 1 мм. Продолжительность примерзания образца определялась в зависимости от длины конвейера при условии установки очистителя у разгрузочной головки:

$$t = \frac{L}{60v_k}, \text{ мин}, \quad (7)$$

где  $L$  – длина транспортирования;

$v_k$  – скорость транспортирования.

Касательная компонента напряжения в точке контакта скребка с материалом определяется аналогично зависимости (4):

$$\tau = (\sigma_y + \theta) \operatorname{tg} \rho, \quad (8)$$

где  $\theta$  – сцепление частиц материала со скребком.

Пренебрегая сцеплением материала со скребком, получим:

$$\tau = k \operatorname{ctg} \rho \cdot \operatorname{tg} \rho \left( e^{\left(\frac{\pi}{2} - 2\beta + \rho\right) \operatorname{tg} \rho} \cdot \cos^2 \rho - 1 \right). \quad (9)$$

Сила сопротивления очистки

$$R = \sqrt{R_\tau^2 + R_\sigma^2},$$

где  $R_\tau$  – касательная составляющая силы сопротивления к траектории сдвига;

$R_\sigma$  – нормальная составляющая силы сопротивления к траектории сдвига, с учетом составляющих напряжения по поверхности контакта скребка с материалом, запишется как

$$R = \frac{h \cdot b}{\sin \delta} \sqrt{\sigma_y^2 + \tau^2}, \quad (10)$$

где  $h$  – толщина примерзшего слоя;

$b$  – ширина скребка;

$\delta$  – угол сдвига.

Общее сопротивление очистительного устройства с учетом сопротивления примерзшего материала

$$W_o = \Pi_{\text{пр}} f + \frac{h \cdot b}{\sin \delta} \sqrt{\sigma_y^2 + \tau^2}. \quad (11)$$

В этом выражении учтены физико–механические свойства транспортируемого материала, такие, как температура окружающей среды, длительность транспортирования, параметры рабочего органа очистительного устройства и другие внешние факторы.

В настоящее время нет единой классификации, учитывающей условия применения способов и средств очистки рабочих конвейеров в конкретных условиях.

Классификации способов и средств очистки не лишены недостатков. В них отсутствуют критерии систематизации, оценки эффективности применения.

Определенный интерес с методической точки зрения представляет принцип составления классификации, принятый в работах [4, 5], основанный на функциональных признаках основных элементов независимо от их конструктивного исполнения.

Критерием составления предлагаемой классификации (таблица 1) принят процесс разрушения примерзшего материала, т.е. способ взаимодействия очищаемого и очищающего элементов и характеристика того или иного средства в соответствующем исполнении и конкретных условиях [6, 7, 8].

Таблица 1 – Классификация средств по методу и способу очистки

Очистка		Средства очистки	Ленточное полотно		Металлическое полотно	
метод	способ		исполнение	характери- стика	исполне- ние	характе- ристика
1	2	3	4	5	6	7
Индиви- дуальный	Меха- нический	Скребки	Однорядные, многорядные, струнные, веерные, плужковые, конвейерного типа	Некачеств. очистка, износ ленты, при низких темп., не рекоменду- ется		Не рекомен- дуется, заштыбо- вывается в местах сочлене- ния пластин, не очища- ются борта, сложность прижатия
		Щетки	Стационар- ные, вращающиеся барабанные, конвейерного типа	Относительно качеств. очистка, проста по констр-ии, но заштыбовы- вается, рабочий орган из капрона, недолговечен	Рабочий орган вращается в направле- нии движения, поверхн. изгото- вляется из каната, в виде шнеков, профиль- ные, бесконеч- ные	
		Ролико- вые	Диски, шнеки из пластмасс, резины, шины, пружинные опоры	Относительно качеств. очистка в условиях приморзания вследствие скола, износ лент, сложность замены дисков, роликов	Шнеки с пластмас- совой или металли- ческой навивкой из капрона или проволоки	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Индивидуальный	Механический	Гидравлические	Гидронасосы с приводом и специальные целевые трубопроводы	Одновременно убирается просыпь. Сложность процесса т.к. необходимо шламование хозяйство, обмерзает барабан, лента, нужен больш. гидродинамич. удар	Возможно применение того же исполнения	Характерно, что и при ленточном полотне
		Пневматические	Необходим горячий пар или воздух, рекомендуется при слабом примерзании	Возможно применение, но не рекомендуется		
	Электрофизич.	Электрические	Электроосмотические щиты, электроды	Опыта эксплуатации нет		Не рекомендуется из-за сложности подвода тока
Комбинированный	Термомеханический	Аэромеханические	Реактивные двигатели, компрессоры с горячим воздухом, газами, парами	Имеется опыт уборки просыпей реакт. двигателями. Необходим гидродинам. удар, доп. мех. средства	Возможно	Рекомендуется горячую струю подавать между ветвями и очищать щеточными чистками
Индивидуальный	Механический	Вибрационные	Ударные, ударно-вибрационные с вибратором, ультразвуковые	Необх. установ. дополнит. чистки, износ ленты		Не рекомендовано вследствие износа тягово-несущего органа, звездочек из-за вибрации

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Комбинированный	Термомеханический	Гидромеханический	Гидроустановки со сжатой струей горячей воды, жидкостные ванны для погружен.	Возможность гидросмыв. просыпей. Качеств. очистка с щетками, скребками, но сложность эксплуатации	То же, что при ленточном	То же, что при ленточном
		Электрический	Электрические нагреватели с механическими чистками	Опыта эксплуатации нет		То же, что при ленточном
		Лучевой механический	Инфракрасными лучами, лазерными установками с мех. чисткой	Опыта эксплуатации нет	То же, что при ленточном	То же, что при ленточном
	Химический	Профилактика хим. средствами	Профилактика хим. средствами, покрытие, очистка мех. средствами	Покрытие лаками не дает эффекта, хим. средства более эффективны, но дороги	То же, что при ленточном	То же, что при ленточном

Для условий очистки несущего полотна конвейеров от примерзающих материалов все средства и способы объединены в индивидуальный и комбинированный методы по признаку возможности применимости того или иного способа или средства отдельно или в комбинации с другими. Методы очистки разделены на способы по признаку воздействия рабочего органа в зоне контакта примерзшего материала с рабочей поверхностью; индивидуальный – на механический и электрический; комбинированный – на термомеханический и химический.

