

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2 (370) 2025

**Редколлегия**

**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.

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

**Члены редколлегии:**

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

Дунаев А.В. д-р техн. наук, доц. (Россия)

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

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

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

Киричек А.В. 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 Шэнбо. канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирзалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)

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

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

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

Савин Л.А. 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)

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

**Ответственный редактор:**

Тюхта А.В. канд. техн. наук

**Адрес редакции**

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

https://oreluniver.ru/science/journal/fippt  
E-mail: radsu@rambler.ru

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

Подписан индекс 29504  
по объединенному каталогу  
«Прессы России»

на сайтах www.pressa-rf.ru и www.aks.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Журнал индексируется в системе  
Российского индекса научного цитирования  
РИНЦ, а также в международных системах  
Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022  
№02-1198 «О Перечне рецензируемых  
научных изданий», журнал  
«Фундаментальные и прикладные проблемы  
техники и технологии» как издание,  
входящее в международную базу данных  
Chemical Abstracts, приравнивается к  
изданиям категории К1.

**Содержание**

**Теоретическая механика и ее приложения**

Кононенко А.С., Нотфуллин И.Ф. Теоретическое обоснование повышения  
герметизирующей способности фланцев использованием герметиков вместо  
традиционных прокладок.....

3

**Механика деформируемого твердого тела,  
динамика и прочность**

Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Круговая сэндвич-пластина в температурном поле  
под действием кольцевого импульса.....

9

**Машиностроительные технологии и оборудование**

Землянушнов Н.А., Землянушнова Н.Ю., Костенко К.В. Совершенствование  
математической модели напряжённо-деформированного состояния пружины при  
контактном заневоливании.....

19

Мищенко Е.В., Асонов Д.Г., Король В.В. Причины дефектов и проблем производства  
изделий методом FDM (FFF) 3D печати.....

27

Карфидов А.О., Горбатюк С.М., Ибрагимова А.А. Обзор современных методов защиты  
от коррозии цинкованием.....

34

Семенов И.Е., Резник К.Д. Экспериментальные исследования механических свойств  
композитного эластичного инструмента на основе полиуретана для листовой штамповки.....

46

Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Фроленкова Л.Ю., Петрухин А.В., Шлюпкин П.И. Закономерности взаимодействия абразивной частицы с каналом фокусирующей  
трубки сопла гидроабразивной установки при введении ПАВ.....

52

Неменко А.В., Никитин М.М. Оптимизация параметров технологического процесса  
изготовления изделий с поверхностями второго порядка.....

62

**Машиноведение и мехатроника**

Бондаренко М.Э., Горин А.В., Кочетков Е.В., Серебренников А.Д., Бондаренко К.В. Исследование вибрационного воздействия системы с инерционным гасителем на  
подшипниковые узлы.....

69

Козырев Д.Л., Поляков Р.Н., Горин А.В., Серебренников А.Д. Исследование  
возможностей использования управляемого демпфера сухого трения в конструкции  
механизма виброзащиты для транспортных платформ.....

76

Марахин Н.А. Поля давления и грузоподъемность радиально-упорных подшипников  
жидкостного трения с многоклиновой конической поверхностью.....

82

Журавлев Д.Н. Учет зависимостей параметров модели изнашивания от переменной  
скорости вращения опорной пары типа «игла-подпятник».....

89

Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П. Об использовании функциональных  
возможностей сервоприводов с векторным управлением.....

96

**Приборы, биотехнические системы и технологии**

Булгатников Д.В., Подмастерьев К.В., Мишин В.В. Анализ современных систем  
электроснабжения и основные требования к бортовому напряжению постоянного  
тока для летательных аппаратов гражданского назначения.....

109

Котов Г.А., Веселов О.В. Контроль фаз движения стопы для управления приводами  
эзокоскелета нижних конечностей.....

122

Григорьян Л.Р., Богатов Н.М., Григорьян Р.Л., Сахно М.А. Структурные методы  
оптимизация схемотехники фазоизмерительной аппаратуры.....

127

Кузьменко В.П. Модель спектрального анализа для определения температуры Р-Н-  
перехода в бытовых светодиодах на основе нитрида галия.....

135

**Контроль, диагностика, испытания и управление качеством**

Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Модели и анализ погрешностей  
каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе  
ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.....

148

Шеглов Д.К. Модель компромиссного управления процессами импротозамещения при  
организации высокотехнологичного производства в условиях санкционных ограничений....

157

Незнанов А.И., Подмастерьев К.В., Суслов О.А. Исследование связи углов наклона,  
измеряемых на раме тележки грузового вагона, со значениями контролируемых  
вертикальных неровностей пути.....

167

Цаплев В.М., Коновалов Р.С., Коновалов С.И., Дементьев И.И., Юлдашев З.М. Сравнительный метод измерения электромеханических параметров полимерных  
пьезоэлектрических пленок.....

177

Сидорин В.В., Халилова Н.Б. Метод прогнозирования и управления проектом на  
основе байесовского анализа.....

186

Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Возможности использования метода  
координатного контроля для оценки качества изготовления зубчатых колес.....

197

<i>Editorial Committee</i>
<i>Editor-in-chief</i>
<b>Radchenko S.Yu.</b> Doc. Sc. Tech., Prof.
<i>Editor-in-chief Assistants:</i>
<b>Barsukov G.V.</b> Doc. Sc. Tech., Prof.
<b>Gordon V.A.</b> Doc. Sc. Tech., Prof.
<b>Podmasterov K.V.</b> Doc. Sc. Tech., Prof.
<b>Polyakov R.N.</b> Doc. Sc. Tech., Prof.
<b>Shorkin V.S.</b> Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.
<i>Member of editorial board:</i>
<b>Golenkov V.A.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Dunaev A.V.</b> Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)
<b>Dyakonov A.A.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Emelyanov S.G.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Zapomel Ya.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)
<b>Kirichek A.V.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Kuzichkin O.R.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Kukhar V.D.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Lavrynenko V.Yu.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Li Shengbo.</b> Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)
<b>Mirsalimov V.M.</b> Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Azerbaijan)
<b>Pilipenko O.V.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Polyakov R.N.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Raspopov V.Ya.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Savin L.A.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Smolenzov V.P.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Soldatkin V.M.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Starovoitov A.I.</b> Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)
<b>Stepanov Yu.S.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
<b>Heifets M.I.</b> Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

*Responsible editor:*  
**Tyukhta A.V.** Candidate Sc. Tech.

*Address*  
302030, Oryol region, Oryol, st.  
Moskovskaya, 34  
+7 (905) 169 88 99  
<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>  
E-mail: radsu@rambler.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  
on the websites [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) and [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© Orel State University, 2025

The journal is indexed in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI), and also in international systems Chemical Abstracts and Google Scholar.

In accordance with the letter of the Higher Attestation Commission dated December 6, 2022 No. 02-1198 "On the List of Peer-Reviewed Scientific Publications", the journal Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, as a publication included in the international Chemical Abstracts database, is equated to publications of the K1 category.

## Contents

### Theoretical mechanics and its applications

Kononenko A.S., Notfullin I.F. Theoretical justification for increasing the sealing capacity of flanges by using sealants instead of traditional gaskets .....	3
--	---

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

Starovoitov E.I., Leonenko D.V. Circular sandwich plate in a temperature field under the action of a ring pulse.....	9
--	---

### Machine-building technologies and equipment

Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Y., Kostenko K.V. Optimization of spring stress-strain state mathematical model during contact hardening.....	19
Mishchenko E.V., Asonov D.G., Korol V.V. Causes of defects and problems in the production of FDM (FFF) 3D printing products.....	27
Karfidov A.O., Gorbatyuk S.M., Ibragimova A.A. Overview of modern methods of corrosion protection by galvanizing.....	34
Semenov I.E., Reznyuk K.D. The experimental research of mechanical properties of composite elastic tool based on polyurethane for sheet forming.....	46
Kozhus O.G., Barsukov G.V., Frolenova L.U., Petrukhin A.V., Shlyupkin P.I. Regularities of interaction of an abrasive particle with the channel of the focusing tube of the nozzle of a water-abrasive machine when introducing a surfactant.....	52
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Parameter optimization of technological process while manufacturing of products with second order surfaces.....	62

### Machine Science and Mechatronics

Bondarenko M.E., Gorin A.V., Kochetkov E.V., Serebrennikov A.D., Bondarenko K.V. Study of vibration effect of a system with an inertial damper on bearing units.....	69
Kozyrev D.L., Polyakov R.N., Gorin A.V., Serebrennikov A.D. Research of the possibilities of using a controlled dry friction damper in the design of a vibration protection mechanism for transport platforms.....	76
Marakhin N.A. Pressure fields and load-carrying capacity of thrust-radial hydrodynamic bearings with a multi-wedge conical surface .....	82
Zhuravlev D.N. Wear model parameters dependences consideration on the pivot-jewel bearing variable rotation speed.....	89
Evsikov A.A., Kokovin V.A., Leonov A.P. On the use of the functional capabilities vector control servo drives.....	96

### Devices, biotechnical systems and technologies

Bulatnikov D.V., Podmasterov K.V., Mishin V.V. Analysis of modern power supply systems and basic requirements to on-board DC voltage for civil aircraft.....	109
Veselov O.V., Kotov G.A. A method for diagnosing human gait in an exoskeleton of the lower extremities .....	122
Grigoryan L.R., Bogatov N.M., Grigoryan R.L., Sakhno M.A. Structural methods of optimization of circuit technique of phase-measuring equipment.....	127
Kuzmenko V.P. Spectral analysis model for determining p-n junction temperature in gallium-based LEDs .....	135

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Efremova E.S., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Models and error analysis of channels of the information and measurement system of air signals based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming flow .....	148
Shcheglov D.K. A model of compromise management of import substitution processes in organizing high-tech production under conditions of sanction restrictions .....	157
Neznanov A.I., Podmasterov K.V., Suslov O.A. Study of the relationship between inclination angles measured on the frame of a freight wagon bogie and the values of controlled vertical irregularities of the railway .....	167
Tsaplev V.M., Konovalov R.S., Konovalov S.I., Dementev I.I., Yuldashev Z.M. Comparative method of measuring electromechanical parameters of polymer piezoelectric films .....	177
Sidorin V.V., Khalilulina N.B. The method of forecasting and project management based on bayesian analysis .....	186
Ushakov M.V., Vorobiev I.A., Nikolsky S.M. Possibilities of using the method of coordinate control for estimation of quality of manufacturing of gear wheels .....	197

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 621.643.412

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-3-8

КОНОНЕНКО А.С., НОТФУЛЛИН И.Ф.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ  
ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФЛАНЦЕВ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕРМЕТИКОВ ВМЕСТО  
ТРАДИЦИОННЫХ ПРОКЛАДОК**

**Аннотация.** Теоретически обоснован процесс уплотнения фланцевых соединений с помощью герметиков, рассчитано изменение геометрических параметров болтов, фланцев и уплотнителя при сборке и работе фланцевого соединения, определено влияние упругих свойств герметика, его коэффициента трения и адгезии к поверхности фланцев, на герметичность фланцевых соединений.

**Ключевые слова:** Герметизирующая способность, адгезия, фланцевое соединение, технологическая среда, уплотнитель, контактное давление.

**Введение**

Герметизация фланцевых соединений в машиностроении является важной задачей для обеспечения надежной и безопасной работы различных систем и механизмов. В частности, в автомобилестроении, в таких агрегатах, как коробка передач, задний мост, раздаточная коробка, а также в системах охлаждения, питания и смазки двигателя, герметизация играет важнейшую роль. Нарушение герметичности во фланцевых соединениях может привести к утечкам, авариям, выходу из строя оборудования и негативному влиянию на экологическую среду. В ряде случаев герметичность фланцев обеспечивается без каких-либо уплотнителей созданием высокого контактного давления на их поверхности. Однако для этого необходимо обеспечить высокие значения жесткости и металлоемкости фланцев, а также качества их контактирующих поверхностей. Полное предотвращение утечек герметизируемых сред обеспечивается применением промежуточных уплотнительных элементов с невысоким модулем упругости.

Для уплотнения фланцевых соединений в машиностроении до недавнего времени использовались прокладки из традиционных материалов, таких как резина, паронит, картон, асбест, фторопласт. К сожалению, данные материалы не всегда обеспечивают требуемую герметичность из-за недостаточной затяжки резьбовых соединений и невысокого качества соединяемых поверхностей. Перспективным направлением в области уплотнения фланцевых соединений является применение герметиков, которые полностью заполняют все микронеровности уплотняемых поверхностей фланцев, обеспечивают качество их сборки, обладают высокой стойкостью к герметизируемым средам, не требуют высокой жесткости узлов и позволяют расширить допустимый диапазон геометрических параметров и качества сопрягаемых поверхностей [1, 2].

**Основная часть**

Рассмотрим механизм уплотнения фланцевых соединений с помощью герметика. Поверхности фланцев сближаются за счет контактного давления  $p_k$ , возникающего на их поверхности вследствие действия усилия обжатия  $P_{обж}$ , Н:

$$P_{обж} = P_B n, \quad (1)$$

где  $P_B$  – нагрузка на болт, Н;

$n$  – число болтов, шт.

В соответствии с ГОСТ Р 52857.4 расчетная нагрузка на болты при сборке фланцевых соединений,  $P_B^M$ , Н, определяется из выражения:

$$P_B^M = \max(P_{B1}; P_{B2}) \dots \quad (2)$$

где  $P_{Б1}$  – расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на уплотнитель, достаточного для герметизации фланцевого соединения, Н;

$P_{Б2}$  – расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия уплотнителя и минимального начального натяжения болтов (приблизительно равна усилию обжатия уплотнителя), Н.

Учитывая тот факт, что внешний изгибающий момент во фланцевых соединениях автомобильной техники практически равен нулю, значение расчетной нагрузки  $P_{Б1}$  можно определить из выражения:

$$P_{Б1} = \max \left[ \frac{l'(Q_{Д} + F) + R_{П};}{l'(Q_{Д} + F) + R_{П} - Q_{T}}, \right] \quad (3)$$

где  $l'$  – плечо усилий в болтах (шпильках), мм;

$Q_{Д}$  – равнодействующая нагрузка от давления рабочей среды, Н;

$F$  – внешняя осевая сила (сжимающая сила принимается со знаком минус, растягивающая сила – со знаком плюс), Н;

$R_{П}$  – усилие на уплотнителе в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения, Н;

$Q_{T}$  – нагрузка, вызванная температурными деформациями, Н;

При эксплуатации герметизируемых узлов рабочая нагрузка на болты фланцевых соединений без учета внешнего изгибающего момента ( $P_{Б}^P$ , Н) определяется согласно выражению:

$$P_{Б}^P = P_{Б}^M + (1 - l')(Q_{Д} + F) + Q_{T}, \quad (4)$$

Расчетные напряжения в болтах при затяжке ( $\sigma_{Б1}$ ) и в рабочих условиях ( $\sigma_{Б2}$ ) соответственно вычисляют по формулам:

$$\sigma_{Б1} = \frac{P_{Б}^M}{A_{Б}}, \quad \sigma_{Б2} = \frac{P_{Б}^P}{A_{Б}}, \quad (5)$$

где  $A_{Б}$  – суммарная площадь сечения болтов,  $\text{мм}^2$ ;

Эти расчетные значения напряжений должны быть меньше допускаемых и зависят от материала и температуры эксплуатации фланцевых соединений [3].

Усилие болтов создает среднее контактное давление  $p_{K_0}$ . Число болтов ( $n$ ) для обеспечения более равномерной затяжки стыка должно быть кратно четырем (4, 8, 12, 16). Расстояние между осями болтов больших давлениях,  $P \geq 3 \text{ МПа}$ , принимают  $a = (2,5 \dots 4) \cdot d$ , а при малых давлениях,  $P < 3 \text{ МПа}$ ,  $-a = (5 \dots 7) \cdot d$ , где  $d$  – диаметр болта, мм [4, 5].

Среднее контактное давление  $q_0$ , МПа:

$$q_0 = \frac{P_{\text{обж}}}{S}, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь поверхности фланцев,  $\text{мм}^2$ .

Относительная деформация сжатия уплотнителя:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_0}{h}, \quad (7)$$

где  $h$  – толщина уплотнителя, мм;

$\Delta h_0$  – абсолютная деформация уплотнителя, мм.

Верхний и нижний пределы относительной деформации сжатия уплотнителя в соответствии с ГОСТ 9.029 составляют от 15 до 35 %. Их выбирают с учетом продолжительности работы уплотнителя [6].

При нагружении фланцевого соединения давлением герметизируемой среды возникает отжимающая сила

$$P_{\text{от}} = P S_A, \quad (8)$$

где  $P$  – давление герметизируемой среды, МПа;

$S_A$  – площадь, на которую действует давление герметизируемой среды,  $\text{мм}^2$ .

В результате действия отжимающей силы происходит удлинение болтов и снижение контактного давления до  $p_{K\Phi}$ . При этом относительная деформация сжатия уплотнителя уменьшается до  $\varepsilon_0$ .

Из условия совместимости начальной и дополнительной деформаций болтов  $\Delta l_B(\Delta l'_B)$ , фланцев  $\Delta l_\Phi(\Delta l'_\Phi)$  и уплотнителя  $\Delta h_{\text{уп}}(\Delta h'_{\text{уп}})$  следует, что

$$q = q_0 - \omega P \frac{S_A}{S}, \quad (9)$$

где  $\omega$  – относительная податливость [7].

$$\omega = \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \lambda_\Phi + \lambda_{\text{уп}}}, \quad (10)$$

где  $\lambda_B$ ,  $\lambda_\Phi$ , и  $\lambda_{\text{уп}}$  – податливости соответственно болтов, фланцев и уплотнителя, мм/Н.

$$\lambda_B = \frac{l_B}{E_B S_B}, \quad (11)$$

где  $l_B$  – эффективная длина болта, мм;

$E_B$  – модуль продольной упругости болта при комнатной температуре, МПа;

$S_B$  – площадь поперечного сечения стержня болта,  $\text{мм}^2$ .

Эффективная длина болта ( $l_B$ ) или шпильки ( $l_\text{Ш}$ ) вычисляются соответственно по формулам [5]:

$$l_B = l_{B_0} + 0,28d, \quad (12)$$

$$l_\text{Ш} = l_{B_0} + 0,56d, \quad (13)$$

где  $l_{B_0}$  – расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек, мм;

$d$  – наружный диаметр болта, мм;

$$\lambda_\Phi = \frac{l_\Phi}{E_\Phi S_\Phi}, \quad (14)$$

где  $l_\Phi$  – высота фланца, мм;

$E_\Phi$  – модуль упругости материала фланцев, МПа;

$S_\Phi$  – площадь поверхности фланцев,  $\text{мм}^2$ .

В соответствии с ГОСТ Р 52857.4:

$$\lambda_{\text{уп}} = \frac{h_{\text{уп}} K_{\text{обж}}}{E_{\text{уп}} \pi D_{\text{уп}} b_{\text{уп}}}, \quad (15)$$

где  $h_{\text{уп}}$  – толщина уплотнителя, мм;

$K_{\text{обж}} = 0,09 \dots 1,0$  – коэффициент обжатия уплотнителя;

$E_{\text{уп}}$  – модуль упругости материала уплотнителя, МПа;

$D_{\text{уп}} = D_{\text{Н}} - b_0$  – расчетный диаметр уплотнителя, мм;

$D_{\text{Н}}$  – наружный диаметр уплотнителя, мм;

$b_0 = b_{\text{уп}}$  при  $b_{\text{уп}} \leq 15$  мм;  $b_0 = 3,8\sqrt{b_{\text{уп}}}$  при  $b_{\text{уп}} > 15$  мм – эффективная ширина уплотнителя, м;

$b_{\text{уп}}$  – ширина уплотнителя, мм.

Абсолютное изменение размеров болтов, фланцев и уплотнителя во фланцевом соединении, согласно [7] составит:

$$\Delta l_B = \lambda_B P_B, \quad (16)$$

$$\Delta l_\Phi = \lambda_\Phi p_{K_0} S_\Phi, \quad (17)$$

$$\Delta h_{\text{уп}} = \lambda_{\text{уп}} p_{K_0} S_{\text{уп}}. \quad (18)$$

Подставив выражения (16), (17) и (18) соответственно в (12), (14) и (15), получим уравнения для определения величины затяжки болтовых соединений ( $P_B$ ) и контактного давления на поверхности фланцев ( $p_{K_0\Phi}$ ) и уплотнителя ( $p_{K_0\text{уп}}$ ):

$$P_B = \frac{E_B S_B \Delta l_B}{l_B}, \quad p_{K_0\Phi} = \frac{E_\Phi \Delta l_\Phi}{l_\Phi}, \quad p_{K_0\text{уп}} = \frac{E_{\text{уп}} \Delta l_{\text{уп}}}{h_{\text{уп}}}. \quad (19)$$

Полученные уравнения (19) еще раз подтверждают, что величины затяжки болтовых соединений и контактного давления на поверхности фланцев и уплотнителя прямо пропорционально зависят от модулей упругости материалов, и обратно пропорционально – от размеров болтов, фланцев и уплотнителей. Поэтому, для герметизации фланцев следует использовать слой герметика с минимальной толщиной.