Способы разделены на группы, в которые входят средства по функциональным признакам. Характеристика соответствующего средства очистки рекомендуемого исполнения выражена для конкретных условий, т.е. для прорезиненной или металлической поверхностей несущего полотна конвейеров при низких температурах. Например, при эксплуатации ленточных конвейеров в осенне-зимние периоды возможно применение индивидуального метода почти со всеми средствами механического способа очистки, а в случае эксплуатации пластинчатых конвейеров указано возможное исполнение средств очистки без характеристик их применения. Последнее объясняется почти полной неисследованностью очистки рабочих поверхностей пластинчатых конвейеров при низких температурах.

Таким образом, предлагаемая классификация систематизирует средства очистки в зависимости от ее процесса конструктивного исполнения по функциональным признакам, конкретных условий и режима эксплуатации [9].

#### **Заключение.**

На основе описанной классификации с целью установления критерия эффективности

сделана попытка формализации по внутренним связям средств очистки, разделенным на структурные элементы по функциональным признакам независимо от исполнения и выраженным структурными формулами. При этом выделены следующие структурные элементы: энергетический преобразователь (привод, различные энерготехнические преобразователи, например, ультразвуковой и т.д.); промежуточный элемент (редуктор, барабан, бесконечная лента или цепь и т.п.); рабочий орган.

На основе условных обозначений связей структурная формула (базовая) средств очистки в общем виде запишется

$$4 - D - n. \quad (12)$$

Примером очистительного устройства, описываемого базовой структурной формулой, может служить устройство щеточного типа, у которого щетки закреплены в пазах барабана или на бесконечной ленте, имеющей отводные барабаны, насаженные на вал, соединенные посредством жесткой муфты с редуктором, а последний – с электродвигателем также через жесткую муфту.

Пользуясь принципами последовательного совмещения и выражения структурных элементов базовой структурной формулы (12), получаем возможные структурные формулы средств очистки, независимо от того, были когда-либо применены или изготовлены очистители по ним или нет [10, 11].

Формула, полученная совмещением структурных элементов

$$4xD - n \quad (13)$$

позволяет выразить в виде структурных формул роликовые средства очистки

$$4xD - n = p_{\frac{n}{m}}^{\frac{m}{n}} - n_n, \quad (14)$$

где  $4xD = p_{\frac{n}{m}}^{\frac{m}{n}}$  – шнековое очистительное устройство с пластмассовым или металлическим рабочим органом, т.е. промежуточный элемент (барабан) и рабочий (навивка) – совмещены и представляют собой шнек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленский О.В. Справочник по проектированию ленточных конвейеров.— СПб.: Недра, 2009.— 376 с.
2. Кожушко Г.Г. Расчет и проектирование ленточных конвейеров: учебно-методическое пособие / Г.Г. Кожушко, О.А. Лукашук. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 232 с.
3. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров.— М.: Машиностроение, 1987. — 336 с.
4. Солод Г.И. Промежуточные приводы / Г.И. Солод, Л.И. Чугреев. – М.: Машиностроение, 1976. – 199 с.
5. Солод Г.И. Структурообразование и классификация средств механизации вскрыши / Г.И. Солод, А.Н. Данияров // Сборник трудов «Механизация и автоматизация производственных процессов горнодобывающей промышленности». – Караганда, КПТИ, 1973. – 350 с.
6. Паничкин А.В. Машины непрерывного транспорта: метод. указания по вып. курсовой работы: спец. 190205 / А. В. Паничкин; ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Каф. «ПТиСДМ». – Орел: Изд-во ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. – 79 с.
7. Израйлевич М.Л. Трубчатые скребковые и бесстержневые спиральные конвейеры – перспективные виды машин непрерывного транспорта / М.Л. Израйлевич // Подъемно-транспортное дело. – №6. – 2007. – 9–13 с.
8. Николаев Н.И. Проблемы технической эксплуатации технологического оборудования портовых зерновых перегрузочных комплексов / Н.И. Николаев, В.А. Савченко, Р.Г. Дубровин // Подъемно-транспортное дело. – № 5–6 (75). – 2013. – 25–26 с.
9. Павлова А.А. Оптимизация параметров ленточного конвейера / А.А. Павлова // Научный альманах. – № 4–3 (30). – 2017. – с. 135–136.
10. Рачков Е.В. Конструкции и эксплуатационные свойства транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования [Электронный ресурс]: учебное пособие / Е.В. Рачков. — Электрон. текстовые данные. — М.: Московская государственная академия водного транспорта, 2013. — 88 с. — 2227–8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46471.html>
11. Горбунова Л.Н. Повышение безопасности ленточных конвейеров / Л.Н. Горбунова, Я.Л. Либерман // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – №3. – 2011. – с.4–7.

**Паничкин Антон Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
Кандидат технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
подъемно–транспортных,  
строительных и дорожных машин  
302030, г. Орел, ул. Московская, 77  
Тел. 89066637799  
E-mail: teppa79@yandex.ru

**Трубин Алексей Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
Аспирант кафедры подъемно–  
транспортных, строительных и  
дорожных машин  
302030, г. Орел, ул. Московская, 77  
Тел. 89155082664  
E-mail: Alextrubin@yandex.ru

**Бодров Андрей Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры сервиса и ремонта  
машин  
302030, г. Орел, ул. Московская, 77  
Тел. 8–905–856–65–56  
E-mail: bodrov57@gmail.com

A.V. PANICHKIN, A.S. TRUBIN, A.S. BODROV

## STUDY OF THE CONVEYORS CLEANING PROCESS IN COMPLEX CLIMATIC CONDITIONS

**Abstract.** *The actual problem of cleaning a high-capacity conveyor belt from adherent or frozen material under difficult climatic conditions is considered in the article. The physics of the web cleaning process is described in detail with the help of a scraper cleaner, the main attention is paid to the dependencies for determining the resistance of the cleaning device, the stresses in the frozen material. It is specially noted that the total resistance of the cleaning device is recorded taking into account the physico-mechanical properties of the material being transported. It is established that at present there is no single classification of purifying devices, and the existing classifications are not without shortcomings. On the basis of the described classification, in order to establish a criterion of efficiency, an attempt has been made to formalize internal means of cleaning facilities, divided into structural elements according to functional characteristics, regardless of their performance and expressed structural formulas.*

**Keywords:** belt conveyor, carrying linen, cleaning, reliability, scraper.

## BIBLIOGRAPHY

1. Zelensky O.V. Guide to the design of belt conveyors. – St. Petersburg: Nedra, 2009. – 376 p.
2. Kozhushko G.G. Calculation and design of belt conveyors: an educational-methodical manual / G.G. Kozhushko, O.A. Lukashuk. – Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2016. – 232 p.
3. Shakhmeister L.G., Dmitriev V.G. Theory and calculation of belt conveyors. – Moscow: Mechanical Engineering, 1987. – 336 p.
4. Solod G.I. Intermediate Drives / G.I. Solod, L.I. Chugreev. – Moscow: Mechanical Engineering, 1976. – 199 p.
5. Solod G.I. Structure formation and classification of means of mechanization of overburden / G.I. Solod, A.N. Daniyarov // Collection of works «Mechanization and automation of production processes in the mining industry». – Karaganda, Karaganda Polytechnic Institute, 1973. – 350 p.
6. Panichkin A.V. Continuous transport machines: method. instructions on the issue. course work: special. 190205 / AV Panichkin; «State University – educational-scientific-production complex», Department «Lifting, transport, construction and road machines.» – Orel: Publishing house State University – educational-research and production complex, 2013. – 79 p.
7. Izrailevich M.L. Tubular scraper and flightless spiral conveyors – perspective types of machines for continuous transport / M.L. Izrailevich // Lifting and transport. – №6. – 2007. – 9–13 p.
8. Nikolayev N.I. Problems of technical operation of technological equipment of port grain loading complexes / N.I. Nikolaev, V.A. Savchenko, R.G. Dubrovin // Lifting and transport. – No. 5–6 (75). – 2013. – 25–26 p.
9. Pavlova A.A. Optimization of belt conveyor parameters / A.A. Pavlova // Scientific almanac. – No. 4–3 (30). – 2017. – p. 135–136.
10. Rachkov E.V. Constructions and operational properties of transport and transport-technological machines and equipment [Electronic resource]: a tutorial / E.V. Rachkov. – Electron. text data. – Moscow: Moscow State Academy of Water Transport, 2013. – 88 c. – 2227–8397. – Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/46471.html>
11. Gorbunova L.N. Improving the safety of belt conveyors / L.N. Gorbunova, Ya.L. Lieberman // Mechanical engineering and life safety. – No. 3. – 2011. – p.4–7.

**Panichkin Anton Valerevich**  
Orel state University named after I. S. Turgenev  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Head of the  
Department of Lifting, Transport,  
Construction and Road Machinery  
302030, Orel, Moskovskaya st., 77  
Tel. 89066637799  
E-mail: teppa79@yandex.ru

**Trubin Aleksey Sergeevich**  
Orel state University named after I. S. Turgenev  
Postgraduate of the Department of  
Lifting, Transport, Construction and  
Road Machinery  
302030, Orel, Moskovskaya st., 77  
Tel. 89155082664  
E-mail: Alextrubin@yandex.ru

**Bodrov Andrey Sergeevich**  
Orel state University named after I. S. Turgenev  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor of Machine  
Maintenance and Repair Department  
302030, Orel, Moskovskaya st., 77  
Tel. 8–905–856–65–56  
E-mail: bodrov57@gmail.com

## **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 629.735.45:551.53

Е.О. АРИСКИН, М.Р. МИННЕБАЕВ, А.В. НИКИТИН, В.В. СОЛДАТКИН, В.М. СОЛДАТКИН

### **ПОСТРОЕНИЕ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА БОРТУ ВЕРТОЛЕТА С ИОННО–МЕТОЧНЫМИ И АЭРОМЕТРИЧЕСКИМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ**

**Аннотация.** Рассматривается проблема контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на борту вертолета на стоянке, стартовых и взлетно–посадочных режимах эксплуатации, связанная с влиянием аэродинамических возмущений вихревой колонной несущего винта. Раскрываются особенности построения, алгоритмы обработки информации и недостатки системы, построенной на основе неподвижного многоканального аэрометрического приемника. Обосновываются конкурентные преимущества, приводятся функциональная и конструктивная схемы системы контроля воздушных параметров полета и окружающей воздушной среды, построенной на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости. Приводятся алгоритмы формирования и обработки информации измерительных каналов системы на стоянке до запуска силовой установки и при вращении несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности, на взлетно–посадочных и полетных режимах эксплуатации вертолета.

**Ключевые слова:** вертолет, воздушные параметры полета и окружающей среды, контроль на борту вертолета, система, неподвижный приемник, ионно–меточные и аэрометрические каналы, функциональная и конструктивная схема, алгоритмы обработки информации.

#### **Введение**

В различных отраслях промышленности, в энергетике и строительстве широкое применение находят вертолеты различных классов. Эксплуатация вертолетов происходит в приземном возмущенном слое атмосферы в условиях значительных ветровых возмущений, поэтому при пилотировании и решении задачи обеспечения безопасности полета вертолета необходима достоверная информация о величине и составляющих вектора истинной воздушной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте и приборной скорости, скорости и угле направления вектора ветра относительно продольной оси вертолета, атмосферном давлении и плотности, о других воздушных параметрах, определяющих аэродинамику и динамику движения вертолета относительно окружающей воздушной среды на всех этапах и режимах полета [1].

На стоянке, при рулении и маневрировании по земной поверхности (стартовые режимы), при взлете и наборе высоты, снижении, висении и посадке (взлетно–посадочные режимы), при полете с малыми скоростями на работу бортовых средств контроля воздушных параметров полета и окружающей среды оказывают существенное влияние индуктивные потоки вихревой колонны несущего винта, ограничивающие использование традиционных средств [2], что обуславливает необходимость разработки систем контроля воздушных параметров полета и окружающей среды, максимально учитывающих аэродинамику и динамику полета вертолета.