Вследствие значительных трудностей, возникающих при расчете деформаций составных элементов фланцевых соединений, на практике принимают табличное значение относительной податливости, экспериментальное значение которой для мягких материалов составляет  $\omega = 0,9$  и для стали –  $\omega = 1,0$ .

Уплотнитель выбирают из условий совместимости с рабочей средой. Обычно ширину фланца выбирают равной  $(0,06 \dots 0,10)D_1$  ( $D_1$  – внутренний диаметр фланца, м). Толщину традиционных прокладок для открытых фланцев принимают равной 10...20 % от ее ширины.

Уплотнитель во фланцевом соединении обжимается силой [8]:

$$P_{\text{обж}} = 0,5\pi D_{\text{уп}} b_0 q_0. \quad (20)$$

При этом его толщина уменьшится до  $h_0$ :

$$h_0 = (1 - \varepsilon_0)h, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_0 = q_0 / (E_{\text{уп}} + q_0)$  – деформация сжатия уплотнителя.

При увеличении давления рабочей среды до критического значения ( $P = P_{\text{кр}}$ ), в результате удлинения болтов под действием силы  $P_{\text{от}}$ , уменьшения контактного давления до допустимого ( $p_{\text{к}} = p_{\text{к},\text{min}}$ ) и уменьшения деформации сжатия уплотнителя до критического значения ( $\varepsilon = \varepsilon_{\text{кр}}$ ), в случае отсутствия адгезии уплотнителя к фланцу, происходит раскрытие микроканалов и наступает разгерметизация фланцевого соединения:

$$P_{\text{кр}} = \frac{E_{\text{уп}} S_{\text{уп}}}{S_{\text{бок}}} \left( \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_{\text{кр}}}{1 - \varepsilon_{\text{кр}}} \right), \quad (22)$$

где  $S_{\text{бок}}$  – площадь боковой поверхности, на которую действует давление рабочей среды,  $\text{м}^2$ .

Обычно деформация сжатия уплотнителя  $\varepsilon_0 = 0,25 \dots 0,35$ . Критическое значение деформации уплотнителя в случае отсутствия его адгезии к материалу фланца  $\varepsilon_{\text{кр}} = 0,02 \dots 0,03$  [9].

Выдавливанию прокладки давлением рабочей среды из зазора между фланцами препятствует сила трения  $P_f = 2fP_A$ . При этом давление среды в начале выдавливания уплотнителя будет рассчитываться по уравнению:

$$p_{\text{выд}} = \frac{2fP_A}{\pi D_{\text{вн}}(1 - \varepsilon_{\text{кр}})h}, \quad (23)$$

где  $P_A$  – сила сжатия прокладки, Н;

$f$  – коэффициент трения;

$D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр прокладки, мм.

Коэффициент трения полимерных материалов имеет двойственную молекулярно-механическую природу и включает составляющие, обусловленные потерями на преодоление межмолекулярных связей и потерями при деформировании и даже разрушении поверхностей микронеровностей [10].

В работах [10, 11, 12] отмечено, что коэффициент трения  $f$  полимерных материалов включает адгезионную  $f_{\text{адг}}$  и гистерезисную  $f_{\text{гист}}$  составляющие:

$$f = f_{\text{адг}} + f_{\text{гист}}. \quad (24)$$

Адгезионная составляющая:

$$f_{\text{адг}} = k_{\text{тр}} \frac{E'}{q^r} \operatorname{tg} \delta, \quad (25)$$

где  $k_{\text{тр}}$  – константа, зависящая от условий трения;

$E'$  – динамический модуль упругости (отношение компоненты напряжения к компоненте деформации);

$q$  – контактное давление, МПа;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла механических потерь.

$r$  – показатель степени.

Гистерезисная составляющая

$$f_{\text{гист}} = k_{\Gamma} \left( \frac{q}{E'} \right)^n \operatorname{tg} \delta, \quad (26)$$

где  $k_{\Gamma}$  – константа, зависящая от материала уплотнителя;

$n$  – показатель степени.

Результирующее выражение для коэффициента трения будет иметь вид:

$$f = \left[ k_{\Gamma} \left( \frac{q}{E} \right)^n + k_{\text{TP}} \frac{E'}{q r} \right] \operatorname{tg} \delta. \quad (27)$$

В связи с тем, что герметики обладают гораздо большей адгезией к поверхности фланцев, чем традиционные уплотнители, для расчета силы трения герметиков к поверхности фланцев учтем адгезионную составляющую ( $A$ ) в виде отдельного компонента в уравнении [7, 8]:

$$P_f = A + f P_A, \quad (28)$$

Эту составляющую наиболее корректно определять по удельной работе адгезионного разрушения склейки из выражения [9]:

$$A = \psi(S, nt_i, U_i), \quad (29)$$

где  $S$  – площадь поверхности контакта,  $\text{мм}^2$ ;

$nt_i$  – число связей  $i$ -го типа на единицу поверхности, установившееся ко времени начала разрушения;

$U_i$  – энергия одной адгезионной связи  $i$ -го типа, Дж.

Теоретический расчет показал, что герметизирующая способность фланцевого соединения с герметиком, используемым в качестве промежуточного элемента, за счет адгезионной составляющей имеет большие значения, чем при использовании прокладок из традиционных материалов.

### Заключение

Герметичность фланцевых соединений с уплотнителями из герметиков выше, чем с прокладками из традиционных материалов за счет их адгезии к поверхности фланцев. Герметизирующая способность уплотнителей из герметиков прямо пропорционально зависит от деформационных свойств, модуля упругости, ширины, силы сжатия, коэффициента трения, адгезии герметиков к поверхностям фланцев и обратно пропорционально – от их геометрических параметров. При герметизации фланцев следует использовать слой герметика с минимальной толщиной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность технических систем. Курсовое проектирование / Е. А. Пучин, А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев [и др.]. – Орел : Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парадина, 2012. – 96 с.
2. Кононенко, А. С. Технологические процессы реновации машин и оборудования полимерными материалами : Учебно-методическое пособие / А. С. Кононенко. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 48 с.
3. Надежность технических систем / Е.А. Пучин, Е.А. Лисунов, А.В. Чепурин, И.Н. Кравченко и др. – М.: Издательство КолосС, 2010. – 318 с.
4. Кононенко, А. С. Герметизация неподвижных фланцевых соединений анаэробными герметиками при ремонте сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кононенко Александр Сергеевич. – Москва, 2001. – 156 с.
5. Детали машин и основы конструирования: учебник / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, А.В. Карп [и др.]. – М.: КолосС, 2011. – 512 с.
6. Тагер, А.А. Физикохимия полимеров [Текст] / А.А. Тагер. – М.: Химия. – 1978. – 544 с.
7. Голубев, Г.В. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Г.В. Голубев, Л.М. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
8. Водяков, В.Н. Математическое моделирование процессов формования и нагружения эластомерных уплотнителей автотракторной техники / В.Н. Водяков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 216 с.
9. Кононенко, А. С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кононенко Александр Сергеевич. – Москва, 2012. – 34 с.
10. Тэйбор, Д. Трение как диссипативный процесс / Д. Тэйбор // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 2. – С. 296–315.
11. Забодалова Л.А., Белозерова М.С. Инженерная реология: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016 – 41 с.
12. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.

**Кононенко Александр Сергеевич**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Технологии обработки материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел.: 8 (926) 147-17-50  
E-mail: as-kononenko@yandex.ru

**Нотфуллин Ильдар Фаридович**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
аспирант кафедры «Технологии обработки  
материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел.: 8 (919) 631-27-13  
E-mail: Ildarnot@mail.ru

KONONENKO A.S., NOTFULLIN I.F.

## THEORETICAL JUSTIFICATION FOR INCREASING THE SEALING CAPACITY OF FLANGES BY USING SEALANTS INSTEAD OF TRADITIONAL GASKETS

**Abstract.** The process of sealing flange connections using sealants is theoretically substantiated, the change in the geometric parameters of bolts, flanges and sealer during assembly and operation of the flange connection is calculated, the influence of the elastic properties of the sealant, its coefficient of friction and adhesion to the surface of the flanges, on the tightness of the flange connections is determined.

**Keywords:** Sealing ability, adhesion, flange connection, process medium, sealer, contact pressure.

### BIBLIOGRAPHY

1. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem. Kursovoe proektirovaniye [Reliability of technical systems. Course design] / E. A. Puchin, A. V. Kolomejchenko, V. N. Logachev [i dr.]. – Orel : Orlovskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni N.V. Parakhina, 2012. – 96 p.
2. Kononenko, A. S. Tekhnologicheskie processy renovacii mashin i oborudovaniya polimernymi materialami : Uchebno-metodicheskoe posobie / A. S. Kononenko. – Moskva : Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2022. – 48 p.
3. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems] / E.A. Puchin, E.A. Lisunov, A.V. Chepurin, I.N. Kravchenko and others - M.: KolosS Publishing House, 2010. - 318 p.
4. Kononenko, A. S. Germetizaciya nepodvizhnykh flancevykh soedinenij anaerobnymi germetikami pri remonte selskokhozyajstvennoj tekhniki : specialnost 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v selskom khozyajstve" [Sealing of fixed flange connections with anaerobic sealants in the repair of agricultural machinery : specialty 05.20.03 "Technologies and maintenance tools in agriculture"] : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Kononenko Aleksandr Sergeevich. – Moskva, 2001. – 156 p.
5. Detali mashin i osnovy konstruirovaniya: uchebnik / M.N. Erokhin, S.P. Kazancev, A.V. Karp [i dr.]. – M.: KoloSS, 2011. – 512 p.
6. Tager, A.A. Fizikokhimiya polimerov / A.A. Tager. – M.: Khimiya. – 1978. – 544 p.
7. Golubev, G.V. Uplotneniya i uplotnitelnaya tekhnika: spravochnik [Seals and sealing equipment: reference] / G.V. Golubev, L.M. Kondakov. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 464 p.
8. Vodyakov, V.N. Matematicheskoe modelirovaniye processov formovaniya i nagruzheniya ehlastomernykh uplotnitelej avtotraktornoj tekhniki / V.N. Vodyakov. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2005. – 216 p.
9. Kononenko, A. S. Povyshenie nadezhnosti nepodvizhnykh flancevykh soedinenij selskokhozyajstvennoj tekhniki ispolzovaniem nanostrukturirovannykh germetikov : specialnost 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v selskom khozyajstve" [improving the reliability of fixed flange connections of agricultural machinery using nanostructured sealants : specialty 05.20.03 "Technologies and maintenance tools in agriculture"] : avtoreferat dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Kononenko Aleksandr Sergeevich. – Moskva, 2012. – 34 p.
10. Tehjbor, D. Trenie kak dissipativnyj process [Tekst] / D. Tehjbor // Trenie i iznos. – 1994. – T. 15, № 2. – P. 296–315.
11. Zabodalova L.A., Belozerova M.S. Inzhenernaya reologiya: Ucheb.-metod. posobie. – SPb.: Universitet ITMO, 2016 – 41 p.
12. Kondakov, L.A. Rabochie zhidkosti i uplotneniya gidravlicheskih sistem [Working fluids and seals of hydraulic systems] / L.A. Kondakov. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 216 p.

**Kononenko Alexander Sergeevich**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
Doctor of Science, Docent, Professor of «Materials Processing Technologies» department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (926) 147-17-50  
E-mail: as-kononenko@yandex.ru

**Notfullin Ildar Faridovich**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
Postgraduate student of «Materials Processing Technologies» department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (919) 631-27-13  
E-mail: Ildarnot@mail.ru

# **МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ**

УДК 539.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-9-18

СТАРОВОЙТОВ Э.И., ЛЕОНЕНКО Д.В.

## **КРУГОВАЯ СЭНДВИЧ-ПЛАСТИНА В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОЛЬЦЕВОГО ИМПУЛЬСА**

**Аннотация.** Исследованы колебания круговой симметричной по толщине трехслойной сэндвич-пластини под действием импульсной осесимметричной нагрузки, равномерно распределенной по кольцу. Кинематика пакета соответствует гипотезе ломаной линии. Внешние слои несущие, тонкие, высокопрочные, они деформируются согласно гипотезам Кирхгофа. Заполнитель легкий, несжимаемый по толщине. Для него справедлива гипотеза Тимошенко. Для рассматриваемой сэндвич-пластини общая система дифференциальных уравнений поперечных изотермических колебаний трехслойной пластины упрощается. В ней остается два уравнения относительно искомых функций – прогиба пластины и дополнительного сдвига в заполнителе. От температуры зависят упругие свойства материалов слоев, в явном виде она в уравнения колебаний не входит. Решение поставленной начально-краевой задачи выписано в виде разложения искомых перемещений в ряд по системе собственных ортонормированных функций. Уравнения для вычисления собственных чисел приведены в случае заделанного и шарнирно опертого контуров пластины. Приведены расчетные формулы для прогиба и относительного сдвига. Проведен численный анализ решения для пластины с шарнирно опертым контуром.

**Keywords:** круговая сэндвич-пластина, кольцевой импульс, температура, аналитическое решение, численные результаты.

### **Введение**

Исследование деформирования композитных элементов конструкций в тепловых полях является актуальной проблемой в связи с их повсеместным использованием в технике и строительстве. Это вызывает необходимость разработки соответствующих методик расчета напряженно-деформированного состояния (НДС). Эта проблема рассматривалась в многочисленных публикациях. Монография [1] посвящена связанным и несвязанным задачам термоупругости для композитных элементов конструкций. Исследуются статические и динамические напряжения, термическая потеря устойчивости и эффекты при флаттере композитных панелей. В обзорной работе [2] изложена суть асимптотического метода решения сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений и методика применения этого метода для решения задач статики и динамики элементов конструкций. В монографиях [3–7] приведены механико-математические модели для исследования НДС слоистых элементов конструкций при комплексном воздействии квазистатических силовых и температурных полей. Статья [8] посвящена разработке последовательной теории тонких анизотропных слоистых структур, основанной на асимптотическом анализе трехмерных уравнений линейной упругости.

Собственные и вынужденные колебания неоднородных цилиндрических оболочек описаны в статьях [9–14]. Исследован частотный спектр, рассмотрены локальные и резонансные силовые воздействия, предложена геометрически нелинейная теория трехслойных оболочек. Нестационарные нагрузжения тонкостенных элементов конструкций исследованы в статьях [15, 16]. Моногармоническое акустическое воздействие на слоистую пластину и моделирование динамической реакции пластины, армированной углеродным волокном, при собственных и резонансных колебаниях рассмотрено в публикациях [17, 18]. Здесь представлена дискретно-слоистая модель демпфирования колебаний в многослойной пластине на базе модели внутреннего демпфирования типа Томпсона–Кельвина–Фойгта. Получено аналитическое решение задачи статического деформирования однослойной прямоугольной пластины, шарнирно опертой по контуру и находящейся под действием равномерно распределенного давления, приложенного к одной из ее граничных плоскостей.

Установлено, что для тонких пластин размерность формулируемой задачи может быть уменьшена на основе упрощенных гипотез, применяемых к каждому слою.

Рассеяние упругих волн в сильно неоднородной трехслойной пластине рассмотрено в [19]. Собственные и вынужденные колебание балки на упругом основании при внезапном трещинообразовании исследованы в статьях [20, 21]. Локальные и импульсные динамические воздействия на трехслойные и пятислойные круговые пластины и стержни исследованы в [22–24]. Колебания трехслойных пластин со штампом с учетом гидроупругого при наличии взаимодействия со слоем вязкой жидкости, анализируются в статье [25]. Динамические нагрузжения трехслойных элементов конструкций, взаимодействующих с упругими основаниями Винклера и Пастернака, изучены в [26–30]. Решения построены в виде разложения в ряд по системам собственных ортонормированных функций.

НДС трехслойных стержней и пластин при однократных и переменных нагрузжениях в температурном поле исследовано в статьях [31–36]. Описание нелинейного деформирования материалов проведено в рамках деформационной теории пластичности.

Здесь исследованы поперечные колебания круговой сэндвич-пластины, вызванные кольцевой импульсной нагрузкой, при учете воздействия температуры окружающей среды.

### 1. Постановка задачи

Поперечные колебания сэндвич-пластины рассматриваются в цилиндрической системе координат (рисунок 1). Она связана со срединной плоскостью заполнителя. Кинематические гипотезы отвечают модели ломаной линии: несущие слои тонкие и высокопрочные ( $h_1 = h_2 = h$ ), подчиняются гипотезам Кирхгофа; относительно толстый легкий заполнитель ( $h_3 = 2c \gg h$ ) – гипотезе Тимошенко, в соответствии с которой учитывается дополнительный угол поворота нормали  $\psi(r)$  (относительный сдвиг). Напряжения и деформации в слоях связаны законом Гука с учетом температуры окружающей среды:

$$\begin{aligned} s_{\alpha}^{(k)} &= 2G_k \vartheta_{\alpha}^{(k)}, \quad s_{rz}^{(3)} = 2G_k \vartheta_{rz}^{(3)}, \quad (\alpha = r, \varphi), \\ \sigma^{(k)} &= 3K_k (\varepsilon^{(k)} - \alpha_{0k} T), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $s_{\alpha}^{(k)}, s_{rz}^{(3)}, (\vartheta_{\alpha}^{(k)}, \vartheta_{rz}^{(3)})$  – девиаторы тензоров напряжений (деформаций), Па, (б/п);

$\sigma^{(k)}, (\varepsilon^{(k)})$  – среднее напряжение (деформация), Па, (б/п);

$G_k(T)$ ,  $K_k(T)$  – модули упругости, одинаковые в несущих слоях  $G_1 = G_2 = G$ ,  $K_1 = K_2 = K$ , Па;

$T$  – усредненная по толщине пластины температура, К;

$\alpha_{0k}$  – коэффициент линейного температурного расширения материала, К<sup>-1</sup>;

$k = (1, 2, 3)$  – здесь и далее номер слоя (без суммирования по повторяющемуся индексу).

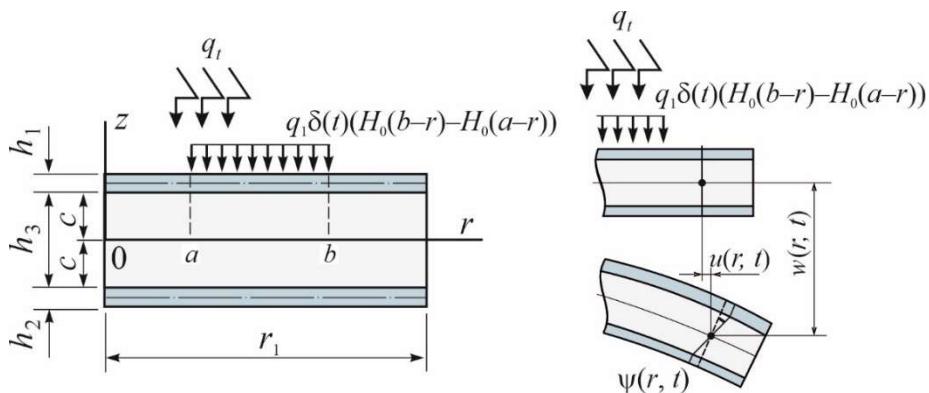


Рисунок 1 – Схема локального импульсного воздействия на сэндвич-пластину

Пусть в начальный момент на внешнюю поверхность сэндвич-пластины действует мгновенный силовой импульс  $q(t)$ , равномерно распределенный внутри круга  $a \leq r \leq b$ :

$$q(r, t) = q_1 \delta(t) (H_0(b-r) - H_0(a-r)), \quad (2)$$

где  $q_1 = \text{const}$ ,  $\Pi \cdot \text{с}$ ,

$\delta(t)$  – дельта-функция Дирака.