**Варианты построения системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника**

Возможности по преодолению ограничений, связанных с влиянием индуктивных потоков несущего винта, открываются при использовании для целей измерения воздушных параметров полета и окружающей среды информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [3], воспринимаемой неподвижным многофункциональным аэрометрическим приемником, выходные сигналы которого регистрируются

аэрометрическими измерительными каналами. Обработка выходных сигналов в соответствии с разработанными алгоритмами позволяет определить воздушные параметры полета вертолета и окружающей среды в широком диапазоне рабочих скоростей и высот полета [4].

В работах [5, 6] раскрываются принципы построения и алгоритмы работы бортовой системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах, при полете вертолета на малых скоростях, в которой для целей измерения используется информация о параметрах вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемая неподвижным многофункциональным аэрометрическим приемником [4].

Многофункциональный аэрометрический приемник (рисунок 1) содержит неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник 1, выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3, между внутренними профилированными поверхностями которых в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений  $P_i$ , определяющих величину  $W$  и угол направления  $\psi$  вектора ветра  $\vec{W}$  или параметры вектора  $\vec{V}_B$  истинной воздушной скорости в горизонтальной плоскости.

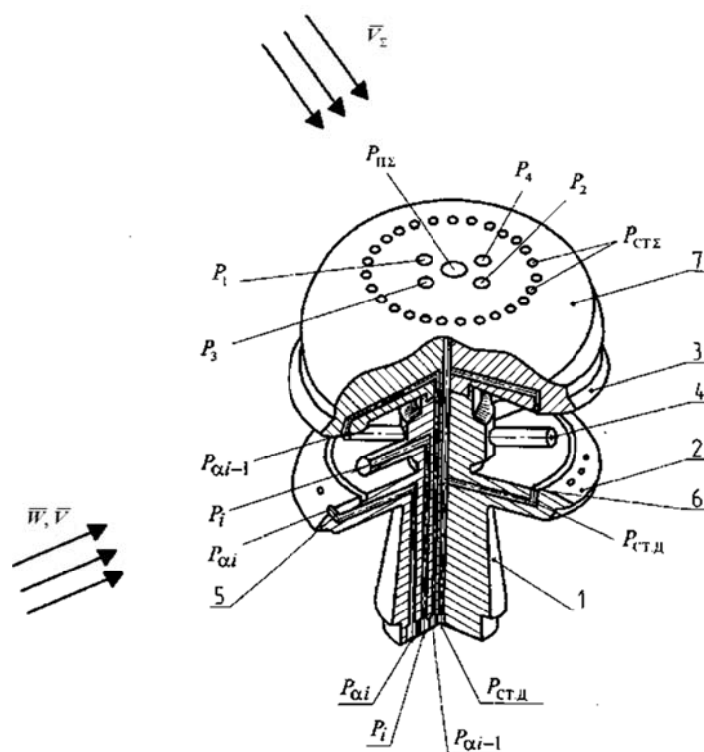


Рисунок 1 – Конструктивная схема неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления  $P_{ст.д.}$ , формируемого в проточном канале приемника 1. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия 5 для забора давлений  $P_{\alpha i}$  и  $P_{\alpha i-1}$ , определяющих угол вектора ветра или вектора истинной воздушной скорости  $\vec{V}_B = -\vec{V}$  в вертикальной плоскости.

Таким образом, воспринимаемые неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником первичные информативные сигналы в виде давлений  $P_i$ ,  $P_{ст.д.}$ ,  $P_{\alpha i}$ ,  $P_{\alpha i-1}$  позволяют определить величину  $W$  и угловое положение вектора скорости ветра  $\vec{W}$  или вектора истинной воздушной скорости  $\vec{V}_B$  относительно продольной оси вертолета или продольные и боковые составляющие вектора скорости ветра или вектора истинной воздушной скорости на стоянке до запуска силовой установки и раскрутки трансмиссии и на режимах полета, когда неподвижный многоканальный проточный аэрометрический

приемник находится вне зоны действия вихревой колонны несущего винта.

Для восприятия аэрометрической информации на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, на режиме руления и маневрирования вертолета по земле и на взлетно–посадочных режимах, при полете на малых скоростях, когда неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник 1 находится в створе вихревой колонны несущего винта, на наружной поверхности экранирующего диска 3 установлен дополнительный аэрометрический приемник 7 в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска. На поверхности полусферы на оси симметрии расположено отверстие, являющееся приемником полного давления  $P_{ПД}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны. В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом  $\varphi_{01}$  к оси симметрии, симметрично расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений  $P_1$  и  $P_2$ . В плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии вертолета, под углом  $\varphi_{02}$  к оси симметрии, расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений  $P_3$  и  $P_4$ . Перпендикулярно оси симметрии сферического приемника на его поверхности, например по окружности расположены отверстия, объединенные в общем канале, являющимся приемником статического давления  $P_{СТД}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны.

При рулении и маневрировании по земле и на взлетно–посадочных режимах, при полете с малыми скоростями за меру величин составляющих вектора скорости ветра  $\bar{W}$  и вектора истинной воздушной скорости  $\bar{V}_B$  вертолета принимается угловое положение вектора скорости  $\bar{V}_\Sigma$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, определяемое углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , которые регистрируются ортогонально расположенными приемниками давлений  $P_1$  и  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ .

Давления  $P_1$  и  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ ,  $P_{ПД}$  и  $P_{СТД}$ , воспринимаемые дополнительным аэрометрическим приемником 3, подключены ко входам пневмоэлектрических преобразователей, выходы которых через последовательно соединенные мультиплексор и аналого–цифровой преобразователь подключены к микропроцессору. На вход микропроцессора также подключены выходы приемника температуры торможения результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта и выходы пневмоэлектрических преобразователей давлений  $P_i$ ,  $P_{ai}$ ,  $P_{ai-1}$ ,  $P_{СТД}$ , воспринимаемых неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником 1. Выход микропроцессора является выходом бортовой системы по величине и углу направления или продольной и боковой составляющим вектора скорости ветра  $\bar{W}$  и истинной воздушной скорости  $\bar{V}_B$  на стоянке, при рулении и маневрировании по земной поверхности, при взлете и посадке, в области малых и околонулевых скоростей полета и на режиме висения, когда неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник находится в зоне вихревой колонны несущего винта.