Общая система уравнения вынужденных изотермических колебаний трехслойной круговой пластины несимметричной по толщине без учета воздействия температурного поля приведена в [3]. Она формально справедлива и здесь с учетом зависимости упругих постоянных от температуры. Для рассматриваемой пластины система упрощается и сводится к двум дифференциальным уравнениям. В правой части второго из них появится импульсная нагрузка (2):

$$\begin{aligned} L_2(a_4 \psi - a_5 w_r) &= 0, \\ L_3(a_5 \psi - a_6 w_r) - M_0 \ddot{w} &= q_1 \delta(t) (H_0(b-r) - H_0(a-r)), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $w(r, t)$ ,  $\psi(r, t)$  – искомые прогиб и относительный сдвиг, м, рад;

$M_0 \ddot{w}$  – поперечные силы инерции;

$M_0 = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3) r_1^2$  – массовый коэффициент,

$\rho_k$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

точка вверху обозначает производную по времени;

запятая в нижнем индексе – дифференцирование по радиальной координате;

термозависимые коэффициенты  $a_i$  и дифференциальные операторы  $L_2$ ,  $L_3$

$$\begin{aligned} a_4 &= c^2 \left( 2hK^+ + \frac{2}{3}cK_3^+ \right), \quad a_5 = c \left[ 2h \left( c + \frac{1}{2}h \right) K^+ + \frac{2}{3}c^2 K_3^+ \right], \\ a_6 &= 2h \left( c^2 + ch + \frac{1}{3}h \right) K^+ + \frac{2}{3}c^3 K_3^+, \quad K^+ = K + \frac{4}{3}G, \quad K_3^+ = K_3 + \frac{4}{3}G_3, \\ L_2(g) &\equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}, \quad L_3(g) \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}. \end{aligned}$$

Температурная зависимость упругих характеристик материалов описывается формулой, предложенной Беллом [3]:

$$\begin{aligned} \{G(T), K(T)\} &= \{G(0), K(0)\} \varphi(T), \\ \varphi(T) &= \begin{cases} 1, & 0 < \frac{T}{T_m} \leq 0,06, \\ 1,03(1 - \frac{T}{2T_m}), & 0,06 < \frac{T}{T_m} \leq 0,57, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $T_m$  – температура плавления, К;

$G(0) = G_0 / \varphi(T_0)$ ,  $K(0) = K_0 / \varphi(T_0)$ ,

$G_0$ ,  $K_0$  – значения модулей при температуре  $T_0$ , Па.

Предполагается, что слои на контуре пластины связаны жесткой диафрагмой, не допускающей относительный сдвиг  $\psi(r_1, t) = 0$ . Искомые функции при жесткой заделке контура должны удовлетворять требованиям

$$\psi(r_1, t) = w(r_1, t) = w_r(r_1, t) = 0. \quad (5)$$

При шарнирном опирании условия следующие

$$\psi(r_1, t) = w(r_1, t) = 0, \quad M_r(r_1, t) = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k}^{h_k} \sigma_r^{(k)} z dz = 0, \quad (6)$$

где  $M_r$  – обобщенный радиальный изгибающий момент

$$\begin{aligned} M_r &= a_5 \psi_{,r} - a_6 w_{,rr} - a_{60} \frac{w_{,r}}{r_1}, \\ a_{60} &= 2hK^- \left( c^2 + ch + \frac{1}{3}h^2 \right) + \frac{2}{3}c^3 K_3^-, \quad K^- = K + \frac{4}{3}G, \quad K_3^- = K_3 - \frac{2}{3}G_3. \end{aligned}$$

Начальные прогиб и скорость пластины отсутствуют:

$$w(r, 0) = 0, \quad \dot{w}(r, 0) = 0. \quad (7)$$

Следовательно, прогиб  $w(r, t)$  и относительный сдвиг  $\psi(r, t)$  в сэндвич-пластине при кольцевом импульсе в температурном поле полны удовлетворять уравнениям движения (3), граничным и начальным условиям (5–7).

## 2. Решение начально-краевой задачи

Система (3) после элементарных преобразований приводится к виду

$$\psi = \frac{a_5}{a_4} w_{,r} + C_3 r + \frac{C_4}{r},$$

$$L_3(w_{,r}) + M^4 \ddot{w} = q_1 \delta(t) (H_0(b-r) - H_0(a-r)), \quad (8)$$

$$\text{где } M^4 = \frac{a_4}{a_6 a_4 - a_5^2} M_0.$$

В (8) необходимо положить константу интегрирования  $C_4 = 0$ , т.к. относительный сдвиг  $\psi(r, t)$  ограничен в центре пластины. Подставив первое уравнение (8) в граничные условия (6), выразим оставшуюся константу интегрирования через значение производной от прогиба на контуре:

$$C_3 = -\frac{a_5}{a_4 r_1} w_{,r}(r_1, t).$$

Искомые функции и нагрузка раскладываются в ряд по системе собственных функций  $v_n \equiv v_n(\beta_n r)$ , полученной в [3] при изотермическом нагружении. В нашем случае имеем

$$\begin{aligned} \psi(r, t) &= \frac{a_5}{a_4} \sum_{n=0}^{\infty} (v_{,r} + C_3 r) T_n(t), \quad w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n T_n(t), \\ q(r, t) &= M_0 \sum_{n=0}^{\infty} v_n q_n(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } v_n(\beta_n r) \equiv \frac{1}{d_n} \left[ J_0(\beta_n r) - \frac{J_0(\beta_n r_1)}{I_0(\beta_n r_1)} I_0(\beta_n r) \right],$$

$T_n(t)$  – искомая функция времени;

$\beta_n$  – собственные числа;

$d_n$  – нормировочный коэффициент;

$J_0(\beta_n r)$ ,  $I_0(\beta_n r)$  – функции Бесселя нулевого порядка.

Коэффициенты  $q_n(t)$  разложения нагрузки (2) в ряд определяются формулой

$$q_n(t) = \frac{1}{M_0} \int_0^{r_1} q(r, t) v_n r dr.$$

После взятия интеграла имеем

$$q_n(t) = \frac{q_1 \delta(t)}{M_0 d_n \beta_n} \left( b J_1(\beta_n b) - a J_1(\beta_n a) - \frac{J_0(\beta_n r_1)}{I_0(\beta_n r_1)} (b I_1(\beta_n b) - a I_1(\beta_n a)) \right). \quad (10)$$

Собственные числа  $\beta_n$  при защемленном контуре являются корнями трансцендентного уравнения, следующего из требований для прогиба в (5):

$$I_1(\beta r_1) J_0(\beta r_1) + J_1(\beta r_1) I_0(\beta r_1) = 0. \quad (11)$$

При шарнирно опертом контуре аналогичное уравнение получим из условий (9):

$$\begin{aligned} J_0(\beta r_1) \left[ a_7 \left( \beta I_0(\beta r_1) - \frac{I_1(\beta r_1)}{r_1} \right) + \frac{a_8}{r_1} I_1(\beta r_1) \right] + \\ + I_0(\beta r_1) \left[ a_7 \left( \beta J_0(\beta r_1) - \frac{J_1(\beta r_1)}{r_1} \right) + \frac{a_8}{r_1} J_1(\beta r_1) \right] = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где коэффициенты  $a_7 = a_6 - a_5^2/a_4$ ,  $a_8 = a_{60} + a_5^2/a_4$ .

Функцию времени  $T_n(t)$ , входящую в решение (9), следует определять из второго дифференциального уравнения системы (8) после подстановки искомых функций (9), с учетом коэффициентов разложения нагрузки в ряд (10). Используя ортонормированность системы  $v_n$  получим

$$\ddot{T}_n(t) + \omega_n^2 T_n(t) = \frac{q_1 \delta(t)}{M_0 d_n \beta_n} \left( b J_1(\beta_n b) - a J_1(\beta_n a) - \frac{J_0(\beta_n r_1)}{I_0(\beta_n r_1)} (b I_1(\beta_n b) - a I_1(\beta_n a)) \right). \quad (13)$$

Решение уравнения (13) будет

$$T_n(t) = \frac{q_1 \sin(\omega_n t)}{M_0 d_n \beta_n \omega_n} \left( b J_1(\beta_n b) - a J_1(\beta_n a) - \frac{J_0(\beta_n r_1)}{I_0(\beta_n r_1)} (b I_1(\beta_n b) - a I_1(\beta_n a)) \right), \quad (14)$$

где  $\omega_n$  – частота собственных колебаний,  $\omega_n^2 = \beta_n^4 / M^4$ .

В частном случае при  $a = 0$ ,  $b = r_1$  из (14) следует решение при импульсной нагрузке, распределенной по всей верхней плоскости пластины.

Таким образом, поперечные колебания сэндвич-пластины, учитывающие влияние окружающей температуры на упругие характеристики материалов слоев, описываются выражениями (9) с функцией времени (14).

### 3. Численная апробация решения

Исследованы параметры колебаний рассматриваемой сэндвич-пластины несущие слои которой выполнены из дюралюминия, заполнитель – фторопласт-4, при этом упругие модули материалов  $K = 0,8 \cdot 10^5$  МПа,  $K_3 = 345$  МПа,  $G = 0,267 \cdot 10^5$  МПа,  $G_3 = 90$  МПа, толщины слоев, отнесенные к радиусу  $r_1 - h = 0,02$ ,  $h_3 = 0,05$ ;  $q_1 = 700$  Па·с, ширина кольца равномерно распределенной импульсной нагрузки  $b - a = 0,25$ . Все результаты получены при  $r_1 = 1$ .

Трансцендентное уравнение для собственных чисел при шарнирном опирании (12) численно исследовано для указанного пакета. Первые 10 корней, вычисленные с точностью до 0,0001, приведены в таблице 1. Их значения несколько ниже, чем при защемленном (11) контуре [3], что объясняется уменьшением жесткости пластины. С увеличением температуры на 200°C собственные числа изменяются незначительно.

Таблица 1 – Собственные числа (20° С / 220° С)

Номер $n$	Собственные числа $\beta_n$	Номер $n$	Собственные числа $\beta_n$
0	3,1429/3,1431	5	18,6115/18,6121
1	6,2067/6,207	6	21,7239/21,7246
2	9,2977/9,2981	7	24,8392/24,8399
3	12,3973/12,3979	8	27,9568/27,9575
4	15,5024/15,503	9	31,0766/31,0773

Соответствующие собственные частоты приведены в таблице 2. Здесь при повышенной температуре различия начинаются со второй значащей цифры.

Таблица 2 – Собственные частоты (20° С / 220° С)

Номер $n$	Собственные частоты $\omega_n$ , с <sup>-1</sup>	Номер $n$	Собственные частоты $\omega_n$ , с <sup>-1</sup>
0	265/247	5	9287/8659
1	1033/963	6	12653/11797
2	2318/2161	7	16542/15423
3	4121/3842	8	20955/19538
4	6443/6008	9	25893/24141

Как следует из численных результатов, приведенных в таблице, увеличение температуры слабо сказывается на собственных числах шарнирно опертой пластины, собственные частоты при этом уменьшаются примерно на 7 %.

Максимальный прогиб пластины при различных температурах показан на рисунке 2 в зависимости от внутреннего радиуса кольца импульсной нагрузки: 1 –  $T = 20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 220^\circ\text{C}$ . Момент времени  $t = \pi / (2\omega_0)$  соответствует максимальному значению функции (14) при частоте основного тона  $\omega_0$ .

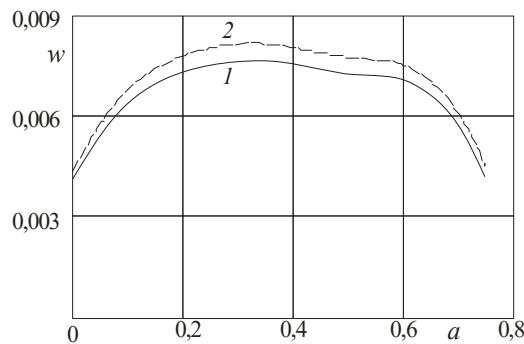


Рисунок 2 – Прогиб в центре пластины в зависимости от внутреннего радиуса кольца импульсной нагрузки

Изменение во времени прогиба в центре пластины при различных температурах: 1 –  $T = 20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 220^\circ\text{C}$ , иллюстрирует рисунок 3. Внутренний радиус кольца  $a = 0,25$ . Повышение температуры на  $200^\circ\text{C}$  приводит к заметному увеличению периода колебаний и росту амплитуды прогиба на 12,5 %.

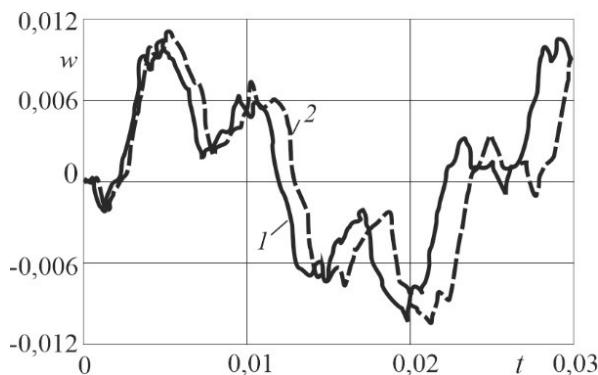


Рисунок 3 – Изменение во времени прогиба в центре пластины

По графикам на рисунке 4 можно судить о росте прогиба в центре пластины при увеличении радиуса внешнего кольца импульсной нагрузки  $b$  ( $a = 0$ ) при различных температурах: 1 –  $T = 20^\circ\text{C}$ , 2 –  $T = 220^\circ\text{C}$ . Кривые построены в моменты  $t_0 = \pi / (2\omega_0)$ . С увеличением толщины пятна нагрузки прогиб нелинейно возрастает. Рост температуры приводит к увеличению прогиба в указанный момент времени на 9%.

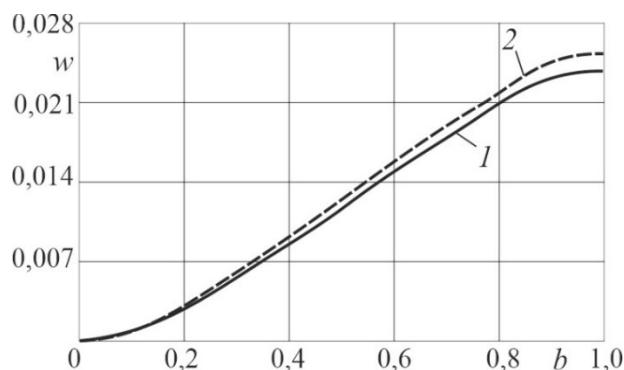


Рисунок 4 – Прогиб в центре пластины при росте радиуса силового круга

## Заключение

Предложенная математическая модель динамического деформирования трехслойной упругой круговой сэндвич-пластины, позволяет учитывать воздействие локального кольцевого импульса и температуры окружающей среды на частоты собственных колебаний, относительный сдвиг и прогиб в пластине.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carrera, E. Thermal stress analysis of composite beams, plates and shells: computational modelling and applications / E. Carrera, F.A. Fazzolari, M. Cinefra. – Academic Press, 2016. – 410 p.
2. Aghalovyan, L. Asymptotic theory of anisotropic plates and shells / L. Aghalovyan, D. Prikazchikov. – Singapore: World Scientific Publishing Co., 2015. – 360 p.
3. Горшков, А.Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, А.В. Яровая. – Москва : Физматлит, 2005. – 576 с.
4. Журавков, М.А. Математические модели механики твердого тела / М.А. Журавков, Э.И. Старовойтов. – Минск: БГУ, 2021. – 535 с.
5. Zhuravkov, M. Mechanics of Solid Deformable Body / M. Zhuravkov, Y. Lyu, E. Starovoitov. – Singapore : Springer Verlag, 2023. – 317 p.
6. Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагрузлениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. – 381 с.
7. Деформирование трехслойных пластин при термосиловых нагрузках / Э.И. Старовойтов [и др.] // Гомель, БелГУТ, 2024. – 395 с.
8. Mikhasev, G.I. Free vibrations of elastic laminated beams, plates and cylindrical shells / G.I. Mikhasev, H. Altenbach // In: Thin-walled laminated structures. Cham: Springer. – 2019. – Pp. 157–198.
9. Bakulin, V.N. Panel flutter of a variable-thickness composite shell / V.N. Bakulin, M.A. Konopelchev, A.Ya.Nedbai // Mechanics of Composite Materials. – 2020. – Vol. 56, no. 5. – Pp. 629–638.
10. Bakulin, V.N. Parametric resonance of a three-layered cylindrical composite rib-stiffened shell / V.N. Bakulin, D.A.Boitsova, A.Ya.Nedbai // Mechanics of composite materials. – 2021. –Vol. 57. – No. 5. – Pp. 623–634.
11. Старовойтов, Э.И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
12. Старовойтов, Э.И. Резонансные колебания трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 60–68. – EDN VWWEAF.
13. Паймушин, В.Н. Нелинейная теория трехслойных оболочек с трансверсально-мягким заполнителем, имеющих участки расслоений и контурную подкрепляющую диафрагму / В.Н. Паймушин // Прикладная математика и механика. – 2018. – Т. 82. – № 1. – С.44–57.
14. Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. Two-dimensional nonstationary contact of elastic cylindrical or spherical shells // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol.43. – No.2. – Pp.145–152.
15. Fedotenkov, G.V. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G.V. Fedotenkov, D.V. Tarlakovskiy, Y.A. Vahterova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40. – No. 4. – Pp.439–447.
16. Suvorov, Ye.M. The plane problem of the impact of a rigid body on a half-space modelled by a Cosserat medium / Ye.M. Suvorov, T D. V. arlakovskii, G.V. Fedotenkov// Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76. – No. 5. – Pp. 511–518.
17. Paimushin, V.N. Static and monoharmonic acoustic impact on a laminated plate / V.N. Paimushin, R.K. Gazizullin // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53. – No.3. – Pp. 407–436.
18. Paimushin, V.N. Modeling the dynamic response of a carbon-fiber-reinforced plate at resonance vibrations considering the internal friction in the material and the external aerodynamic damping / V.N. Paimushin, V.A. Firsov, V.M. Shishkin // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53. – No.4. – Pp. 609–630.
19. Kaplunov, J. Dispersion of elastic waves in a strongly inhomogeneous three-layered plate / J. Kaplunov, D.A. Prikazchikov, L.A. Prikazchikova // International Journal of Solids and Structures. – 2017. – Vol. 113–114. – Pp. 169–179.
20. Вынужденное колебание балки на упругом основании при внезапном трещинообразовании / А.А. Поддубный [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – №3 (353). – С. 15–21.
21. Поддубный, А.А. Собственные поперечные колебания балки на упругом основании Пастернака / А.А. Поддубный, В.А. Гордон // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – №3 (359). – С. 14–32.

22. Леоненко, Д.В. Колебания круговой трехслойной пластины под действием внешней нагрузки / Д.В. Леоненко, М.В. Маркова // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2023. – № 1. – С. 49–63.

23. Лачугина, Е.А. Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жесткими заполнителями / Е.А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 212–219.

24. Лачугина, Е. А. Свободные колебания пятислойной круговой пластины с легкими заполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации: междунар. сборн. научн. труд. – Гомель, 2023. – Вып. 16. – С. 111–116.

25. Агеев, Р.В. Колебания стенок щелевого канала с вязкой жидкостью, образованного трехслойным и твердым дисками / Р.В. Агеев, Л.И. Могилевич, В.С. Попов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

26. Pradhan, M. Static and dynamic stability analysis of an asymmetric sandwich beam resting on a variable Pasternak foundation subjected to thermal gradient / M. Pradhan, P.R. Dash, P.K. Pradhan // Meccanica. – 2016. – Vol. 51. – № 3. – Pp. 725–739.

27. Леоненко, Д.В. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д.В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – № 1. – С. 59–63.

28. Трацевская, Е.Ю. Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е.Ю. Трацевская // Литосфера. – 2019. – Т. 51. – № 2. – С. 115–121.

29. Трацевская, Е.Ю. Экспериментальное исследование параметров автотранспортного выбродинамического воздействия на массивы грунтов / Е.Ю. Трацевская // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 58–61.

30. Старовойтов, Э.И. Изгиб упругой трехслойной круговой пластины на основании Пастернака / Э.И. Старовойтов, А.Г. Козел // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 392–406.

31. Старовойтов, Э.И. Деформирование локальными нагрузками композитной пластины на упругом основании / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко, М. Сулейман // Механика композитных материалов. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 109–120.

32. Захарчук, Ю.В. Напряженно-деформированное состояние круговой трехслойной пластины со скимаемым заполнителем / Ю.В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации: междунар. сборн. научн. труд. – Гомель, 2019. – Вып. 12. – С. 66–75.

33. Babaytsev, A.V. Defect development in multilayer composites under static loads / A.V. Babaytsev, M.Yu. Kalyagin, L.N. Rabinskij // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, no. 1. – Pp. 112–115.

34. Старовойтов, Э.И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1(22). – С. 31–35.

35. Старовойтов, Э.И. Переменное деформирование трехслойного стержня локальной синусоидальной нагрузкой / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко, М.А. Журавков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2016. – № 1 (315). – С. 19–28.

36. Старовойтов, Э.И. Осесимметричное деформирование круговой трехслойной пластины в температурном поле / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2018. – № 1 (327). – С. 13–22.

**Старовойтов Эдуард Иванович**

Белорусский государственный университет транспорта  
доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика, геотехника и строительные конструкции»  
Кирова, 34, 246653 г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел. +375-232-95-39-61 (раб.)  
E-mail: edstar0@yandex.by

**Леоненко Денис Владимирович**

Белорусский государственный университет транспорта  
доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Строительная механика, геотехника и строительные конструкции»  
Кирова, 34, 246653 г. Гомель, Республика Беларусь.  
Тел. +375-232-95-39-61 (раб.).  
E-mail: leoden@list.ru

---

STAROVOITOVA E.I., LEONENKO D.V.

**CIRCULAR SANDWICH PLATE IN A TEMPERATURE FIELD UNDER THE ACTION OF A RING PULSE**

**Abstract.** Vibrations of a circular three-layer sandwich plate symmetrical in thickness under the action of a pulsed axisymmetric load evenly distributed over the ring are investigated. The kinematics of the package corresponds to the polyline hypothesis. The outer layers are load-bearing, thin, high-strength, they deform according to Kirchhoffs

*hypotheses. The filler is lightweight, incompressible in thickness. Tymoshenkos hypothesis is valid for him. For the sandwich plate under consideration, the general system of differential equations of transverse isothermal vibrations of a circular three-layer plate is simplified. Two equations remain in it with respect to the desired functions – the deflection of the plate and the additional shift in the filler. The elastic properties of the layer materials depend on temperature; it is not explicitly included in the oscillation equations. The solution of the initial boundary value problem is written out in the form of decomposition of the desired displacements in a series according to a system of proper orthonormal functions. The equations for calculating the eigenvalues are given in the case of sealed and pivotally supported contours of the plate. Calculation formulas for deflection and relative shear are given. A numerical analysis of the solution for a plate with a pivotally supported contour is carried out. Keywords: circular sandwich plate, circular force pulse, temperature, analytical solution, numerical results.*

**Keywords:** *circular three-layer plate, ring pulse, temperature, analytical solution, numerical results.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Carrera, E. Thermal stress analysis of composite beams, plates and shells: computational modelling and applications / E. Carrera, F.A. Fazzolari, M. Cinefra. – Academic Press, 2016. – 410 p.
2. Aghalovyan, L. Asymptotic theory of anisotropic plates and shells / L. Aghalovyan, D. Prikazchikov. – Singapore: World Scientific Publishing Co., 2015. – 360 p.
3. Gorshkov, A.G. Mehanika sloistyh vjazkouprugoplasticheskikh jelementov konstrukcij / A.G. Gorshkov, Je.I. Starovojtov, A.V. Jarovaja. – Moskva : Fizmatlit, 2005. – 576 s.
4. Zhuravkov, M.A. Matematicheskie modeli mehaniki tverdogo tela / M.A. Zhuravkov, Je.I. Starovojtov. – Minsk: BGU, 2021. – 535 s.
5. Zhuravkov, M. Mechanics of Solid Deformable Body / M. Zhuravkov, Y. Lyu, E. Starovoitov. – Singapore : Springer Verlag, 2023. – 317 p.
6. Abdusattarov, A. Deformirovanie i povrezhdaemost uprugoplasticheskikh jelementov konstrukcij pri ciklicheskih nagruzhenijah / A. Abdusattarov, Je. I. Starovojtov, N. B. Ruzieva. – Tashkent : Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet, 2023. – 381 s.
7. Deformirovanie trehslojnyh plastin pri termosilovyh nagruzkah / Je.I. Starovojtov [i dr.] // Gomel, BelGUT, 2024. – 395 s.
8. Mikhasev, G.I. Free vibrations of elastic laminated beams, plates and cylindrical shells / G.I. Mikhasev, H. Altenbach // In: Thin-walled laminated structures. Cham: Springer. – 2019. – Pp. 157–198.
9. Bakulin, V.N. Panel flutter of a variable-thickness composite shell / V.N. Bakulin, M.A. Konopelchev, A.Ya.Nedbaj // Mechanics of Composite Materials. – 2020. – Vol. 56, no. 5. – Pp. 629–638.
10. Bakulin, V.N. Parametric resonance of a three-layered cylindrical composite rib-stiffened shell / V.N. Bakulin, D.A.Boitsova, A.Ya.Nedbaj // Mechanics of composite materials. – 2021. –Vol. 57. – No. 5. – Pp. 623–634.
11. Starovojtov, Je.I. Issledovanie spektra chastot trehslojnoj cilindricheskoy obolochki s uprugim napolnitelem / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko // Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. – 2015. – T. 21, № 2. – S. 162–169.
12. Starovojtov, Je.I. Rezonansnye kolebanija trehslojnoj cilindricheskoy obolochki s uprugim napolnitelem / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko // Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. – 2016. – T. 22, № 1. – S. 60–68. – EDN VWWEAF.
13. Pajmushin, V.N. Nelinejnaja teorija trehslojnyh obolochek s transversalno-mjagkim zapolnitelem, imejushhih uchastki rassloenij i konturnuju podkrepljajushhuju diafragmu / V.N. Pajmushin // Prikladnaja matematika i mehanika. – 2018. – T. 82. – № 1. – S.44–57.
14. Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. Two-dimensional nonstationary contact of elastic cylindrical or spherical shells // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol.43. – No.2. – Pp.145–152.
15. Fedotenkov, G.V. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G.V. Fedotenkov, D.V. Tarlakovskiy, Y.A. Vahterova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40. – No. 4. – Pp.439–447.
16. Suvorov, Ye.M. The plane problem of the impact of a rigid body on a half-space modelled by a Cosserat medium / Ye.M. Suvorov, T D. V. arlakovskii, G.V. Fedotenkov// Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76. – No. 5. – Pp. 511–518.
17. Paimushin, V.N. Static and monoharmonic acoustic impact on a laminated plate / V.N. Paimushin, R.K. Gazizullin // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53. – No.3. – Pp. 407–436.
18. Paimushin, V.N. Modeling the dynamic response of a carbon-fiber-reinforced plate at resonance vibrations considering the internal friction in the material and the external aerodynamic damping / V.N. Paimushin, V.A. Firsov, V.M. Shishkin // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53. – No.4. – Pp. 609–630.
19. Kaplunov, J. Dispersion of elastic waves in a strongly inhomogeneous three-layered plate / J. Kaplunov, D.A. Prikazchikov, L.A. Prikazchikova // International Journal of Solids and Structures. – 2017. – Vol. 113–114. – Pp. 169–179.
20. Vynuzhdennoe kolebanie balki na uprugom osnovanii pri vnezapnom treshhinoobrazovanii / A.A. Poddubnyj [i dr.] // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2022. – №3 (353). – S. 15–21.
21. Poddubnyj, A.A. Sobstvennye poperechnye kolebanija balki na uprugom osnovanii Pasternaka / A.A. Poddubnyj, V.A. Gordon // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2023. – №3 (359). – S. 14–32.

22. Leonenko, D.V. Kolebanija krugovoj trehslojnoj plastiny pod dejstviem vnesnej nagruzki / D.V. Leonenko, M.V. Markova // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika. – 2023. – № 1. – S. 49–63.

23. Lachugina, E.A. Poperechnye kolebanija pjatislojnoj uprugoj krugovoj plastiny s zhestkimi zapolniteljami / E.A. Lachugina // Mehanika. Issledovanija i innovacii. – 2022. – Vyp. 15. – C. 212–219.

24. Lachugina, E. A. Svobodnye kolebanija pjatislojnoj krugovoj plastiny s legkimi zapolniteljami / E. A. Lachugina // Mehanika. Issledovanija i innovacii: mezhdunar. sborn. nauchn. trud. – Gomel, 2023. – Vyp. 16. – S. 111–116.

25. Ageev, R.V. Kolebanija stenok shhelevogo kanala s vjazkoj zhidkostju, obrazovannogo trehslojnym i tverdym diskami / R.V. Ageev, L.I. Mogilevich, V.S. Popov // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. – 2014. – № 1. – S. 3–11.

26. Pradhan, M. Static and dynamic stability analysis of an asymmetric sandwich beam resting on a variable Pasternak foundation subjected to thermal gradient / M. Pradhan, P.R. Dash, P.K. Pradhan // Meccanica. – 2016. – Vol. 51. – No. 3. – Pp. 725–739.

27. Leonenko, D.V. Kolebanija krugovyh trehslojnyh plastin na uprugom osnovanii Pasternaka / D.V. Leonenko // Jekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo jekonomiceskogo sotrudnichestva. – 2014. – № 1. – S. 59–63.

28. Tracevskaia, E.Ju. Dempfirujushchie svojstva slabosvjaznyh trehfaznyh gruntov / E.Ju. Tracevskaia // Litosfera. – 2019. – T. 51. – № 2. – S. 115–121.

29. Tracevskaia, E.Ju. Jeksperimentalnoe issledovanije parametrov avtotransportnogo vibrodinamicheskogo vozdejstvija na massivy gruntov / E.Ju. Tracevskaia // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport. – 2020. – № 1 (40). – S. 58–61.

30. Starovojtov, Je.I. Izgib uprugoj trehslojnoj krugovoj plastiny na osnovanii Pasternaka / Je.I. Starovojtov, A.G. Kozel // Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. – 2018. – T. 24, № 3. – S. 392–406.

31. Starovojtov, Je.I. Deformirovanie lokalnymi nagruzkami kompozitnoj plastiny na uprugom osnovanii / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko, M. Sulejman // Mehanika kompozitnyh materialov. – 2007. – T. 43, № 1. – S. 109–120.

32. Zaharchuk, Ju.V. Naprjazheno-deformirovannoe sostojanie krugovoj trehslojnoj plastiny so szhimaemym zapolnitelem / Ju.V. Zaharchuk // Mehanika. Issledovanija i innovacii: mezhdunar. sborn. nauchn. trud. – Gomel, 2019. – Vyp. 12. – S. 66–75.

33. Babaytsev, A.V. Defect development in multilayer composites under static loads / A.V. Babaytsev, M.Yu. Kalyagin, L.N. Rabinskiy // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, no. 1. – Pp. 112–115.

34. Starovojtov, Je.I. Deformirovanie trehslojnogo sterzhnya v temperaturnom pole / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko // Mehanika mashin, mehanizmov i materialov. – 2013. – № 1(22). – S. 31–35.

35. Starovojtov, Je.I. Peremennoe deformirovanie trehslojnogo sterzhnya lokalnoj sinusoidalnoj nagruzkoj / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko, M.A. Zhuravkov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2016. – № 1 (315). – S. 19–28.

36. Starovojtov, Je.I. Osesimmetrichnoe deformirovanie krugovoj trehslojnoj plastiny v temperaturnom pole / Je.I. Starovojtov, D.V. Leonenko // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2018. – № 1 (327). – S. 13–22.

**Starovojtov Eduard Ivanovich**

Belarusian State University of Transport  
Doctor of physico-mathematical sciences,  
professor, professor  
Kirova st. 34, Gomel, 246653, Belarus  
Tel. +375-232-953961 (office)  
E-mail edstar0@yandex.by

**Leonenko Denis Vladimirovich**

Belarusian State University of Transport  
Doctor of physico-mathematical sciences, professor,  
head of chair  
Kirova st. 34, Gomel, 246653, Belarus  
Tel. +375-232-953961 (office)  
E-mail leoden@list.ru

© Старовойтov Э.И., Леоненко Д.В., 2025

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.73

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-19-26

ЗЕМЛЯНУШНОВ Н.А., ЗЕМЛЯНУШНОВА Н.Ю., КОСТЕНКО К.В.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИНЫ ПРИ КОНТАКТНОМ ЗАНЕВОЛИВАНИИ**

**Аннотация.** Определен один из недостатков представленной математической модели напряжённо-деформированного состояния пружины при контактном заневоливании. Установлены выражения для определения эллиптических координат  $\lambda$  и  $\lambda_1$ , используемых в известной математической модели, что позволяет сократить время расчета искомых параметров. Представлены результаты определения указанных координат для пластически деформируемых элементов пружины клапана внутренней при упрочнении различными нагрузками контактного заневоливания.

**Ключевые слова:** контактное заневоливание, напряженно-деформированное состояние, пружины, математическая модель.

### **Введение**

Для нужд отечественных автомобильной промышленности, самолетостроения, производства ракетно-космических систем и военной техники, а также дорожного, транспортного и сельскохозяйственного машиностроения необходимы цилиндрические пружины сжатия, обладающие высокой надежностью, в частности безотказностью и долговечностью. Так, например, пружины, установленные в систему подвески вагонов ОАО «РЖД», теряют со временем свои эксплуатационные показатели, и за год количество пружин требующих замены может достигать одного миллиона единиц [1]. Введенные против отечественной промышленности санкции осложняют возможность своевременного обеспечения предприятий металлом, инструментом, оборудованием, деталями и т.п., поэтому необходимо внедрение новых производственных операций и технологий [2, 3].

При изготовлении винтовых цилиндрических пружин, в зависимости от геометрических параметров и их технологического назначения, применяют традиционные методы обработки металлов давлением: холодная осадка, горячая осадка, заневоливание [4-7]. Преимущество приведенных операций заключается в экономической целесообразности ввиду использования типового оборудования – гидравлического пресса или разрывной машины (на сжатие) и печи, кассетного приспособления для заневоливания пружин. Стоит отметить, что данные операции имеют и недостатки:

1. Относительно высокая длительность процесса, так для заневоливания пружин может потребоваться от 6 до 48 часов.

2. После снятия нагрузки возможны различные геометрические отклонения пружины, например, от прямолинейности оси, переменность шага витков, седлообразность, бочкообразность, неперпендикулярность торцов пружины оси.

3. Пружины, работающие при ударных нагрузках, будут обладать меньшим ресурсом, за счет появления пластической деформации при эксплуатации в зоне соприкосновения витков.

С целью устранения указанных недостатков предложена операция контактного заневоливания, суть которой заключается в приложении дополнительной осевой нагрузки после сжатия пружины до соприкосновения витков [8, 9]. Для обеспечения возможности внедрения контактного заневоливания в технологические процессы производственных предприятий разработаны устройства и способы их применения, а также математическая модель напряжённо-деформированного состояния пружины (НДС) при контактном заневоливании [10].

Недостатками существующей математической модели являются отсутствие учёта различия свойств материала пружины по сечению витка и трудоёмкость расчетов. С целью оптимизации математической модели НДС пружины при контактном заневоливании в работе выполнено её уточнение.

### Основная часть

При контактном заневоливании происходит уменьшение высоты и увеличение нагружочной способности пружины по причине того, что материал в ней пластически деформируется. Деформация возникает по периферии витков и в местах их соприкосновения. При этом в центре витков остаётся область с первоначальной структурой металла. В пружине, сжатой до соприкосновения витков, тангенциальное напряжение от скручивания составляет [11], МПа,

$$\tau = \left( \frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{U_3} - \frac{\sin \alpha_{cж} \cdot \cos \alpha_{cж}}{U_{cж}} \right) \cdot \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \cdot G, \quad (1)$$

где  $\alpha_3$  и  $\alpha_{cж}$  - угол наклона витков пружины в свободном состоянии и сжатой соответственно, в градусах;

$U_3$  и  $U_{cж}$  - расстояние от оси пружины до абсциссы границы упругой зоны пружины до заневоливания и сжатой до соприкосновения витков соответственно, мм, причём  $U_{cж} = R_{cж} + x_0$  (рисунок 1);

$R_{cж}$  - радиус сжатой пружины, мм;

$x_0, y_0$  - координаты точек, принадлежащих границе упругой зоны (рисунок 1), мм;

$G$  - модуль сдвига материала пружины, МПа;

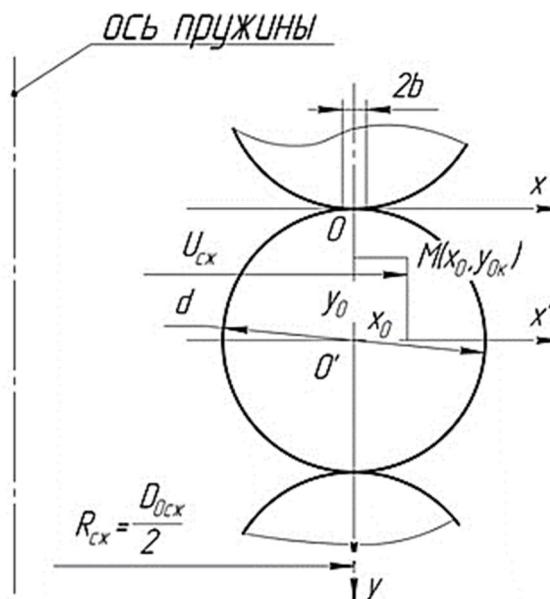


Рисунок 1 - Сечение витков пружины при контактном заневоливании:

$D_{cж}$  - средний диаметр пружины, сжатой до соприкосновения витков, мм;

$U_{cж}$  - расстояние от оси пружины до абсциссы границы упругой зоны, мм;

$2b$  - ширина полоски контакта витков при сжатии пружины, мм;

$x_0, y_0, y_{0k}$  - координаты точек, принадлежащих границе упругой зоны при контактном заневоливании, мм [11]

$$y_0 = \frac{d}{2} - y_{0k} \quad \text{- ордината границы упругой зоны, мм.}$$

Сжимающие виток пружины вдоль оси  $y$  напряжения  $\sigma_y$  [11], МПа,

$$\sigma_y = -A \cdot \frac{b^2 \cdot y_{0k}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0k}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}}, \quad (2)$$

где постоянная  $A = 1,727E/(\pi r)$ ;

$E$  - модуль упругости материала пружины, МПа;

$\lambda$  - эллиптическая координата, которая находится в виде положительного корня из уравнения [11], мм<sup>2</sup>,

$$\frac{x^2}{b^2 + \lambda} + \frac{y_{0k}^2}{\lambda} = 1. \quad (3)$$

В соответствии с теорией малых упругопластических деформаций [11]

$$\sigma_y^2 + 3 \cdot \tau^2 = \sigma_m^2, \quad (4)$$

где  $\sigma_m$  - предел текучести материала пружины, МПа.

Уравнение [11], позволяющее определить границу между упругой и пластической зонами в поперечном сечении витка

$$3 \cdot \left( \frac{\Delta\kappa \cdot G \cdot x_0}{\sigma_m} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\Delta\kappa \cdot G}{\sigma_m} \right)^2 \cdot (r - y_{0\kappa})^2 + \frac{C \cdot y_{0\kappa}^6}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2)^2 \cdot \sigma_m^2} = 1 \quad (5)$$

где  $C = \frac{A^2 \cdot b^4 \cdot (b^2 + \lambda)}{\lambda};$

$r$  - радиус сечения витка пружины, мм;

$\Delta\kappa$  - приращение кручения витка пружины, причем,  $\text{мм}^{-1}$ ,

$$\Delta\kappa = \frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{R_3} - \frac{\sin \alpha_{cж} \cdot \cos \alpha_{cж}}{R_{cж}};$$

$R_3$  - радиус пружины в свободном состоянии, мм.

Сжимающие напряжения  $\sigma_y$  в пластической зоне поперечного сечения витка, МПа [11]

$$\sigma_y = X \cdot \frac{E \cdot y_{0\kappa}^3}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2)} + E_1 \cdot \left( X_1 \cdot \frac{y^3}{(\lambda_1^2 + b^2 \cdot y^2)} - X \cdot \frac{y_{0\kappa}^3}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2)} \right), \quad (6)$$

где  $E_1$  - модуль упрочнения материала пружины, МПа;

$$X = \frac{1,727 \cdot b^2}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}}, \quad X_1 = \frac{1,727 \cdot b^2}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda_1}{\lambda_1}};$$

$\lambda_1$  - эллиптическая координата,  $\text{мм}^2$ , которая находится в виде положительного корня из уравнения [11]

$$\frac{x^2}{b^2 + \lambda_1} + \frac{y^2}{\lambda_1} = 1, \quad (7)$$

$x, y$  - координаты точки пластической зоны, в которой определяются значения напряжений, мм.

Напряжения кручения  $\tau_{kp}$ , МПа [11]

$$\tau_{kp} = \frac{\Delta\kappa \cdot G \cdot \sqrt{x^2 + \left( \frac{d}{2} - y \right)^2}}{Z}, \quad (8)$$

где  $Z = 1 + \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{upr}$  - величина, характеризующая глубину пластического упрочнения по сечению витка пружины [11];

$\varepsilon_{pl}$  - пластическая часть полной относительной линейной деформации;

$\varepsilon_{upr}$  - упругая часть полной относительной линейной деформации.

Для определения момента кручения в поперечном сечении витка [11] пружины при контактном заневоливании разобьём половину сечения проволоки на  $s$  элементов со сторонами  $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ ,  $\Delta y = y_i - y_{i-1}$ , (рисунок 2). Величины  $x$  и  $y$  при этом меняются в пределах:

$$-r = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_n = r$$

$$0 = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{j-1} < y_j < y_m = r$$

Через  $\Delta x$  обозначена [10] разность  $x_i - x_{i-1}$ , являющаяся длиной элементарного отрезка  $[x_{i-1}, x_i]$ . В каждом из элементов существует точка с координатами  $x_{cpi}, y_{cpi}$ , которой в сечении витка пружины соответствуют свои точки  $y_{1i}$  и  $y_{0i}$ , а значение  $y$  меняется от  $y = y_{1i}$  до  $y = r$ .