Однако построение неподвижного многоканального аэрометрического приемника на основе многоканального проточного аэрометрического приемника связано с необходимостью защиты большого числа трубок полного давления, установленных в его проточном канале, от обледенения, попадания пыли и влаги в реальных условиях эксплуатации вертолета. Многоканальная схема преобразования воспринимаемых давлений обуславливает жесткие требования к идентичности и стабильности характеристик аэрометрических измерительных каналов. Все это усложняет конструкцию, снижает надежность, повышает стоимость, сдерживает применение системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на вертолетах различного класса и назначения.

**Система контроля воздушных параметров полета и окружающей среды с неподвижным приемником потока, ионно–меточными и аэрометрическим измерительными каналами**

Для устранения недостатков системы контроля воздушных параметров на основе неподвижного многофункционального приемника и аэрометрических измерительных каналов предлагается система, функциональная схема которой приведена на рисунке 2. [7].

В этом случае система контроля воздушных параметров полета и окружающей среды выполняется по двухканальной схеме и включает ионно-меточный и аэрометрический измерительные каналы.

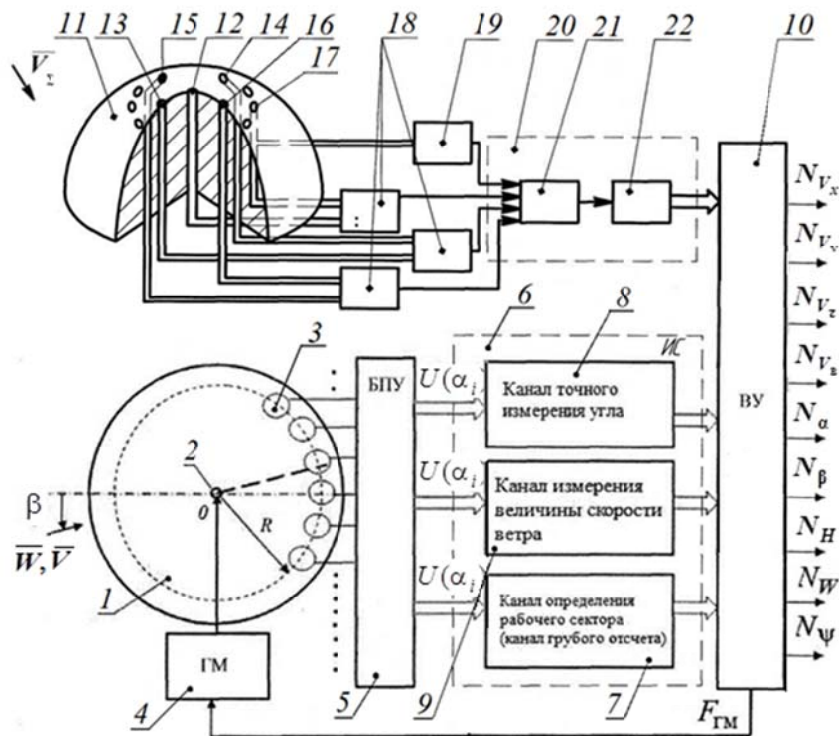


Рисунок 2 – Функциональная схема системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды с аэрометрическими и ионно-меточными измерительными каналами

В качестве ионно-меточного канала используется панорамный ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости [8], включающий плату 1 с системой приемных электродов 3, в центре 0 которой установлен искровой разрядник 2, подключенный к генератору меток (ГМ) 4. При подаче на высоковольтный разрядник 2 высоковольтного импульса от генератора меток (ГМ) формируется ионная метка с явно выраженным электростатическим зарядом, которая движется совместно с набегающим воздушным потоком, приобретая его скорость  $V$  и направление  $\alpha$ . При приближении заряженной ионной метки к приемным электродам 3, расположенным на окружности радиусом  $R$ , на них наводятся электростатические заряды, величина которых зависит от расстояния  $R$  от точки генерации ионной метки до приемного электрода и углового положения  $\psi$  траектории движения метки.

На рисунке 3 показана конструктивная схема датчика первичной информации системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на основе ионно-меточных и аэрометрических измерительных каналов.

Перпендикулярно системе приемных электродов 1 панорамного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости на стойках 3 установлен неподвижный полусферический аэрометрический приемник 2, на поверхности которого расположены отверстия для восприятия давлений, несущих информацию о векторе скорости  $\vec{V}_\Sigma$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта. Воспринимаемые давления по пневмоканалам через стойки 3 передаются ко входам пневмоэлектрических преобразователей, расположенных внутри панорамного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.

Для восприятия информации результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта на поверхности полусферического аэрометрического приемника 11 (рис. 2) расположены отверстия 12 для забора полного давления  $P_{пз}$ , результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, отверстия 13, 14 и 15, 16 для забора давлений  $P_1$ ,

$P_2$  и  $P_3$ ,  $P_4$ , определяющих углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  положения вектора скорости  $\vec{V}_\Sigma$  относительно оси симметрии полусферического приемника в плоскости, параллельной продольной оси вертолета, и в плоскости, перпендикулярной продольной оси вертолета, а также отверстия 17 для забора статического давления  $P_{СТС}$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта.

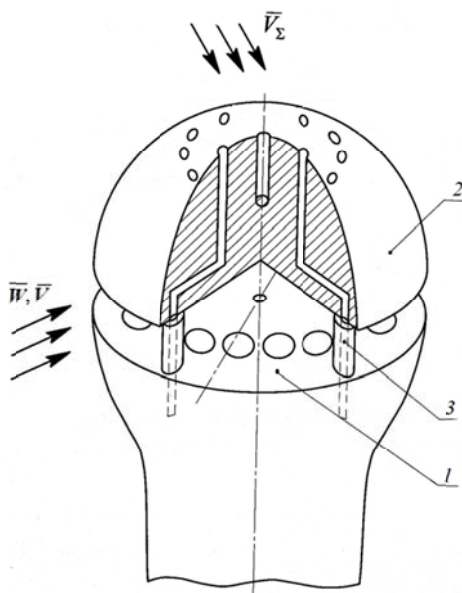


Рисунок 3 – Конструктивная схема датчика первичной информации

Воспринимаемые давления  $P_{ПС}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_{СТС}$  с помощью пневмоэлектрических преобразователей перепада давлений 18 и преобразователя абсолютного давления 19 преобразуются в электрические сигналы, которые через канал 20 аналого–цифрового преобразования, включающего мультиплексор 21 и АЦП 22 подаются в вычислительное устройство 10, на выходе которого по разработанным алгоритмам формируются цифровые сигналы по воздушным параметрам полета вертолета и окружающей среды.