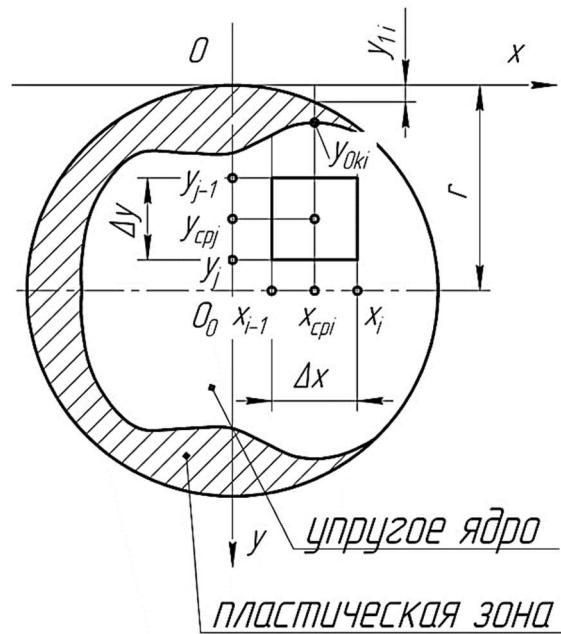


Рисунок 2 – Сечение витка пружины при контактном заневоливании

Причём:

$$x_{cpj} = \frac{x_i + x_{i-1}}{2}, \quad (9)$$

$$y_{cpj} = \frac{y_j + y_{j-1}}{2}, \quad (10)$$

$$y_{1i} = r - \sqrt{r^2 - x_{cpj}^2}, \quad (11)$$

где  $y_{1i}$  - граница сечения проволоки пружины по периферии вдоль оси  $y$ , мм.

Для каждого значения  $x_{cpj}$  ордината границы [11], отделяющей упругую зону от пластической  $y_{0ki}$ , величина постоянная при данной ширине полоски контакта и определяется методом последовательных приближений путем подстановки вместо  $x_0$  значения  $x_{cpj}$  в уравнение

$$\left( -A \cdot \frac{b^2 \cdot y_{0k}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0k}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} \right)^2 +$$

$$+ 3 \cdot \left( \left( \frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{U_3} - \frac{\sin \alpha_{cж} \cdot \cos \alpha_{cж}}{U_{cж}} \right) \cdot \sqrt{x_0^2 + \left( \frac{d}{2} - y_{0k} \right)^2} \cdot G \right)^2 = \sigma_m^2.$$

Крутящий момент [11]

$$M_{kp} = \int_F \tau \cdot \rho dS = \int_F \frac{\Delta \kappa \cdot G \cdot \left( x^2 + \left( \frac{d}{2} - y \right)^2 \right)}{Z} dS, \quad (12)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения витка,  $\text{мм}^2$ ;

$\rho$  - полярный радиус исследуемой точки сечения витка, мм.

Более подробно математическая модель представлена в работах [10, 11].

Трудоёмкость расчетов представленной математической модели обусловлена большим массивом вычислений, поэтому при расчетах искомых параметров использована система автоматического проектирования Mathcad. В существующем алгоритме в Mathcad отсутствует

формулы для определения  $\lambda$  и  $\lambda_1$ , что приводит к длительности решения уравнений методом последовательного приближения.

С целью устранения указанного недостатка при определении искомых параметров в Mathcad необходимо выразить  $\lambda$  в уравнении (3). Аналогично будет и  $\lambda_1$  в уравнении (7). Выполним алгебраические преобразования уравнения (3) и выразим  $\lambda$ .

После преобразований, получим квадратное уравнение (14) вида

$$\begin{aligned} x^2 + \frac{(b^2 + \lambda) \cdot y_{0\kappa}^2}{\lambda} - (b^2 + \lambda) &= 0 \\ \lambda \cdot x^2 + (b^2 + \lambda) \cdot y_{0\kappa}^2 - \lambda \cdot b^2 - \lambda^2 &= 0 \\ \lambda \cdot x^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2 + \lambda \cdot y_{0\kappa}^2 - \lambda \cdot b^2 - \lambda^2 &= 0 \\ \lambda^2 - \lambda \cdot x^2 - \lambda \cdot y_{0\kappa}^2 + \lambda \cdot b^2 - b^2 \cdot y_{0\kappa}^2 &= 0 \\ \lambda^2 + \lambda \cdot (b^2 - x^2 - y_{0\kappa}^2) - b^2 \cdot y_{0\kappa}^2 &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Выразим дискриминант  $D$

$$D = (b^2 - x^2 - y_{0\kappa}^2) + 4 \cdot b^2 \cdot y_{0\kappa}^2$$

Тогда  $\lambda$

$$\lambda = \frac{(x^2 + y_{0\kappa}^2 - b^2 \pm \sqrt{(b^2 - x^2 - y_{0\kappa}^2)^2 + 4 \cdot b^2 \cdot y_{0\kappa}^2})}{2}. \quad (14)$$

Аналогично  $\lambda_1$

$$\lambda_1 = \frac{(x^2 + y^2 - b^2 \pm \sqrt{(b^2 - x^2 - y^2)^2 + 4 \cdot b^2 \cdot y^2})}{2}. \quad (15)$$

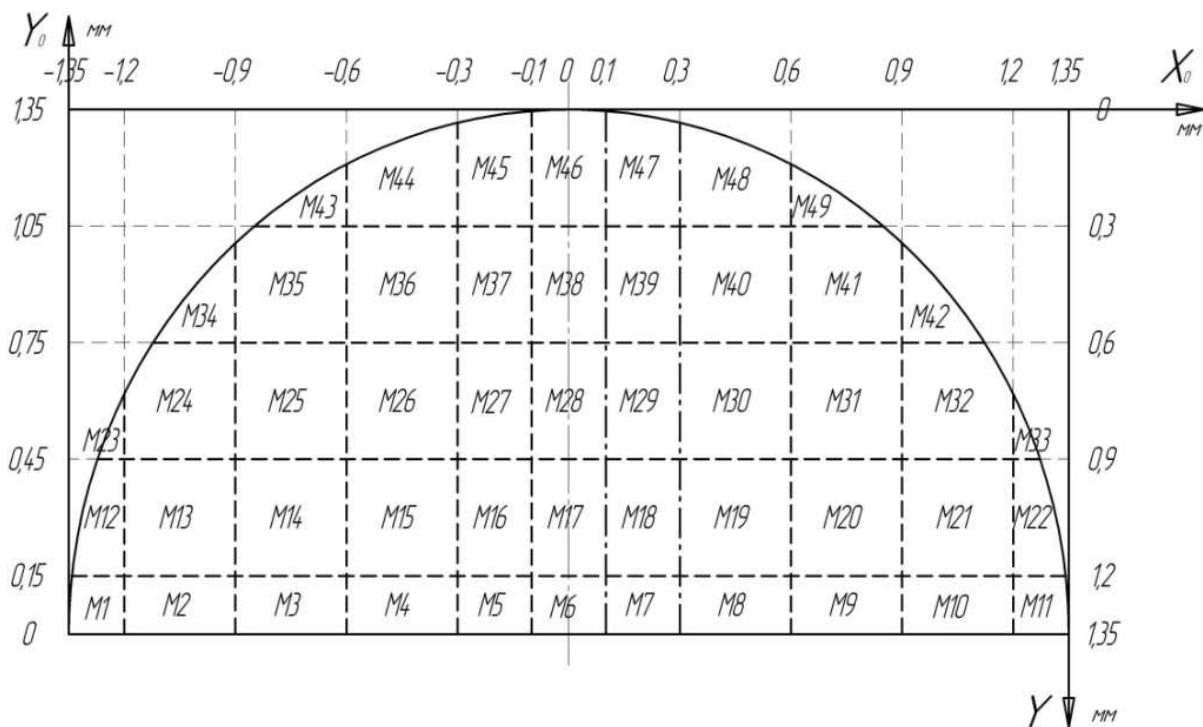


Рисунок 3 – Сетка точек половины сечения витка пружины

Установленные выражения (14) и (15) рекомендуется использовать при проведении исследований по зависимостям (1)...(13) в программе Mathcad.

Определим значения  $\lambda$ ,  $\lambda_1$  в элементах половины сечения пружины (рисунок 3), подвергнутых пластическим деформациям, при упрочнении нагрузкой контактного заневоливания  $Q = 220F_3$  (68162,6 Н) и  $Q = 300F_3$  (92949,0 Н). Исходные данные: диаметр

сечения витка  $d = 2,7$  мм, свободная высота пружины  $H_0 = 45,1$  мм; высота рабочей части пружины  $H_{раб} = 41,9$  мм; полное число витков  $i = 6,5$ ; рабочее число витков  $i_{раб} = 4,5$ ; материал – проволока Oteva 60; шаг рабочих витков  $t = 9,31$  мм;  $E = 2,06 \times 10^5$  МПа;  $G = 7,95 \times 10^4$  МПа; длина развертки рабочей части пружины  $L_{раб} = 289,27$  мм;  $\sigma_m = 1638$  МПа. Результаты исследования параметров представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Параметры пластиически деформируемых элементов пружины клапана внутренней 2101-1007021 при упрочнении нагрузкой контактного заневоливания  $Q = 220F_3$

Номер точки	$x_{cp}$ , мм	$y_{cp}$ , мм	$y_0$ , мм	$\lambda_1$	$\lambda$	$\sigma$ , МПа	$M_{kp}$ , Н·м
M1	-1.275	1.275	0	3.444	3.247	2028.145	33.177
M12	-1.271	1.05	0	3.434	2.713	2071.095	64.424
M13	-1.05	1.05	0.269	2.267	2.201	1694.955	96.229
M23	-1.236	0.815	0	3.347	2.186	2126.078	19.013
M24	-1.05	0.75	0.269	2.267	1.660	1871.396	118.621
M34	-1.011	0.47	0.405	1.910	1.236	2062.557	89.544
M35	-0.75	0.45	0.834	0.823	0.759	1755.21	107.815
M42	1.011	0.47	0.875	1.241	1.236	1686.848	75.726
M43	-0.724	0.22	0.861	0.758	0.565	2001.474	61.591
M44	-0.45	0.15	1.061	0.280	0.218	1857.49	124.784
M45	-0.2	0.15	0.908	0.234	0.058	1853.371	72.197
M46	0	0.15	0.816	0.285	0.022	4204.279	65.478
M47	0.2	0.15	0.934	0.211	0.0576	1791.599	70.095
M48	0.45	0.15	1.187	0.222	0.218	1698.893	114.122
M49	0.724	0.22	1.083	0.588	0.565	1733.344	53.502

Примечание:  $\sigma$  – интенсивность напряжений в исследуемой точке, МПа, при превышении предела упругости приведена условная величина.

Таблица 2 - Параметры пластиически деформируемых элементов пружины клапана внутренней 2101-1007021 при упрочнении нагрузкой контактного заневоливания  $Q = 300F_3$

Номер точки	$x_{cp}$ , мм	$y_{cp}$ , мм	$y_0$ , мм	$\lambda_1$	$\lambda$	$\sigma$ , МПа	$M_{kp}$ , Н·м
M1	-1.275	1.275	0	3.443	3.246	2031.887	27.807
M12	-1.271	1.05	0	3.433	2.711	2073.448	53.992
M13	-1.05	1.05	0.248	2.311	2.200	1701.577	95.789
M23	-1.236	0.815	0	3.345	2.184	2127.272	15.927
M24	-1.05	0.75	0.248	2.310	1.658	1873.881	105.837
M34	-1.011	0.47	0.353	2.010	1.234	2063.006	74.899
M35	-0.75	0.45	0.829	0.826	0.757	1758.091	102.905
M37	-0.2	0.45	0.767	0.379	0.241	1930.333	36.2
M38	0	0.45	0.693	0.432	0.203	2349.747	30.296
M39	0.2	0.45	0.783	0.361	0.241	1896.542	35.462
M42	1.011	0.47	0.875	1.239	1.234	1687.397	75.526
M43	-0.724	0.22	0.856	0.761	0.563	2001.589	51.613
M44	-0.45	0.15	1.049	0.285	0.215	1858.111	111.178
M45	-0.2	0.15	0.767	0.379	0.056	1991.112	47.512
M46	0	0.15	0.693	0.432	0.023	5298.299	40.161
M47	0.2	0.15	0.783	0.361	0.056	1933.744	46.542
M48	0.45	0.15	1.186	0.220	0.215	1699.572	112.955
M49	0.724	0.22	1.083	0.586	0.563	1733.477	51.928

### Заключение

В работе установлены выражения для определения эллиптических координат  $\lambda$  и  $\lambda_1$ , используемых в известной математической модели напряженно-деформированного состояния

пружины при контактном заневоливании, что позволяет сократить время расчета искомых параметров в программе Mathcad. Представлены результаты определения указанных координат для пластически деформируемых элементов пружины при упрочнении контактным заневоливанием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаврин, О. И. Высокопрочные пружины для подвижного состава железных дорог / О. И. Шаврин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2012. – № 3(19). – С. 71-80. – EDN NOADRM.
2. Машиностроительная промышленность: стратегические приоритеты развития в условиях санкций / П. В. Симонин, И. Ю. Литвин, Н. А. Череповская, А. А. Кузьмина // Уголь. – 2023. – № 2(1164). – С. 65-71. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-2-65-71. – EDN ESAPLU.
3. Кухарь, В. Д. Влияние редуцирования на напряженно-деформированное состояние материала стальных осесимметричных изделий с внутренними спиральными рифлениями / В. Д. Кухарь, А. Е. Киреева // Черные металлы. – 2020. – № 3. – С. 48-52. – EDN QMHZAF.
4. Землянушнов, Н. А. К повышению износостойкости винтовых цилиндрических пружин сжатия, работающих с контактом витков / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова // Трение и износ. – 2024. – Т. 45, № 3. – С. 237-245. – DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-3-237-245. – EDN EFLTUE.
5. Лавриненко, Ю. А. Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля / Ю. А. Лавриненко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15, № 12. – С. 547-554. – EDN ZVZMBP.
6. Храмыцких, Н. Ю. Упрочнение крупных пружин, закаливаемых после навивки / Н. Ю. Храмыцких, Е. Г. Белков, М. Г. Соломатов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2005. – № 1(9). – С. 50-53. – EDN PXYTOT.
7. Белков, Е. Г. Технология изготовления и упрочнения пружин / Е. Г. Белков. – Челябинск : Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2013. – 168 с. – ISBN 978-5-696-04466-8. – EDN RSSWPS.
8. Тебенко, Ю. М. Применение контактного заневоливания для изготовления пружин откатных механизмов / Ю. М. Тебенко // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2018. – № 3(139). – С. 16-24. – EDN XYUYMН.
9. Любомудров, С. А. Обоснование выбора метода упрочнения пружины гидрозамка подъемника автомобильного / С. А. Любомудров, О. Т. Турабаев // Перспективные машиностроительные технологии : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 119-121. – EDN NUBVVI.
10. Землянушнов, Н. А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова, А. А. Порохня; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Северо-Кавказский федеральный университет. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – 169 с. – ISBN 978-5-9296-1088-2. – EDN YYXGIX.
11. Землянушнова, Н. Ю. Расчет винтовых цилиндрических пружин сжатия при контактном заневоливании / Н. Ю. Землянушнова. – Ставрополь : Издательство "АГРУС", 2008. – 136 с. – ISBN 978-5-9596-0497-4. – EDN POKLYF.

**Землянушнов Никита Андреевич**  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет», г.  
Ставрополь  
Кандидат технических наук,  
доцент  
департамента  
функциональных материалов и  
инженерного конструирования  
института  
перспективной  
инженерии  
355017, Россия, г. Ставрополь,  
ул. Пушкина, 1  
Тел.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Землянушнова Надежда Юрьевна**  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет», г.  
Ставрополь  
Кандидат технических наук,  
доцент, доцент  
департамента  
функциональных материалов и  
инженерного конструирования  
института  
перспективной  
инженерии  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул.  
Пушкина, 1  
Тел.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

**Костенко Константин Васильевич**  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет», г.  
Ставрополь  
Кандидат технических наук,  
доцент  
департамента  
функциональных материалов и  
инженерного конструирования  
института  
перспективной  
инженерии  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул.  
Пушкина, 1  
Тел.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: Kvkostenko@ncfu.ru

## OPTIMIZATION OF SPRING STRESS-STRAIN STATE MATHEMATICAL MODEL DURING CONTACT HARDENING

**Abstract.** One of spring stress-strain state presented mathematical model disadvantages during contact wound is determined. Expressions for determining the elliptical coordinates  $\lambda$  and  $\lambda_1$  used in a well-known mathematical model are established, which reduces the calculation time of the desired parameters. The results of determining indicated coordinates for internal valve spring plastically deformable elements of during hardening by contact hardening various loads are presented.

**Keywords:** contact hardening, stress-strain state, springs, mathematical model.

### BIBLIOGRAPHY

1. Shavrin, O. I. High-strength springs for railway rolling stock / O. I. Shavrin // Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering. - 2012. - No. 3(19). - pp. 71-80.
2. Machine-building industry: strategic development priorities under sanctions / P. V. Simonin, I. Y. Litvin, N. A. Cherepovskaya, A. A. Kuzmina // Coal. – № 2(1164). – Pp. 65-71. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-2-65-71.
3. Kukhar, V. D. The effect of reduction on the stress-strain state of the material of steel axisymmetric products with internal spiral corrugations / V. D. Kukhar, A. E. Kireeva // Ferrous metals. - 2020. – No. 3. – pp. 48-52.
4. Zemlyanushnov, N. A. To increase the wear resistance of helical cylindrical compression springs working with a contact of coils / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova // Friction and wear. – 2024. – Vol. 45, No. 3. – pp. 237-245. – DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-3-237-245.
5. Lavrinenko, Yu. A. Development of manufacturing technology for the valve spring of a passenger car engine / Yu. A. Lavrinenko // Procurement in mechanical engineering. – 2017. – Vol. 15, No. 12. – Pp. 547-554.
6. Khramytskikh, N. Y. Hardening of large springs hardened after winding / N. Y. Khramytskikh, E. G. Belkov, M. G. Solomatov // Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. – 2005. – № 1(9). – Pp. 50-53.
7. Belkov, E. G. Technology of manufacturing and hardening of springs / E. G. Belkov. Chelyabinsk: South Ural State University (National Research University), 2013. 168 p.
8. Tebenko, Yu. M. The use of contact drilling for the manufacture of springs of sliding mechanisms / Yu. M. Tebenko // The defense complex is dedicated to the scientific and technical progress of Russia. – 2018. – № 3(139). – Pp. 16-24.
9. Lyubomudrov, S. A. Substantiation of the choice of the method of hardening the spring of the hydraulic lock of an automobile lift / S. A. Lyubomudrov, O. T. Turabaev // Promising engineering technologies : collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 21-25, 2022. – St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2023. – pp. 119-121.
10. Zemlyanushnov, N. A. Increasing the resource of highly loaded compression springs / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova, A. A. Porokhnya. Stavropol : North Caucasus Federal University, 2019. 169 p.
11. Zemlyanushnova, N. Y. Calculation of helical cylindrical compression springs during contact drilling / N. Y. Zemlyanushnova. Stavropol : Publishing house "AGRUS", 2008. – 136 p.

**Zemlyanushnov Nikita Andreevich**

North Caucasus Federal University,  
Stavropol  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of Functional  
Materials and Engineering Design  
Department of Advanced  
Engineering Institute  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin  
str., 1  
Tel.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Zemlyanushnova Nadezhda Yurievna**

North Caucasus Federal University,  
Stavropol  
Candidate of Technical Sciences,  
Docent, Associate Professor of  
Functional Materials and Engineering  
Design Department of Advanced  
Engineering Institute  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin  
str., 1  
Tel.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

**Kostenko Konstantin Vasilyevich**

North Caucasus Federal University,  
Stavropol  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of Functional  
Materials and Engineering Design  
Department of Advanced  
Engineering Institute  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin  
str., 1  
Tel.: +7 (8652) 94-41-25  
E-mail: Kvkostenko@ncfu.ru

МИЩЕНКО Е.В., АСОНОВ Д.Г., КОРОЛЬ В.В.

## ПРИЧИНЫ ДЕФЕКТОВ И ПРОБЛЕМ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ FDM (FFF) 3D ПЕЧАТИ

**Аннотация.** Статья представляет собой анализ проблем, возникающих при FDM (Fused Deposition Modeling) 3D печати. Авторы ставят целью систематизацию имеющихся проблем в процессе FDM печати, исследуя распространенные дефекты и их причины, а также сравнивая этот метод с другими аддитивными технологиями. Основные темы статьи включают обзор аддитивных технологий, технические аспекты работы FDM принтера, анализ дефектов FDM печати, связанных как с оборудованием, так и с материалами, моделями и программным обеспечением. Авторы поднимают ряд важных вопросов, касающихся надежности и качества результатов FDM печати, рассматривают, как механическая конструкция и износ деталей принтера влияют на качество печати. Особое внимание уделяется проблемам, которые могут возникнуть в экструдере и подающем механизме. Кроме того, обсуждается, как охлаждение печатной головы и стола влияет на процесс печати. Авторы также анализируют, в каких случаях требуются значительные вычислительные ресурсы для эффективной работы принтера. Рассматриваются проблемы на уровне моделей и программ для слайсинга и способы их предотвращения.

**Ключевые слова:** FDM (FFF) 3D печать, дефекты 3D печати, адгезия слоев, проблемы филамента, проблемы устройства принтера.