**Алгоритмы обработки информации каналов системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на различных этапах и режимах эксплуатации вертолета**

На стоянке до запуска силовой установки входными сигналами ионно–меточного канала являются скорость  $W_\Gamma$  и угол направления  $\psi$  вектора горизонтального ветра  $\vec{W}_\Gamma$  относительно продольной оси вертолета, которые необходимы для предотвращения опрокидывания вертолета на бок или на хвостовую балку [9]. При попадании траектории ионной метки в  $i$ -ый грубый канал текущее значение угла  $\psi$  направления горизонтального ветра  $W_\Gamma$  определяется как

$$\psi = i\alpha_0 + \alpha_p, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – угол, охватывающий рабочий сектор грубого канала отсчета (при  $i_{\max} = 4$ ,  $\alpha_0 = 90^\circ$ );

$i$  – номер рабочего сектора ( $i = \overline{1,4}$ );

$\alpha_p$  – значение измеряемого угла в пределах  $i$ -го рабочего сектора.

Сигналы  $U(\alpha_i)$ , пропорциональные синусу  $U \sin \alpha_i$  и косинусу  $U \cos \alpha_i$  измеряемого угла  $\psi$  в  $i$ -ом рабочем секторе грубого канала и снимаемые с блока предварительных усилителей, обрабатываются в вычислительном устройстве, на выходе которого формируется цифровой код, связанный со значением  $\alpha_p$  измеряемого угла в пределах рабочего сектора точного канала соотношением

$$\alpha_p = \arctg \frac{U \sin \alpha_i}{U \cos \alpha_i}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – текущее значение измеряемого угла в пределах  $i$ -го рабочего сектора.

При работе канала определения скорости  $W_r$  вектора горизонтального ветра  $\overline{W}_r$  формируется интервал времени  $\tau_w$  пролета ионной метки расстояния  $R$  от точки генерации  $O$  ионной метки до окружности с приемными электродами. В соответствии с интервалом времени  $\tau_w$  в вычислительном устройстве вырабатывается цифровой код  $N_w$ , пропорциональный величине скорости горизонтального ветра

$$W_r = \frac{R}{\tau_w}. \quad (3)$$

**На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности, на взлетно–посадочных режимах** в работу включается второй – аэрометрический канал, выполненный на основе неподвижного полусферического аэрометрического приемника, жестко установленного над системой приемных электродов ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.

По полному  $P_{\Pi\Sigma}$  и статическому  $P_{\Sigma\Sigma}$  давлениям и температуре  $T_{\Sigma\Sigma}$  торможения результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемой приемником температуры торможения, установленным на фюзеляже в зоне действия вихревой колонны несущего винта можно определить величину (модуль) вектора скорости  $\overline{V}_\Sigma$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, используя соотношение [4]:

$$V_\Sigma = 44,826 \sqrt{\frac{T_{\Sigma\Sigma} \left[ \left( \frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Sigma}}{P_{\Sigma\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143} - 1 \right]}{\left( \frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Sigma}}{P_{\Sigma\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143}}}, \quad (4)$$

где параметры, входящие в формулу (4) имеют размерности в единицах системы СИ.

Проекции вектора  $\overline{V}_\Sigma$  скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего на оси связанной системы координат определяются как

$$V_{\Sigma x} = V_\Sigma \cdot \sin \varphi_1; \quad V_{\Sigma y} = V_\Sigma \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2; \quad V_{\Sigma z} = V_\Sigma \cdot \sin \varphi_2. \quad (5)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы, определяющие положение вектора скорости  $\overline{V}_\Sigma$  результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего относительно осей полусферического аэрометрического приемника, которые определяются по давлениям  $P_1, P_2$  и  $P_3, P_4$ .

Используя соотношения для определения давления на поверхности полусферического аэрометрического приемника, приведенные в работе [10], углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , определяющие положение вектора скорости  $\overline{V}_\Sigma$  результирующего набегающего воздушного потока вихревой колоны несущего винта, будут определяться соотношениями

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Sigma}} \right); \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma\Sigma}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\varphi_{10}$  и  $\varphi_{20}$  – углы расположения отверстий для забора давлений  $P_1, P_2$  и  $P_3, P_4$ .

Поскольку неподвижный панорамный ионно–меточный датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником расположен на фюзеляже на определенном радиус–векторе  $\overline{R}$  от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости  $\overline{V}$  воздушного потока, набегающего на аэрометрический приемник, которое определяется векторным уравнением вида [2]

$$\bar{V}_k = \bar{V} + \bar{\omega} \times \bar{R}(x, y, z), \quad (7)$$

где  $\bar{V}_k$  – кинематически искаженный вектор скорости набегающего воздушного потока в месте установки неподвижного комбинированного аэрометрического приемника;

$\bar{\omega} (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  – вектор угловой скорости вращения вертолета относительно центра масс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат;

$x, y, z$  – координаты места установки неподвижного панорамного меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Проекции вектора скорости  $\bar{V}_k$  на оси связанной системы координат будут определяться системой уравнений вида

$$V_{kx} = V_x + (\omega_y z - \omega_x y); \quad V_{ky} = V_y + (\omega_z x - \omega_x z); \quad V_{kz} = V_z + (\omega_x y - \omega_y x), \quad (8)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора истинной воздушной скорости  $\bar{V}_B$  на оси связанной системы координат.