### Введение

В последнее десятилетие аддитивные технологии значительно расширили свои границы применения, став доступными не только для промышленного производства, но и для конечных потребителей. Несмотря на свой инновационный потенциал, технология FDM сталкивается с множеством технических и эксплуатационных проблем, возникающих на различных этапах процесса печати. Эти проблемы существенно влияют на качество конечного изделия и требуют глубокого анализа для улучшения всей системы.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью детального изучения этих проблем для повышения эффективности и надежности FDM печати.

Целью исследования является систематизация имеющихся проблем при FDM печати, включающая анализ распространенных дефектов, возникающих в процессе печати, и их причин, а также сравнение процессов FDM печати с другими аддитивными технологиями для выявления ключевых факторов, влияющих на надежность и качество печати.

Новизна работы заключается в комплексном анализе технологических и материаловедческих аспектов FDM печати с целью выявления и классификации причин возникновения дефектов. Среди рассмотренных аспектов особое внимание уделяется сравнению FDM печати с аналогичными процессами, исторически предшествовавшими ей, что позволяет глубже понять механизмы и условия возникновения проблем. Также работа выделяет новые подходы к совершенствованию настройки и калибровки оборудования, программного обеспечения и методов контроля качества, что представляет значительный интерес для исследователей и практиков в области аддитивных технологий.

**Методы исследования:** для достижения поставленных целей в рамках данного исследования применяются такие методы как сравнительный анализ ранее существующих технологий и их современного состояния, аналитическое моделирование, экспериментальное исследование устройств и процессов FDM печати. Также проводился литературный обзор, включающий анализ научной литературы и исследований по данной теме. Комплексное применение этих методов позволило получить всестороннее представление о проблемах, возникающих при производстве изделий методом FDM(FFF) 3D печати.

### Основная часть

Несмотря на кажущуюся простоту концепции FFF (Fused filament fabrication), более известную как FDM (Fused Deposition Modeling) печати, характеризующейся послойным нанесением термопластичных нитей, данный процесс сопряжен со множеством проблем, возникающих на различных этапах. История аддитивных технологий началась задолго до их применения в 3D печати, в частности, самом распространённом на данный момент виде – FDM, популярном благодаря своей доступности конечному потребителю и потенциальным возможностям [1, 2]. Для более глубокого понимания основ механизма FDM печати

целесообразно провести сравнительный анализ с ранее существующими аналогичными по принципу действия технологиями.

Рассмотрим шариковую ручку как пример 2D аддитивного процесса. В обоих случаях нанесение материала происходит в заданной последовательности и в определенных местах. В ручке этот процесс управляет движениями руки пишущего человека, тогда как в FDM принтере за движениями печатающей головки следит компьютерная система управления с числовым программным обеспечением.

Сравнительный анализ показывает, что основное отличие FDM печати заключается в уровне технологического контроля. Здесь решающую роль играют программное обеспечение и алгоритмы, обеспечивающие высокую точность и повторяемость процесса [3]. В отличие от моторики и навыков человека, от которых зависит рукописный процесс, управление 3D печатью осуществляется посредством компьютерных систем, что позволяет исключить человеческий фактор при выполнении операции и достичь высокой степени автоматизации. Дополнительные различия проявляются в используемом сырье. В FDM печати применяются разнообразные материалы, включая термопластики, металлы, керамику, композиты и биоматериалы, письмо ручкой ограничено чернилами или пастой.

Современные шариковые ручки отличаются высокой надежностью за счет своей простоты и закрытости конструкции, что позволяет им демонстрировать стабильные результаты при соблюдении условий эксплуатации, таких как температура, влажность и тип поверхности для письма. 3D принтеры, напротив, представляют собой сложные системы с гораздо большим числом возможных мест отказа, включающие в себя не только механические элементы системы, но и сложные электронные компоненты и программное обеспечение. Процессы калибровки, настройки температуры экструдера, последовательность охлаждения и затвердевания материала, адгезии слоев являются зонами потенциального риска, которые требуют точной координации и систематического контроля результатов. При этом, учитывая широкий диапазон применяемых материалов, каждый из которых требует индивидуального подхода, вероятность возникновения неисправностей существенно возрастает.

Таким образом, переход от 2D к 3D технологиям обусловил не только усложнение устройства, но и увеличение количества специфических проблем, связанных с особенностями каждого конкретного материала и технологического процесса.

Причины возникновения всех типов дефектов [4] можно условно разделить на несколько категорий, они также могут сочетаться, приводя к разнообразным комбинациям-подвидам, однако в подавляющем большинстве случаев вызваны следующими причинами:

### *1. Проблемы, связанные непосредственно с устройством принтера*

#### *1.1. Механика и кинематика*

- Недостаточная жесткость конструкции. На данный момент в основном такая проблема проявляется в случае самодельных устройств, однако при неправильной сборке принтеров, которые поставляются в разобранном состоянии, жесткость, закладываемая производителем, также не будет достигнута.

- Износ деталей. Независимо от типа кинематической системы 3D-принтера, самыми массовыми из которых являются CoreXY, Cartesian и Delta, в них используются компоненты, подверженные износу. Эти детали можно разделить на две группы. Первая группа включает компоненты, практически не подверженные существенному износу при условии изготовления их с высокой точностью и своевременному применению смазочных материалов при эксплуатации: рельсовые слайдеры, валы, профили, шарико-винтовые передачи, подшипники и передающие шестерни. Вторая группа включает приводные ремни и колеса направляющих, изготавливающихся преимущественно из эластомеров, склонных к постепенному растяжению и истиранию (см. рисунок 1). Даже небольшое механическое несоответствие может приводить к значительным погрешностям в точности, непосредственно влияя на качество печати.

#### *1.2. Экструдер (вместе с подающим механизмом)*

- Засорение сопла может быть следствием таких причин как наличие на поверхности филамента загрязнений, слишком низкая температура печати для выбранного материала, помехи в подающей трубке (в основном встречается в боуден системах), близкое расположение сопла к подающей трубке (в случае высоких для материала трубки температур, например, превышение 250 °C для изделий из ПТФЭ), близкое расположение к печатному

столу. Вместе с этим естественный износ сопла [5] может также влиять на конечную размерную точность изделий, особенно при частом применении композитных материалов [6].

- Перегрев материала (см. рисунок 2). Несмотря на то что производитель указывает температурный диапазон расплавления пластика, зачастую разница между этими значениями довольно велика и в итоге в рамках разных партий конечные характеристики могут различаться, вследствие этого откалиброванные параметры на одном и том же пластике могут различными.



*Рисунок 1 – Пример дефекта печати вызванный: недоехструзией, захевыванием эластомера, высокой скоростью ретрактов (фото авторов)*



*Рисунок 2 – Пример дефекта печати вызванный: высокой температурой, большим значением толщины слоя, пропусками шагового двигателя, переэкструзией (фото авторов)*

- Несоответствующее охлаждение экструдера, которое в основном появляется при модификации принтера на более производительные хотенды, в таких случаях могут образовываться пробки (широкие наплавления на пруток пластика) из-за повышенной температуры в не предназначеннном для этого участке подачи пластика.

- Недостаточная точность подачи материала. Наиболее сильно данный дефект прослеживается при печати эластомерами, однако при определенных условиях он может появляться и на других, менее эластичных типах пластика. Происходит это из-за неплотного примыкания подающей шестерни, неточного её изготовления или износа, большого зазора между шестерней и входом в хотенд.

### *1.3. Обдув печатающей головы и стола*

- Неэффективное охлаждение может приводить не только к проблемам печати консолей и мостов, но и к потере детализации без достаточного ограничения минимального времени печати слоя. В результате страдают качество и точность деталей, что может потребовать дополнительной доработки или повторной печати.

- Неравномерный обдув слоев часто вызван неправильным расположением вентиляторов или некорректными программными настройками по его управлению в зависимости от обдуваемой части модели. Это приводит к тому, что одни части модели могут охлаждаться быстрее других, вызывая деформацию и сокращение общей точности печати.

- Паразитный обдув или сквозняк. В открытых или неплотно закрытых принтерах воздух может свободно циркулировать, воздействуя на зону печати, вызывая тем самым неравномерное охлаждение печатаемого изделия. Это может быть особенно заметно при печати крупных объектов, в условиях большой разницы между температурой печати и температурой окружающей среды, при применении обдува на уровне стола.

- Неподходящий обдув. Вентиляторы охлаждения или выводящие воздуховоды могут быть установлены таким образом, что воздух не только охлаждает печатаемую деталь, но и попадает в горячую зону экструдера, вызывая нестабильное плавление пластика. Это может привести к засорению сопла, непостоянной подаче материала и, как следствие, к ухудшению качества печати.

- Избыточное охлаждение. Слишком интенсивное охлаждение может вызвать быстрое затвердевание слоя, что приведет к проблемам при адгезии следующих слоев и уменьшению общей прочности модели. На первый взгляд это немного противоречит пункту о недостаточном охлаждении, однако в таких случаях необходимо найти баланс между достаточным охлаждением для поддержания качества, избегая перегрева, но при этом не переохлаждать изделие.

### 1.4. Вычислительная часть принтера

- Слабые вычислительные мощности. Недостаточные вычислительные ресурсы могут приводить к проблемам обработки команд при высоких скоростях печати. Это может быть выражено в задержках, некорректной интерпретации G-кода и, как следствие, снижению качества печати, возникновению артефактов и увеличению времени печати отдельных деталей. В некоторых случаях принтер может вообще не справляться с задачей, прерывая работу.

- Проблемы с флеш-памятью возникают из-за большой нагрузки на запоминающее устройство. Зачастую с него в течение всего времени печати считываются команды, что значительно ускоряет износ флеш-памяти. Это приводит не только к очевидным проблемам, таким как потеря текущих данных, но и к кратковременным сбоям в процессе печати, что является сложно диагностируемой проблемой [7]. После определенного числа циклов чтения/записи флеш-память может полностью выйти из строя, требуя замены.

- Перегрев процессора и драйверов шаговых двигателей. Большие вычислительные нагрузки или коммутируемые токи могут вызывать значительное тепловыделение. Неэффективная система охлаждения компонентов данной части может привести к перегреву, что приводит к сбоям в работе.

- Отсутствие резервирования и дублирования данных. При этом теряются данные при сбоях питания, что может привести к необходимости повторного запуска задачи по печати с самого начала.

### 2. Проблемы материала

- Плохое качество исходного материала может вызывать проблемы с адгезией между слоями, приводить к снижению прочности и долговечности изделия. Это происходит за счет примесей или недостаточно равномерного распределения добавок.

- Разнородность структуры и размеров. Нестабильные размеры прутка филамента [8] могут приводить к нестабильному потоку материала через экструдер, что вызывает неоднородность нанесения и дефекты в структурном строении печатных объектов [9] (см. рисунок 3).

- Наличие влаги. Влага в филаменте может вызывать пузыри и трещины в структурных элементах печати, что приводит к снижению механических свойств и качества поверхности [10]. Для устранения этих проблем требуется контроль условий хранения и специальная предварительная сушка материалов для печати.

- Катушки готового для печати материала имеют собственный срок годности, после которого они зачастую становятся хрупкими, что непосредственно влияет на процесс экструзии и формирование печатного слоя. Однако старение некоторых видов филамента может также быть ускорено под воздействием света и кислорода.

### 3. Проблемы модели для печати

- Ошибки полигонации. Модели с слишком высоким количеством полигонов увеличивают время нарезки слайсером, а также приводят к увеличению количества команд в исполняемом файле, что нагружает вычислительные и кинематические мощности принтера, снижая итоговую производительность. С другой стороны, модели с недостаточным количеством полигонов могут иметь грубые, угловатые поверхности, что может ухудшать внешний вид изделия. При необходимости модели следует детализировать до уровня, который соответствует возможностям применяемого принтера и материалу.

- Внутренние дефекты, такие как пересекающиеся поверхности, незамкнутые контуры, разрывы сетки и двойные вершины, могут вызвать ошибки в процессе генерации слоев. Они, в свою очередь без дополнительной коррекции, приводят к пропускам в печати или созданию структурных слабых мест в модели.

- Проблемы с оптимизацией и ориентацией модели. Неправильная ориентация модели на платформе может приводить к большему количеству поддержек, увеличивая не только расход материала и время печати, но и процент площади соприкосновения их с основным напечатанным изделием. Правильное расположение модели, учитывающее минимальное количество поддержек, позволяет улучшить качество поверхности и уменьшить последующую обработку изделия. Модели со сложными геометрическими элементами [11], такими как перекрывающиеся части или сильно переплетенные структуры, могут вызвать сложности при нарезке и печати. Разделение модели на более простые, легко печатаемые компоненты и последующая их сборка могут значительно улучшить результат.

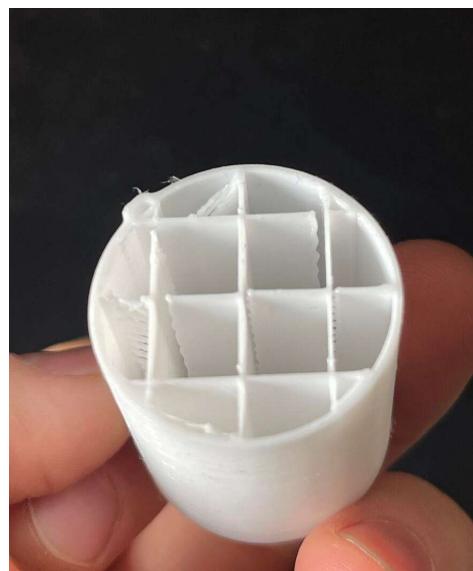
- Нечеткие или тонкие стенки после печати могут оказаться физически непрочными или даже не пропечататься. Проверка и увеличение толщины стенок, если это необходимо, обеспечивает структурную целостность и надежность готового изделия.

#### 4. Проблемы программ для слайсинга модели

- Ошибки в программном обеспечении для слайсинга могут вызывать некорректную генерацию G-кода за счёт неправильной интерпретации геометрических особенностей модели, что приводит к дефектам печатной продукции. Некоторые баги могут привести к неэффективным путям движения печатающей головы, увеличивая время печати и расход материала. Ошибки в генерации поддержек могут привести к сложностям при их последующем удалении или недостаточной поддержке соответствующих элементов модели.



*Рисунок 3 – Пример дефекта печати вызванный: некорректной температурой стола, высокой скоростью печати, загрязнением стола, некорректным значением потока (фото авторов)*



*Рисунок 4 – Пример дефекта печати вызванный: неправильным выбором заполнения, большой скоростью ретракта, недостаточным процентом перекрытия стенок (фото авторов)*

- Современные программы для слайсинга могут требовать значительных ресурсов компьютера для обработки сложных моделей. Если оборудование не соответствует требованиям, это может привести как к длительному времени нарезки сложных моделей, так и к ошибкам и сбоям при генерации G-кода в случае недостатка памяти или вычислительной мощности.

- Неправильные настройки при слайсинге модели. Наиболее критичные параметры, которые могут вызывать наибольшее число дефектов: скорость печати, ускорение, рывок, высота слоя, температура печати начального слоя и во время основной печати, ретракт, процент заполнения и перекрытия с оболочкой (см. рисунок 4).

Ошибки в данных параметрах могут приводить не только к визуальным дефектам, но и существенно влиять на физико-механические свойства конечного изделия.

#### Заключение

В рамках проведенного исследования удалось выявить и систематизировать причины проблем и дефектов, возникающих при изготовлении изделий с использованием FDM/FFF технологий. На основании полученных данных можно заключить, что для повышения надежности и качества печати требуется комплексный подход, включающий постоянную диагностику и соответствующее улучшение механических составляющих принтера, оптимизацию системы охлаждения под конкретные задачи, исследование качества используемых материалов и соответствующие калибровки с последующим внесением поправок в параметры программ для нарезки модели. Такой подход не только позволит минимизировать риск возникновения дефектов, но и повысит общую эффективность и производительность аддитивного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко, Е.В., Селина, О.А., Семиохина, Е.А. 3D-принтер – технология настоящего и будущего // Сб. статей студ. научно-практ. конф. ф-та агротехники и энергообеспечения кафедры инженерной графики и механики, ОрелГАУ, 2017. – С. 235-239. [электронный ресурс].
2. Мищенко, Е.В., Мищенко, В.Я. Особенности преподавания курса «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 3 (329). 2018. – С. 99-102.
3. Савицкий, В.В., Голубев, А.Н., Быковский, Д.И. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – № 2 (35). – С. 52-61.
4. Измайлов, Д.В. Анализ дефектов поверхности изделия при 3D-печати по их изображениям с использованием методов машинного обучения / Д.В. Измайлов, Д.А. Дрыгин, К.В. Ежова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 552-559. – DOI 10.17586/2226-1494-2020-20-4-552-559. – EDN PORIJQ.
5. Загидуллин, Р.С. Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента / Р.С. Загидуллин, В.Д. Жуков, Н.В. Родионов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 265-271. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-3-265-272. – EDN JZIALA.
6. Зверовщиков, А.Е. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати / А.Е. Зверовщиков, Д.А. Шелахаев, С.А. Нестеров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 66-78. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-6. – EDN OIPNJE.
7. Тигнибидин, А.В. Использование аддитивных технологий при прототипировании. Контроль геометрических характеристик детали из пластика ABS для определения исходных размеров для печати / А.В. Тигнибидин, С.В. Такаюк // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 57-65. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-2-57-65. – EDN YNVRGH.
8. Зименко, К.В. Контроль динамики экструзии при трехмерной печати изделий / К.В. Зименко, М.Я. Афанасьев, М.В. Колесников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 5. – С. 929-940. – DOI 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940. – EDN DCDMHK.
9. Влияние абразивного износа на геометрические параметры экструзионных сопел при печати композитными материалами методом послойного наплавления / Д.Ю. Финогеев, Д.А. Макаров, И.В. Головченко, О.П. Решетникова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (93). – С. 53-58. – EDN UBVCKO.
10. J. Liao, Z. Shen, G. Xiong, C. Liu, C. Luo and J. Lu, "Preliminary Study on Fault Diagnosis and Intelligent Learning of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printer," 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xian, China, 2019, pp. 2098-2102, DOI: 10.1109/ICIEA.2019.8834376.
11. Ивашкова, К.П. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати / К.П. Ивашкова, А.Н. Филиппов, Е.А. Копасов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 426-430. – DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-5-426-430. – EDN YNUGND.

**Мищенко Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»  
302020, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69  
кандидат технических наук, доцент  
Тел. 8-953-623-22-45  
E-mail: art\_lena@inbox.ru

**Король Владимир Вячеславович**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
кандидат биологических наук, доцент  
Тел. 8-953-624-00-62  
E-mail: vvking@ya.ru

**Асонов Дмитрий Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»  
302020, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69  
аспирант  
Тел.: +3-7529-860-32-43  
E-mail: asdmitrij@mail.ru

---

MISHCHENKO E.V., ASONOV D.G., KOROL V.V.

## CAUSES OF DEFECTS AND PROBLEMS IN THE PRODUCTION OF FDM (FFF) 3D PRINTING PRODUCTS

**Abstract.** This article is an analysis of the problems encountered in FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing. The authors aim to systematize the existing problems in the FDM printing process by examining common defects and their causes, as well as comparing this method with other additive technologies. The main topics of the article include, an overview of additive technologies, technical aspects of FDM printer operation, analysis of FDM printing defects related to both equipment, materials, models and software. The authors raise a number of important issues concerning

the reliability and quality of FDM printing results, consider how mechanical design and wear and tear of printer parts affect print quality. Particular attention is given to problems that can occur in the extruder and feeder. In addition, how the cooling of the print head and table affects the printing process is discussed. The authors also analyze when significant computational resources are required for efficient printer operation. Problems at the model and program level for slicing and how to avoid them are discussed.