Продольная и боковая составляющие  $V_x, V_z$  и величина (модуль)  $V_B$  вектора истинной воздушной скорости  $\bar{V}_B$ , углы атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  вертолета, статическое давление  $P_H$  и барометрическая высота  $H$  будут определяться соотношениями [4]:

$$\begin{aligned} V_x &= V_\Sigma \sin \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma T\Sigma}} \right) \right] \times \\ &\times \cos \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma T\Sigma}} \right) \right] - K_{ix} V_{i0} - (\omega_y z - \omega_x y); \\ V_z &= V_\Sigma \sin \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{4}{9 \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma T\Sigma}} \right) \right] - K_{iz} V_{i0} - (\omega_x y - \omega_y x); \\ V_B &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad \alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arcsin \frac{V_z}{V_B}; \\ P_H &= P_{\Sigma T\Sigma} - K_p \frac{\rho_\Sigma V_\Sigma^2}{2}; \quad \rho_\Sigma = \frac{P_{\Sigma T\Sigma}}{287,05287 T_{\Sigma}} \left( \frac{P_{\Pi\Sigma} - P_{\Sigma T\Sigma}}{P_{\Sigma T\Sigma}} + 1 \right)^{0,2857143}; \\ H &= \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $P_0 = 101325$  Па и  $T_0 = 288,15$  К – абсолютное давление и абсолютная температура воздуха на высоте  $H = 0$  стандартной атмосферы;

$R$  – удельная газовая постоянная воздуха ( $R = 287,05287$  Дж/кг·К);

$\tau$  – температурный градиент ( $\tau = 0,0065$  К/м);

$K_p$  – безразмерный коэффициент, определяющий связь  $P_{\Sigma T\Sigma}$  и  $P_H$ , который определяется при летных испытаниях для конкретного типа вертолета и места установки на фюзеляже неподвижного панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным на нем осесимметричным полусферическим аэрометрическим приемником;

$K_{iy}$  – безразмерный коэффициент, определяемый аналогично  $K_{ix}$  и  $K_{iz}$ .

Используя информацию о величине  $V_\Pi$  и угле сноса  $\psi_c$  вектора путевой скорости  $\bar{V}_\Pi$  от доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС) и о составляющих вектора истинной воздушной скорости  $\bar{V}_B$  от аэрометрического канала, продольная  $W_x$ , боковая  $W_z$  составляющие, величина (модуль)  $W_\Gamma$  и направление  $\psi$  горизонтального вектора ветра  $\bar{W}_\Gamma$  на

взлетно–посадочных режимах вертолета будет определять соотношениями [5]:

$$W_x = |V_x| - V_n \cos \psi_c; \quad W_z = |V_z| - V_n \sin \psi_c; \quad \psi = \beta + \psi_c; \quad W_r = \sqrt{W_x^2 + W_z^2}. \quad (10)$$

**При скоростях полета**, когда неподвижный датчик первичной информации системы измерения воздушных параметров вертолета с аэрометрическими и ионно–меточными измерительными каналами выходит из зоны вихревой колонны несущего винта для определения воздушных параметров полета и окружающей среды используется информации аэрометрического и ионно–меточного измерительных каналов.

По информации ионно–меточного измерительного канала по соотношениям, аналогичным (1) – (3) определяются истинная воздушная скорость  $V_B$  и угол скольжения  $\beta$

$$V_B = \frac{R}{\tau_V}; \quad \beta = i\alpha_0 + \alpha_p; \quad \alpha_p = \arctg \frac{U \sin \alpha}{U \cos \alpha}, \quad (11)$$

где  $\tau_V$  – время пролета ионной метки от разрядника до окружности с приемными электродами при данной истинной воздушной скорости  $V_B$ .

Для определения барометрической высоты  $H$  на наружной поверхности платы 1 с приемными электродами (рис. 2) ионно–меточного датчика аэрометрического угла и истинной воздушной скорости располагается отверстие–приемник для забора статического давления  $P_H$  набегающего воздушного потока. Тогда барометрическая высота  $H$  будет определяться известным соотношением [4]

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right].$$

Вертикальная воздушная скорость  $V_y$  будет определяться путем вычисления производной по времени от барометрической высоты

$$V_y = \frac{dH}{dt} = \frac{H(t_i) - H(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}, \quad (12)$$

где  $t_i$  и  $t_{i-1}$  – текущий и предшествующие моменты времени, в которых произведены вычисления барометрической высоты. Возможно использование алгоритма вычисления вертикальной воздушной скорости по большему числу значений барометрической высоты, полученных через фиксированный интервал времени  $\tau$ , например, вида

$$V_y = \frac{1}{4\tau} [H(t_i) - H(t_i + 2\tau) + H(t_i + \tau) - H(t_i + 3\tau)]. \quad (13)$$

Угол атаки вертолета можно определить, используя соотношение

$$\alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x} = \frac{V_y}{V_B \cos \beta}, \quad (14)$$

тем самым обеспечивая контроля всех воздушных параметров полета вертолета и окружающей среды на режимах эксплуатации, когда неподвижный приемник выходит из зоны вихревой колонны несущего винта.

### Заключение

Таким образом, используя информацию, воспринимаемую неподвижным датчиком первичной информации, выполненным в виде неподвижного панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником, в вычислительном устройстве, выполненным в виде вычислителя, реализующего алгоритмы (1) – (3), (5), (6), (9), (10), определяются параметры вектора скорости ветра и другие воздушные параметры вертолета, на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта, при рулении и маневрировании по земной поверхности, при взлете и наборе высоты, при полете на малых скоростях и на режимах снижении, на режимах висения и посадки вертолета.

Установка на наружной поверхности платы приемных электродов ионно–меточного датчика аэродинамического угла отверстия–приемника статического давления набегающего воздушного потока позволяет вычислить воздушные параметры полета вертолета и

окружающей среды при выходе датчика первичной информации из зоны вихревой колонны несущего винта.

Предложенные подходы к построению, модели и алгоритмы обработки первичной информации системы воздушных параметров полета вертолета и окружающей среды с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами позволяют определить параметры вектора ветра и высотно-скоростные параметры вертолета в широком диапазоне эксплуатации, в том числе на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах, при полете в диапазоне малых и полетных скоростях.

Применение рассмотренной системы измерения воздушных параметров на различных классах вертолетов позволяет повысить безопасность эксплуатации и эффективность решения полетных задач.

*Работа выполнена по гранту РФФИ №18-32-00187*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8 (издание 4). – М.: Авторитет, 1996. – 554 с.
2. Козицин В.К., Макаров Н.Н., Порунов А.А., Солдаткин В.М. Анализ принципов построения систем измерения воздушных сигналов вертолета // Авиакосмическое приборостроение. 2003. №10. С. 2–13.
3. Солдаткин В.В. Аэрометрическая система измерения малых воздушных скоростей вертолета на основе информации о положении вихревой колонны несущего винта // Известия вузов. Авиационная техника. 2009. №4. С. 52–56.
4. Солдаткин, В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта: Монография. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 284с.
5. Никитин, А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Система измерения параметров вектора ветра на стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 6. С. 64–70.
6. Никитин, А.В., Солдаткин В.М. Система измерения параметров вектора ветра и истинной воздушной скорости на борту вертолета // Датчики и системы. 2015. №4. С. 48 – 54.
7. Никитин, А.В., Арискин Е.О., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Бортовая система измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета с аэрометрическими и ионно-меточными измерительными каналами / Известия вузов. Авиационная техника. 2015. №4. С. 87–93.
8. Ганеев, Ф.А., Солдаткин В.М. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. №3. С.46–50.
9. Ерусалимский, М.А., Егоров В.Н. Экипажам вертолета информационную поддержку // Авиасоюз, № 2. С. 24–26.
10. Петунин, А.Н. Методы и техника измерения параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). М.: Машиностроение, 1972. 332 с.

**Арискин Евгений Олегович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.  
Ассистент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8–960–042–52–57  
e-mail: ariskineo@mail.ru

**Миннебаев Марат Рамилевич**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.  
Магистрант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8–960–042–52–57  
e-mail: martin1968q@gmail.com

**Никитин Александр Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8–987–220–50–20  
E-mail: nikitin.rf@mail.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.  
Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8–917–289–06–75  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Владимир Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы»  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8–987–290–81–48  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

E.O. ARISKIN, M.R. MINNEBAYEV, A.V. NIKITIN, V.V. SOLDATKIN, V.M. SOLDATKIN

# THE CONSTRUCTION AND ALGORITHMS OF CONTROL SYSTEM OF AIRCRAFT FLIGHT PARAMETERS AND ENVIRONMENT ON BOARD THE HELICOPTER WITH THE ION-TAGGING AND AEROMETRIC MEASUREMENT CHANNELS

**Abstract.** *The problem of control of air parameters of flight and environment on board the helicopter on the parking, starting and takeoff and landing modes of operation associated with the influence of aerodynamic disturbances of the vortex column of the main rotor is considered. Features of construction, algorithms of information processing and shortcomings of the system constructed on the basis of the motionless multichannel aerometric receiver are revealed. Justify the competitive advantage, provides a functional and structural diagrams of the control system of flight parameters and environment based on ion-label sensor for aerodynamic angle and true airspeed. Algorithms of formation and processing of information of measuring channels of system on parking before start of power plant and at rotation of the rotor, at taxiing and maneuvering on an earth's surface, on takeoff and landing and flight modes of operation of the helicopter are resulted.*

**Keywords:** *helicopter, air parameters of the flight and the environment, control on board the helicopter, system, fixed receiver, ion-tagging and aerometric channels, functional and design scheme, information processing algorithms.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Rukovodstvo po letnoj jekspluatacii vertoletu Mi-8 (izdanie 4). – M.: Avtoritet, 1996. – 554 s.
2. Kozicin V.K., Makarov N.N., Porunov A.A., Soldatkin V.M. Analiz principov postroenija sistem izmerenija vozdušnyh signalov vertoletu // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2003. №10. S. 2–13.
3. Soldatkin V.V. Ajerometricheskaja sistema izmerenija malyh vozdušnyh skorostej vertoletu na osnove informacii o položenii vihrevoj kolonny nesushhego vinta // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2009. №4. S. 52–56.
4. Soldatkin V.V. Sistema vozdušnyh signalov vertoletu na osnove nepodvizhnogo ajerometricheskogo priemnika i informacii ajerodinamicheskogo polja vihrevoj kolonny nesushhego vinta: Monografija. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2012. 284s.
5. Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Sistema izmerenija parametrov vektora vetra na startovyh i vzletno-posadochnyh rezhimah vertoletu // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2013. № 6. S. 64–70.
6. Nikitin A.V., Soldatkin V.M. Sistema izmerenija parametrov vektora vetra i istinnoj vozdušnoj skorosti na bortu vertoletu // Datchiki i sistemy. 2015. №4. S. 48 – 54.
7. Nikitin A.V., Ariskin E.O., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Bortovaja sistema izmerenija parametrov vektora vetra na stojanke, startovyh i vzletno-posadochnyh rezhimah vertoletu s ajerometricheskimi i ionno-metochnymi izmeritel'nymi kanalami / Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2015. №4. S. 87–93.
8. Ganeev F.A., Soldatkin V.M. Ionno-metochnyj datchik ajerodinamicheskogo ugla i vozdušnoj skorosti s logometricheskimi informativnymi signalami i interpolicionnoj shemoj obrabotki // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2010. №3. S.46–50.
9. Erusalimskij M.A., Egorov V.N. Jekipazham vertoletu informacionnuju podderzhku // Aviasojuz, № 2. S. 24–26.
10. Petunin A.N. Metody i tehnika izmerenija parametrov gazovogo potoka (priemniki davlenija i skorostnogo napora). M.: Mashinostroenie, 1972. 332 s.

**Ariskin Evgeniy Olegovich**  
FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan  
Assistant of department «Devices and information-measuring system»  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-84  
E-mail: lariskineo@mail.ru

**Minnebaev Marat Ramilevich**  
FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan  
Undergraduate of department «Devices and information-measuring system»  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-84  
E-mail: martin1968q@gmail.com

**Nikitin Aleksandr Vladimirovich**  
FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan  
Candidate of technical science, master teacher of department «Devices and information-measuring system»  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-84  
E-mail: nikitin.rf@mail.ru

**Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich**  
FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan  
Doctor of technical science, docent, docent of department «Devices and information-measuring system»  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-84  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Soldatkin Vladimir Michailovich**  
FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan  
Doctor of technical science, professor, head of department «Devices and information-measuring system»  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-84  
E-mail: w-soldatkin@mail.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. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуточной 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](mailto: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](mailto: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 27.06.2018 г.  
Дата выхода в свет  
Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 10,06  
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