**Keywords:** FDM (FFF) 3D printing, 3D printing defects, layer adhesion, filament problems, printer device problems.

## BIBLIOGRAPHY

1. Mishchenko, E.V., Selina, O.A., Semenikhina, E.A. 3D-printer – tekhnologiya nastoyashchego i budushchego // Sb. statej stud. nauchno-prakt. konf. f-ta agrotekhniki i chergoobespecheniya kafedry inzhenernoj grafiki i mekhaniki, OrelGAU, 2017. – S. 235-239. [ehlektronnyj resurs].
2. Mishchenko, E.V., Mishchenko, V.YA. Osobennosti prepodavaniya kursa «Detali mekhatronnykh modulej, robotov i ikh konstruirovaniye» // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. № 3 (329). 2018. – S. 99-102.
3. Savickij, V.V., Golubev, A.N., Bykovskij, D.I. Issledovanie vliyaniya parametrov 3D-pechati na razmernuyu tochnost izdelij // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2018. – № 2 (35). – S. 52-61.
4. Izmajlov, D.V. Analiz defektov poverhnosti izdeliya pri 3D-pechati po ikh izobrazheniyam s ispolzovaniem metodov mashinnogo obucheniya / D.V. Izmajlov, D.A. Drygin, K.V. Ezhova // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2020. – T. 20, № 4. – S. 552-559. – DOI 10.17586/2226-1494-2020-20-4-552-559. – EDN PORIJQ.
5. Zagidullin, R.S. Ehksperimentalnoe issledovanie i sposob povysheniya kachestva FDM 3D-pechati za schet nivelirovaniya variabelnosti diametra prutka filimenta / R.S. Zagidullin, V.D. Zhukov, N.V. Rodionov // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – № 3. – S. 265-271. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-3-265-272. – EDN JZIALA.
6. Zverovshchikov, A.E. Issledovanie tochnosti razmerov, obespechivaemykh tekhnologij 3D-pechati / A.E. Zverovshchikov, D.A. Shelakhaev, S.A. Nesterov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki. – 2019. – № 1 (49). – S. 66-78. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-6. – EDN OIPNJE.
7. Tignibidin, A.V. Ispolzovanie additivnykh tekhnologij pri prototipirovani. Kontrol geometricheskikh kharakteristik detali iz plastika ABS dlya opredeleniya iskhodnykh razmerov dlya pechati / A.V. Tignibidin, S.V. Takayuk // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2018. – T. 6, № 2. – S. 57-65. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-2-57-65. – EDN YNVRGH.
8. Zimenko, K.V. Kontrol dinamiki ehkstruzii pri trekhmernoj pechati izdelij / K.V. Zimenko, M.YA. Afanasev, M.V. Kolesnikov // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2022. – T. 22, № 5. – S. 929-940. – DOI 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940. – EDN DCDMHK.
9. Vliyanie abrazivnogo iznosa na geometricheskie parametry ehkstruzionnykh sopl pri pechati kompozitnymi materialami metodom poslojnogo naplavleniya / D.YU. Finogeev, D.A. Makarov, I.V. Golovchenko, O.P. Reshetnikova // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2 (93). – S. 53-58. – EDN UBKCKO.
10. J. Liao, Z. Shen, G. Xiong, C. Liu, C. Luo and J. Lu, "Preliminary Study on Fault Diagnosis and Intelligent Learning of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printer," 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xian, China, 2019, pp. 2098-2102, DOI: 10.1109/ICIEA.2019.8834376.
11. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. – 2017. – T. 60, № 5. – S. 426-430. – DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-5-426-430. – EDN YNUGND.

**Mishchenko Elena Vladimirovna**

Orel State Agrarian University named after N.V. Parakin,  
302020, Orel, General Rodina street, 69,  
candidate of technical sciences, assistant professor  
tel. 8-953-623-22-45  
E-mail: art\_lena@inbox.ru

**Korol Vladimir Vyacheslavovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
302026, Orel, Komsomolskaya street, 95  
candidate of biological sciences, assistant professor  
tel. 8-953-624-00-62  
E-mail: vvking@ya.ru

**Asonov Dmitry Gennadievich**

Orel State Agrarian University named after N.V.  
Parakin,  
302020, Orel, General Rodina street, 69,  
postgraduate student  
Tel.: +3-7529-860-32-43  
E-mail: asdmmitrij@mail.ru

КАРФИДОВ А.О., ГОРБАТЮК С.М., ИБРАГИМОВА А.А.

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ЦИНКОВАНИЕМ

**Аннотация.** В статье рассматриваются виды и причины коррозии, и факторы влияния на скорость окисления и усиление коррозии. Рассмотрены причины необходимости в защите от коррозии. Описаны области промышленности, в которых используется цинкование для защиты от коррозии. Рассмотрены эксплуатационные свойства и область применения изделий, для которых подходят различные методы цинкования. Рассматриваются современные методы цинкования и их технологический особенности, преимущества и недостатки. Лидером методов цинкования на текущий момент является горячее цинкование. Рассмотрено перспективное направление защиты от коррозии – термодиффузионное цинкование, находящееся в начале пути исследования способов повышения эффективности технологического процесса. Основными подходами эффективизации определены подбор параметров воздействия при обработке, модернизация оборудования, а также изучаются возможности включения добавок в состав порошка.

**Ключевые слова:** коррозия металлов, антакоррозийная защита, виды цинкования, покрытия поверхности, термодиффузионное цинкование.

### Введение

Коррозия металлов: причины возникновения и необходимость защиты.

Коррозией называется процесс разрушения металлических материалов под воздействием окружающей среды. В результате этого процесса металл теряет свои первоначальные свойства, что может привести к выходу из строя конструкций и оборудования.

Коррозия - это разрушительное воздействие материала в результате реакции с окружающей средой и естественная потенциальная опасность, связанная с объектами добычи и транспортировки нефти и газа. Практически любая водная среда может способствовать коррозии, которая возникает в многочисленных сложных условиях при добыче, переработке нефти и газа и в трубопроводных системах [1]. Этот процесс состоит из трех элементов: анода, катода и электролита. Анод - это место, где корророзирует металл, электролит - это агрессивная среда, которая обеспечивает передачу электронов от анода к катоду, а катод образует электрический проводник в элементе, который не расходуется в процессе коррозии [2].

Выделяют следующие причины коррозии.

Химическая коррозия – происходит при взаимодействии металла с агрессивными химическими веществами (кислоты, щелочи, соли).

Электрохимическая коррозия – возникает при контакте металла с электролитом (вода, влажная среда), когда образуются гальванические пары.

Атмосферная коррозия – результат воздействия атмосферных условий (влажность, температура, загрязнение воздуха).

Биологическая коррозия – разрушение металла под влиянием микроорганизмов.

Механохимическая коррозия – сочетание механического износа и химического воздействия.

Основной причиной коррозионного разложения металлов и сплавов являются процессы электрохимических или химических реакций на их поверхности. Скорость и характер коррозионного процесса зависят от ряда факторов, указанных на рисунке 1. Внешние факторы связаны с составом коррозионной среды и условиями коррозии (температура, давление, скорость). Внутренние факторы, обозначенные в таблице 1, связаны с составом и структурой металла, внутренними напряжениями и характером обработки поверхности [3].

Температура оказывает значительное влияние на скорость коррозии; чем выше температура, тем быстрее окисляются металлы, показано на рисунке 2. Состав оксидной пленки меняется в зависимости от температуры. Колебания температуры, особенно попеременное нагревание и охлаждение, увеличивают скорость окисления металлов (например, железа и стали), поскольку оксидная пленка трескается и отделяется от металла. Состав газовой среды оказывает значительное влияние на скорость коррозии различных металлов и изменяется в зависимости от температуры [3].



Рисунок 1 – Факторы влияния на скорость коррозии

Таблица 1 – Влияние примесей на коррозию [4]

Легирующие элементы	Влияние на скорость окисления
C (>800 °C)	Чем выше концентрация карбона в стали, тем ниже скорость окисления. Аустенитная структура ( $\gamma$ Fe+C, решетка кубическая гранецентрированная) более жаростойкая, чем ферритная структура ( $\alpha$ Fe+C, решетка кубическая объемоцентрированная). Двуфазные стали образуют пленки с большим внутренним напряжением.
S, P, Ni, Mn	Практически не влияют на высокотемпературное окисление железа.
Ti, Cu, Co, Be	Незначительно снижают скорость коррозии
Cr (до 30 %), Al (до 10 %), Si (до 5 %)	Значительно замедляют скорость окисления железа вследствие образования на поверхности качественных защитных пленок, повышают жаростойкость
V, W, Mo	Значительно ускоряют окисление стали при высокой температуре вследствие летучести и легкоплавкости их оксидов.

Последствия коррозии: уменьшение прочности и долговечности конструкций; повышенный риск аварийных ситуаций; увеличение затрат на ремонт и замену оборудования; потеря эстетической привлекательности изделий.

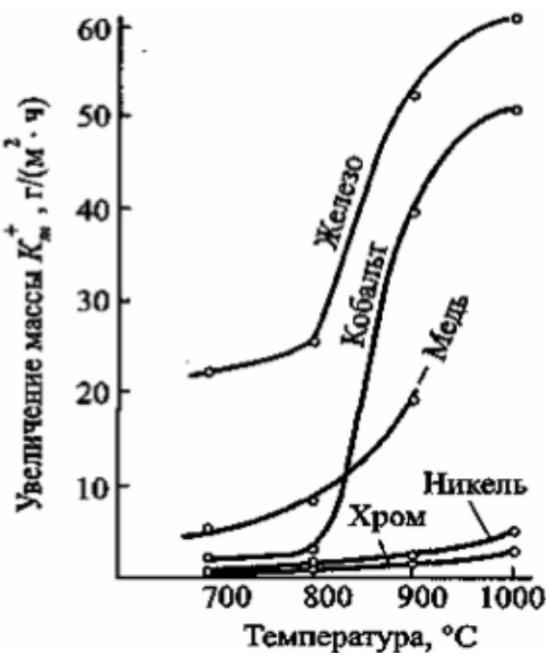


Рисунок 2 – Скорость окисления некоторых металлов в атмосфере кислорода [5]

Методы защиты от коррозии:

- покрытие защитными слоями – нанесение лакокрасочных покрытий, антикоррозийных грунтов, использование полимерных пленок;
- катодная защита – применение анодов для создания электрического поля, защищающего металл.
- ингибиторы коррозии – добавление химических веществ, замедляющих процессы окисления.
- изменение состава сплавов – легирование металлов для повышения их устойчивости к коррозии;
- контроль за условиями эксплуатации – поддержание оптимальных параметров влажности, температуры и чистоты окружающей среды.

Следует отметить, что своевременное выявление и предотвращение процессов коррозии является важной задачей для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации различных объектов и сооружений.

#### Защита цинком: область применения и эксплуатационные свойства

Защита цинком применяется в широком спектре промышленных отраслей, включая машиностроение, строительство, автомобилестроение, энергетику и судостроение. Этот метод особенно востребован при производстве металлоконструкций, которые эксплуатируются в условиях повышенной влажности, агрессивных сред или под воздействием механических нагрузок.

В каких областях применяется оцинковка:

- строительство. Применяется для защиты строительных материалов от влияния окружающей среды. Часто цинковое покрытие наносится на металлическую кровлю, водостоки, ограждения и несущую конструкцию;
- инструменты и расходные материалы. Хомуты, болты, гайки, гвозди и металлические крепления – все это изготавливается с использованием цинка;
- пищевая промышленность. Используется для создания безопасных и гигиенических поверхностей на упаковке и оборудовании, которое контактирует с едой;
- медицина. Часто применяется в покрытии медицинских инструментов или имплантатов для предотвращения инфицирования людей и защиты оборудования;
- архитектура и дизайн. Создает эстетически привлекательные поверхности на металлических элементах зданий и конструкций;
- электротехническая промышленность. Используется для защиты электрических контактов и компонентов от коррозии и высоких температур.

Цинкование обеспечивает следующие эксплуатационные преимущества:

- коррозионная стойкость. Цинк образует на поверхности металла защитный слой, который предотвращает контакт основного материала с окружающей средой, тем самым защищая его от коррозии;
- долговечность. Покрытие цинком значительно увеличивает срок службы металлических изделий, что позволяет снизить затраты на их обслуживание и замену;
- механическая прочность. Цинковое покрытие обладает высокой адгезией к основному металлу, что делает его устойчивым к механическим повреждениям и истиранию;
- экологическая безопасность. Процесс цинкования не требует использования токсичных веществ, что делает его экологически безопасным методом защиты металлов;
- экономичность. По сравнению с другими методами анткоррозийной обработки, цинкование является относительно недорогим и эффективным способом защиты металлов.

Таким образом, защита цинком представляет собой эффективный и экономичный способ обеспечения долговечности и коррозионной стойкости металлических изделий в различных отраслях промышленности.

Цинкование является одним из наиболее распространенных методов защиты металлических изделий от коррозии. Однако данный процесс имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение в определенных условиях.

Ограниченнная стойкость при воздействии агрессивных сред. Цинковое покрытие может быть недостаточно эффективным в средах с высокой концентрацией кислот, щелочей или солей. В таких условиях слой цинка быстро разрушается, что приводит к снижению защитных свойств покрытия.

Низкая адгезия к некоторым металлам (например, алюминиевых сплавах) – цинк плохо сцепляется с поверхностью, что снижает долговечность защитного слоя. Это требует дополнительных мер по подготовке поверхности перед нанесением покрытия.

Сложность нанесения равномерного слоя – при цинковании сложно добиться идеально ровной толщины покрытия на всей поверхности изделия. Это особенно актуально для сложных геометрических форм, где могут возникать участки с недостаточной защитой.

Стоимость процесса цинкования может быть значительной, особенно если требуется нанесение толстого слоя покрытия. Это делает данный метод экономически невыгодным для массового применения в ряде отраслей.

Риск образования трещин и отслаивания – при эксплуатации в условиях значительных механических нагрузок или температурных колебаний существует риск появления трещин и отслаивания цинкового покрытия, что ведет к потере его защитных функций.

Метод цинкования имеет свои преимущества и свои ограничения и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе способа анткоррозийной защиты.

### **Современные методы цинкования**

В настоящее время существует несколько методов нанесения цинкового покрытия на металлические поверхности, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества. Ниже описаны методы по принципу возрастания их актуальности и перспективности.

Холодное цинкование осуществляется путём нанесения тонкого слоя цинка на поверхность изделия, как показано на рисунке 3. Процесс включает в себя использование специальных оцинковочных составов, которые наносятся на поверхность металла с помощью кисти, валика или покрасочного пистолета.

Как проводится:

- подготовка поверхности. Проводится удаление загрязнений, ржавчины, масла и окислов. Поверхность металла очищается от оксидов и других загрязнений с помощью щелочной или кислотной бани. Этот процесс помогает обеспечить хорошую адгезию цинкового покрытия;

- нанесение цинкового покрытия. Для обработки поверхности применяется рабочий состав, который включает цинксодержащую краску и цинк с добавлением полимеров различного происхождения. Согласно требованиям межгосударственных стандартов, содержание цинка в рабочем составе должно быть не менее 95%;

- сушка. После нанесения цинкового слоя заготовка подвергается сушке. Холодное цинковое покрытие затвердевает естественным образом без дополнительного охлаждения.

Слой цинка, полученный в процессе холодного цинкования, тоньше по сравнению с горячим методом. Однако бесспорным преимуществом метода является его технологическая

простота: для нанесения покрытия не требуется применение сложных аппаратов и дорогих инструментов. Также холодная оцинковка используется для защиты малых деталей гаечных втулок, гаек, болтов и других подобных предметов.



*Рисунок 3 – Холодное цинкование [6]*

Горячее цинкование – этот метод предполагает погружение изделия в ванну с расплавленным цинком при температуре около 450 °С. В результате химической реакции образуется слой цинка, который прочно сцепляется с поверхностью металла. Данный способ, показанный на рисунке 4, обеспечивает высокую коррозионную стойкость и долговечность покрытия.



*Рисунок 4 – Горячее цинкование [6]*

Как проводится:

- подготовка поверхности. Заготовка подвергается механической и химической очистке – удаляется ржавчина, загрязнения и жир. Затем она обрабатывается флюсом для улучшения адгезии цинкового слоя;
- погружение. Оптимальная технология горячего цинкования металла предусматривает поддержание изделия в ванне с расплавом в течение 3-10 минут. Важно отметить, что в процессе цинкования на поверхности расплава в ванне может образоваться слой шлака. Перед подъемом изделия шлак тщательно удаляют при помощи специального скребка.
- реакция. При опускании заготовки в ванну с горячим цинком происходит химическая реакция, которая приводит к образованию слоев интерметаллического соединения цинк-железо;
- охлаждение. Заготовка извлекается из ванны и охлаждается. Цинковое покрытие начинает окисляться и превращается в оксид цинка. Этот оксид реагирует с углекислым газом

из воздуха и образует слой карбоната цинка, который дополнительно защищает изделие от коррозии.

Горячее цинкование применимо для изделий любого размера и конфигурации – деталей стальных конструкций, труб и листов. Одно из преимуществ горячей оцинковки состоит в том, что слой цинка получается более равномерным и прочным по сравнению с холодным методом.

Поскольку горячее цинкование является процессом обработки поверхности, важно понимать, как оно влияет на усталостную прочность стали. Более того, новые высокопрочные стали, такие как двухфазные и TRIP-стали, содержат высокий уровень легирующих элементов, таких как Si, Mn, Al и Cr, которые являются поверхностно-активными и могут легко окисляться при сегрегации на поверхности подложки во время процесса цинкования [7].

Гальваническое (электролитическое) цинкование.

Процесс заключается в нанесении слоя цинка на металл посредством электролиза. Изделие помещается в раствор солей цинка, через который пропускают электрический ток. Цинк осаждается на поверхности металла, образуя защитное покрытие. Этот метод позволяет получить тонкий и равномерный слой цинка, как показано на рисунке 5.



Рисунок 5 – Гальваническое цинкование [6]

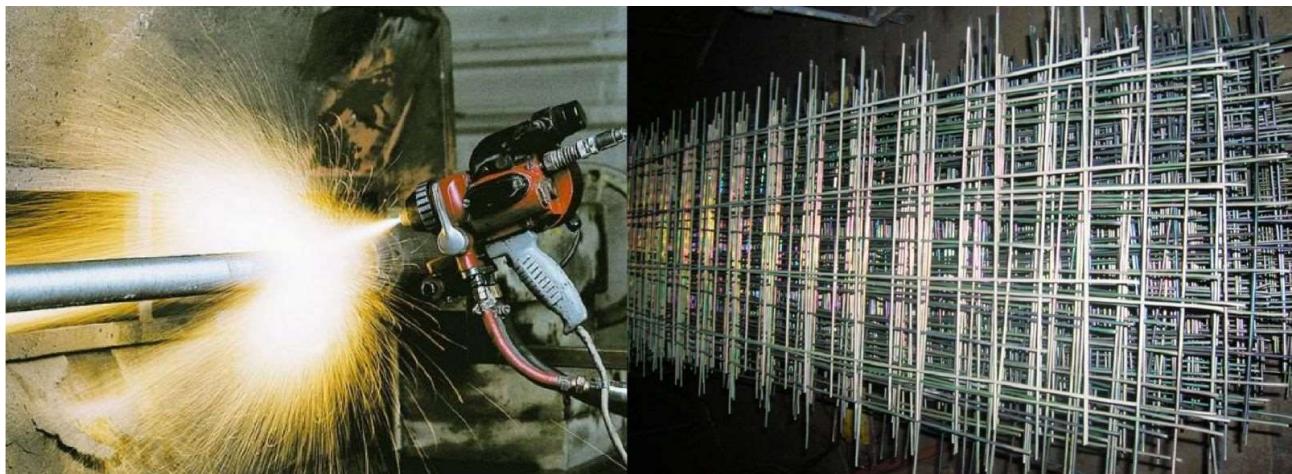
Сцепление металла покрытия с металлом детали обуславливается их межмолекулярным взаимодействием. Межмолекулярные силы заметно проявляются, только если расстояние между атомами составляет не более  $5 \times 10^{-5}$  мкм. Они убывают пропорционально третьей степени межатомного расстояния. Покрываемым поверхностям придают необходимую шероховатость. С них удаляют различные загрязнения, жировые и оксидные пленки. Металл осаждается на активном чистом катоде, свободном от чужеродных частиц. В результате покрытие физически сращивается с основным металлом настолькоочно, что не отслаивается от детали даже при ее разрушении, и работает как одно целое с основным металлом. Нарушение технологии подготовки уменьшает его сцепляемость и может привести к отслаиванию от детали. Подготовка поверхностей деталей к электролитическому цинкованию заключается в их механической обработке, обезжиривании и травлении с промежуточными промывками [8].

Плюсы: стойкое, привлекательное защитное покрытие, размеры деталей остаются точными.

Минусы: подходит только для маленьких конструкций, после процедуры очень дорогая утилизация отходов, цену которой часто включают в стоимость процедуры цинкования.

Шероховатое цинкование – это относительно новый метод, основанный на использовании специальных химических составов, которые наносятся на поверхность металла перед процессом цинкования. Эти составы создают шероховатую структуру, что улучшает адгезию цинкового покрытия и увеличивает его прочность.

Газо-термическое цинкование методом напыления: в данном случае цинк наносится на поверхность металла путем распыления его частиц под высоким давлением. Метод показан на рисунке 6, применяется для крупных конструкций и позволяет быстро создать защитный слой на больших площадях.



*Рисунок 6 – Газо-термическое цинкование [6]*

Плюсы: можно наносить на большие конструкции, просто наносить, можно на месте эксплуатации конструкции, без перевозки.

Минусы: много требований к подготовке процедуры, выполнению процесса и недопущению деформации металлов, неравномерность покрытия, более высокая стоимость.

#### Термодиффузионное цинкование.

При этом изделие нагревается до высокой температуры в среде, содержащей цинк. Атомы цинка проникают в поверхностные слои металла, создавая прочное соединение. Термодиффузионное цинкование, показанное на рисунке 7 особенно эффективно для изделий сложной формы и труднодоступных мест.



*Рисунок 7 – Термодиффузионное цинкование [6]*

Термодиффузионная обработка металлических поверхностей цинком – относительно новый метод обработки металлоконструкций. Несмотря на это, технология термодиффузии получила широкое распространение в кругу профильных специалистов. Это обусловлено стабильными защитными свойствами и эксплуатационными характеристиками обработанных изделий.

Особенности технологии и сфера применения – данный способ обработки обеспечивает металлоконструкциям надежную антикоррозийную защиту, а также предупреждает преждевременный износ металла, как следствие – позволяет увеличить срок службы. В основе методики лежит процесс диффузии молекул металла, проводимый при температуре от 400 до 470 °С. За счет этого в поверхностный слой конструкции диффундируют молекулы легирующего вещества – цинка. Особенности процесса термодиффузии прописаны в

профильном стандарте – ГОСТ Р 9.316-2006 [9]. Применение данной технологии позволяет создать на поверхности металлоконструкций равномерный цинковый слой. Главной особенностью метода выступает то, что слой цинка является однородным даже на труднодоступных участках обрабатываемой детали (полости, отверстия и т.д.). Технологию термодиффузии обычно применяют для обработки следующих конструкций и деталей:

- оградительные конструкции для мостов и дорог;
- фурнитура, которая используется в мебельной промышленности;
- Арматура, используемая в нефтегазовой промышленности;
- арматура, которую используют для укрепления железнодорожных полотен;
- элементы трубопроводов, используемых при создании инженерных коммуникаций и арматура, которую используют в сфере строительства;
- элементы конструкций линий электропередач;
- отдельные детали автотранспортных средств.

С помощью термодиффузионного цинкования на металлоконструкциях удается создавать слой цинка минимальной толщины. Поэтому данной обработке допускается подвергать изделия, имеющие незначительные габариты. Стоит отметить, что обработка деталей при максимальном повышении температуры (до 470 °C) приводит к увеличению интенсивности процесса термодиффузии молекул цинка. Поэтому покрытие не приобретает необходимые эксплуатационные характеристики. Такое покрытие характеризуется низким уровнем антикоррозийной защиты, высокой хрупкостью и высоким уровнем отслаивания цинкового слоя.

Для создания цинкового покрытия необходимой толщины, которое будет обладать высокими защитными свойствами, важно провести ряд дополнительных мероприятий: очистка металла (пескоструйная, дробеструйная, химическая); создать абсолютную герметичность контейнера, в котором проводится термодиффузионное цинкование; в герметичном боксе следует создать инертную и восстановительную среду, поскольку в окислительной среде наносить цинковое покрытие нельзя.

В процессе нанесения цинкового покрытия целесообразно дополнительно добавлять в рабочую среду активаторы (специальные флюсующие элементы).

Процесс обработки проводится в несколько этапов: Очистка конструкции при помощи механического, химического или ультразвукового воздействия. Герметизация рабочего контейнера, создание и поддержание внутри бокса требуемой температуры (на уровне 450 °C). В зависимости от величины обрабатываемой площади и заданной толщины цинкового слоя детали содержат в боксе от 1 до 4 часов. В течение этого времени молекулы цинка испаряются и проникают в кристаллическую решетку металлической поверхности изделия. Обработанные детали извлекают из бокса, с их поверхности удаляют остатки частиц порошка, а затем моют. Для придания деталям декоративных свойств их подвергают пассивации.

Термодиффузионный метод обработки металла, в отличие от других технологий, имеет ряд очевидных преимуществ: Цинковое покрытие ложится равномерно, а поверхность приобретает хорошую адгезию и стабильные защитные качества. Технология является экономически выгодной, поскольку для ее применения не нужны крупные производственные площади, а затраты на электричество и трудозатраты минимальные. Поскольку диффузионная обработка проката проводится в герметичных боксах, эта технология характеризуется химической и токсической безопасностью, а также является экологически чистой. Более того, рабочий процесс исключает вероятность получения специалистами термических ожогов. Очистка поверхности изделий после обработки слоем цинка осуществляется без применения кислот и прочих химически агрессивных составов. Есть возможность регулировать толщину цинкового покрытия, причем – в широком диапазоне в зависимости от установленных требований. Отходы, которые образуются при термодиффузионном цинковании, легко поддаются утилизации, которая проводится по стандартной схеме, исключая опасность для здоровья человека. Диффузионное цинкование металлических поверхностей проводится на оборудовании, которое характеризуется простотой в управлении и обслуживании. В отличие от других технологий, применяемых для обработки металлоконструкций цинком, термодиффузионное покрытие проводится при щадящей температуре.

Сравнение методов цинкования приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение методов цинкования [10]

Параметры	Горячее цинкование с последующим центрифугированием	Гальваническое цинкование	Термодиффузионное цинкование
Температура процесса	от 450 °C до 540 °C	20 °C	от 290 °C до 400 °C
Толщина покрытие	30 ± 60 мкм	6-15 мкм	5 ± 100 мкм (через 5 мкм)
Материал, оцинковываемого изделия	Сталь (не предсказуемое с содержанием Si 0,05 + 0,15 % никеля Санделина)	Сталь (кроме высоколегированной)	Сталь, чугун, бронза, латунь, медь (всё без ограничений по хим. составу)
Крепеж	от M 10 до M 50	от M 4 до M 50	от M 4 до M 90 (возможно любой)
Отверстия в деталях:	сквозные	сквозные	любые отверстия, включая
В деталях:	отсутствие карманов, полные замкнутые сварные швы по контурам накладок	отсутствие карманов, желательны без сварных швов	Без ограничений
Высокопробная группа крепежа	Нет (отпуск металла)	Нет (кислотное травление, опасность возникновения водородного окрупчивания) [11]	Без ограничений при температуре отпуска выше 300 °C
Коррозионная стойкость в камере соляного тумана	480-500 часов	96 часов	До 1500 часов
Дуплексное покрытие	Низкая адгезия, высокоразглаженная подготовка	Низкая адгезия, высокоразглаженная подготовка	Высокая адгезия, стойкость в камере нейтрального соляного тумана до 2500 часов
Упрощение поверхности	Снижение твердости по сравнению с основой	отсутствует	Упрощение выше HRC на поверхности основы
Коэффиц. трения	Высокий, задира на крепеж, высокое усиление свинц.	низкий	Низкий, увеличение циклов свинцовых ниш, меньшее усилие свин.
Подготовка поверхности	Химическое травление	Химическое травление	Экологически чистое
Ведение процесса цинкования	«Белые дымы»	Присутствие CrV, III	Экологически чистое

Очевидно, что большинство элементов стальных конструкций, в том числе и закладные детали, можно и нужно защищать с помощью горячего или термодиффузионного цинкования, это наиболее надежные, простые и легкодоступные виды антикоррозионной обработки [12].

Каждый из перечисленных методов имеет свою область применения и технические характеристики, которые необходимо учитывать при выборе способа цинкования для конкретного проекта.

## Заключение

Ежегодно коррозия уничтожает 1/5 мирового производства черных металлов. Большая часть методов, используемых для защиты стали основана на образовании дополнительного изолирующего слоя между сталью и окружающей средой.

Обычные виды защитных покрытий хромирование, анодирование, покраска защищают сталь, создавая барьер между окружающей средой и защищаемым материалом.

В случае повреждения защитного слоя коррозия начинает развиваться и под слоем защитного покрытия. Подобный процесс происходит и в порах лакокрасочных плёнок, но цинк, выступающий анодом, продолжает предохранять сталь и после повреждения покрытия.

Цинк является приоритетным металлом для защиты от коррозии, применяемым для защиты стали от атмосферной коррозии. Около 70 % мировой добычи цинка потребляется для защиты черных металлов от коррозии.

Многообразие методов защиты металлов от коррозии обуславливается их относительной простотой, возможностью широкой механизации и автоматизации, высокими технико-экономическими показателями.

Лидирующие позиции при выборе метода цинкования занимает горячее цинкование в основном благодаря своим высоким декоративным характеристикам. Но прочность антакоррозионного покрытия и возможность обработки поверхностей сложной конфигурации у горячего цинкования при термодиффузионном цинковании не уступает характеристикам горячего цинкования.

Несмотря на эффективность горячего цинкования, диффузионное цинкование имеет несколько преимуществ. Диффузионное цинкование приводит к получению очень однородной толщины слоя, что позволяет покрывать детали неправильной формы и резьбовые детали. Благодаря более низкой температуре процесса по сравнению с горячим цинкованием диффузионное цинкование сохраняет функциональные свойства, такие как твердость. Кроме того, защитный слой, образованный диффузионным цинкованием, состоит исключительно из интерметаллических фаз Fe-Zn. Таким образом, для создания полностью легированных покрытий, как при гальваническом отжиге, не требуется никакой дополнительной термической обработки [13].

Термодиффузионное цинкование мало изучено и находится в начале пути исследования способов повышения эффективности технологического процесса. Основные подходы эффективизации – это подбор параметров воздействия при обработке, модернизация оборудования, а также изучаются возможности включения добавок в состав порошка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилецкая А.С. Проблемы коррозии при добыче нефти и газа и их устранение [Текст] / Пилецкая А.С. // International journal of Professional Science – 2024. - №3(2).- С. 54-60.
2. Коррозия и защита металлов. В 2 ч. Ч. 1 Методы исследований коррозионных процессов : учебно-методическое пособие/ Н. Г. Россина, Н. А. Попов, М. А. Жилякова, А. В. Корелин. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019 – 108 с.
3. Пазухин П.Ю., Романова Л.В. Влияние различных факторов на коррозию металлов [Текст] / П.Ю. Пазухин // Дни науки студентов ИАСЭ – 2024. Материалы научно-практической конференции. (Владимир, 18 марта – 05 апреля 2024 года). - Владимир, 2024.
4. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для студентов вузов / В. С. Кушнер, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова, В.А. Схиртладзе, А. С. Верещака; под ред. В. С. Кушнера. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – с. 447
5. Виды цинкования металлов: как защитить от коррозии? [Электронный ресурс] // Компания «Терапинк». URL: [https://terazinc.ru/tsinkovanie\\_metta\\_i\\_izdeliy/vidy\\_zinkovania\\_metallov/](https://terazinc.ru/tsinkovanie_metta_i_izdeliy/vidy_zinkovania_metallov/) (Дата обращения: 15.12.2024)
6. Влияние внутренних и внешних факторов на скорость газовой коррозии [Электронный ресурс] // StudFiles. Файловый архив студентов. URL: <https://studfile.net/preview/9051181/page:5/>
7. Shatumbu Thomas Alweendo, Motoaki Morita, Kayo Hasegawa, Shinichi Motoda, Effect of manufacturing-induced microscopic surface defects on crack initiation and fatigue mechanisms in hot-dip galvanized steel [Текст] / Shatumbu Thomas Alweendo // Results in Materials. – 2024. - № 23. – 10609.
8. Захаров, Ю.А. Совершенствование технологического процесса гальванического цинкования деталей транспортно-технологических машин и комплексов [Текст] / Ю.А. Захаров, И.А. Спицын, Е.В. Ремизов, Г.А. Мусатов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. - 2014. - №4(12). - С. 105-111.
9. ГОСТ Р 9.316-2006. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия термодиффузионные. Общие требования и методы контроля = Unified system of corrosion and ageing protection. Thermodiffusion zinc coatings. General requirements and control methods : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому № 2 (370) 2025 \_\_\_\_\_ 43

регулированию и метрологии от 21 сентября 2006 г. N 204-ст : введен взамен ГОСТ Р 51163-98 / разработан и внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 213 "Металлические и другие неорганические покрытия" и ТК 214 "Защита изделий и материалов от коррозии".

10. Технология гальванического цинкования [Электронный ресурс] // Компания «Точинвестцинк». URL: <https://t-zinc.ru/tekhnologiya-czinkovaniya/tekhnologiya-galvanicheskogo-czinkovaniya.html>

11. A. Khare, S.K. Dwivedi, M. Vishwakarma, S. Ahmed, Experimental investigation of hydrogen embrittlement during coating process and effect on mechanical properties of high strength steel used for fasteners [Текст] / Amit Khare // Materialstoday: Proceedings. – 2018. Volume 5, Issue 9, Part 3, p. 18707–18715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.217>.

12. Полькин В.И. Цинк для защиты от коррозии [Текст] / Полькин В.И. // Фундаменты. - 2021, № 1, - С. 68-71.

13. D. Wortelen, R. Frieling, H. Bracht, W. Graf, F. Natrup, Impact of zinc halide addition on the growth of zinc-rich layers generated by sherardizing [Текст] / Surf. Coat. Technol. – 2015. Volume 263, 15 February 2015, p. 66-77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.051>.

### Карфидов Алексей Олегович

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва  
Заведующий кафедрой инжиниринга  
технологического оборудования  
119049, г. Москва, Россия,  
E-mail: a.korf@mail.ru

### Горбатюк Сергей Михайлович

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
инжиниринга технологического оборудования  
119049, г. Москва, Россия,  
E-mail: sgor02@mail.ru

### Ибрагимова Алёна Александровна

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва  
Аспирант кафедры инжиниринга технологического оборудования  
119049, г. Москва, Россия,  
E-mail: m2201160@edu.misis.ru

KARFIDOV A.O., GORBATYUK S.M., IBRAGIMOVA A.A.

## OVERVIEW OF MODERN METHODS OF CORROSION PROTECTION BY GALVANIZING

**Abstract.** The article discusses the types and causes of corrosion, and the factors influencing the rate of oxidation and increased corrosion. The reasons for the need for corrosion protection are considered. The fields of industry in which galvanizing is used to protect against corrosion are described. The operational properties and scope of application of products for which various galvanizing methods are suitable are considered. Modern galvanizing methods and their technological features, advantages and disadvantages are considered. The leader of galvanizing methods at the moment is hot-dip galvanizing. A promising area of corrosion protection is considered – thermodiffusion galvanizing, which is at the beginning of the research on ways to increase the efficiency of the technological process. The main approaches to effectification are the selection of exposure parameters during processing, the modernization of equipment, and the possibilities of including additives in the powder composition are being studied.

**Keywords:** corrosion of metals, anti-corrosion protection, types of galvanizing, surface coatings, thermal diffusion galvanizing.

## BIBLIOGRAPHY

1. Piletskaya A.S. Corrosion problems in oil and gas production and their elimination [Text] / Piletskaya A.S. // International journal of Professional Science – 2024. - №3(2).- Pp. 54-60.
2. Corrosion and protection of metals. In 2 hours, Part 1 Methods of research on corrosion processes : an educational and methodical manual/ N. G. Rossina, N. A. Popov, M. A. Zhilyakova, A.V. Korelin. Yekaterinburg : Ural Publishing House. University, 2019□ 108 p.
3. Pazukhin P.Yu., Romanova L.V. The influence of various factors on metal corrosion [Text] / P.Yu. Pazukhin // IASE Student Science Days – 2024. Materials of the scientific and practical conference. (Vladimir, March 18 – April 05, 2024). Vladimir, 2024.
4. Materials science and technology of structural materials: textbook. for university students / V. S. Kushner, D. A. Negrov, O. Y. Burgonova, V.A. Skhirtladze, A. S. Vereshchaka; edited by V. S. Kushner. Omsk : Publishing House of OmSTU, 2012. p. 447.
5. Types of metal galvanizing: how to protect against corrosion? [Electronic resource] // Teratsink Company. URL: [https://terazinc.ru/tsinkovanie\\_metta\\_i\\_izdeliy/vidy\\_zinkovaniya\\_metallov/](https://terazinc.ru/tsinkovanie_metta_i_izdeliy/vidy_zinkovaniya_metallov/) (Date of request: 12/15/2024)
6. The influence of internal and external factors on the rate of gas corrosion [Electronic resource] // StudFiles. The file archive of students. URL: <https://studfile.net/preview/9051181/page:5/>

7. Shatumbu Thomas Alweendo, Motoaki Morita, Kayo Hasegawa, Shinichi Motoda, Effect of manufacturing-induced microscopic surface defects on crack initiation and fatigue mechanisms in hot-dip galvanized steel [Text] / Shatumbu Thomas Alweendo // Results in Materials. – 2024. - № 23. – 10609.

8. Zakharov, Yu.A. Improvement of the technological process of galvanizing parts of transport and technological machines and complexes [Text] / Yu.A. Zakharov, I.A. Spitsyn, E.V. Remizov, G.A. Musatov // Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. - 2014. - №4(12). - Pp. 105-111.

9. GOST R 9.316-2006. A unified system of protection against corrosion and aging. Thermodiffusion coatings. General requirements and control methods = Unified system of corrosion and aging protection. Thermodiffusion zinc coatings. General requirements and control methods : National standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 21, 2006. N 204-st : introduced to replace GOST R 51163-98 / developed and introduced by the Technical Committee for Standardization TC 213 "Metallic and other inorganic coatings" and TC 214 "Protection of products and materials from corrosion".

10. Electroplating technology [Electronic resource] // Tochinvestzink company. URL: <https://t-zinc.ru/texnologiya-czinkovaniya/texnologiya-galvanicheskogo-czinkovaniya.html>

11. A. Khare, S.K. Dwivedi, M. Vishwakarma, S. Ahmed, Experimental investigation of hydrogen embrittlement during coating process and effect on mechanical properties of high strength steel used for fasteners [Text] / Amit Khare // Materialstoday: Proceedings. – 2018. Volume 5, Issue 9, Part 3, p. 18707-18715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.217> 12.

12. Polkin V.I. Zinc for corrosion protection [Text] / Polkin V.I. // Foundations. - 2021, No. 1, pp. 68-71.

13. D. Wortelen, R. Frieling, H. Bracht, W. Graf, F. Natrup, Impact of zinc halide addition on the growth of zinc-rich layers generated by sherardizing [Text] / Surf. Coat. Technol. – 2015. Volume 263, 15 February 2015, p. 66-77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.051>.

**Karfidov Alexey Olegovich**

National University of Science and Technology «MISiS»,  
Moscow  
Head of the Department of Technological Equipment  
Engineering  
119049, Moscow, Russia,  
E-mail: a.korf@mail.ru

**Gorbatyuk Sergey Mikhailovich**

National University of Science and Technology «MISiS»,  
Moscow  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department of Technological Equipment Engineering  
119049, Moscow, Russia,  
E-mail: sgor02@mail.ru

**Ibragimova Alena Alexandrovna**

National University of Science and Technology «MISiS»,  
Moscow  
Postgraduate student of the Department of Technological  
Equipment Engineering  
119049, Moscow, Russia,  
E-mail: m2201160@edu.misis.ru

© Карфидов А.О., Горбатюк С.М., Ибрагимова А.А., 2025

СЕМЕНОВ И.Е., РЕЗНЮК К.Д.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОГО ЭЛАСТИЧНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

**Аннотация.** В работе изложены результаты экспериментов для определения влияния напряженно-деформированного состояния на константы Муни-Ривлина для композитного эластичного инструмента, применяемого для листовой штамповки. Определены константы Муни-Ривлина для 2-х параметрических моделей для армированного и неармированного рабочего инструмента на основе ПФЛ-100 и СКУ-7Л для разных схем деформирования.

**Ключевые слова:** полиуретан, композитный материал, полиарамидные ткани, эластичный рабочий инструмент для листовой штамповки, двухпараметрическая модель Муни-Ривлина.

### Введение

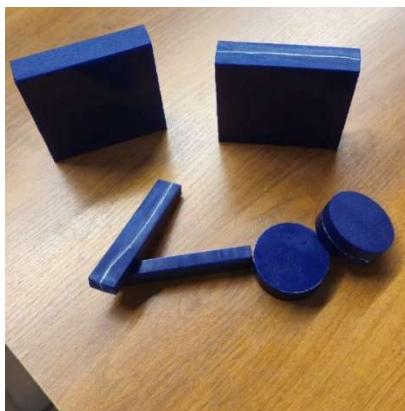
Производство листовых изделий при единичном и мелкосерийном производстве в обычных штампах листовой штамповки экономически невыгодно, из-за высокой стоимости штампов. Частое изменение размеров деталей приводит к необходимости изготовления новых рабочих частей штампа, что влечет за собой денежные потери.

Для уменьшения стоимости технологии производства можно использовать инструмент из гиперупругого материала. Одним из таких является полиуретан. К достоинствам его применения можно отнести универсальность штампового блока, который не изменяется от формы и размеров детали. Однако его применение в ряде случаев бывает затруднительным из-за недостаточной жесткости материала, что не позволяет достичь требуемого контактного напряжения для деформирования, особенно для стальных деталей.

Еще одним недостатком является малая изученность механических характеристик, позволяющих провести теоретический анализ технологического процесса. Для построения теоретической модели требуется знать константы Муни-Ривлина, которые определяются эмпирическим путем [1].

### Основная часть

Предметом исследования является гиперупругий материал из полиуретана марки ПФЛ-100 и СКУ-7Л, а также ПФЛ-100 и СКУ-7Л, армированные арамидной тканью Kevlar DuPont K29 1000D (рисунок 1). Исследуемый образец подвергается осадке при различных схемах напряженно-деформированного состояния (далее НДС). Геометрические размеры образцов представлены в таблице 1.



(a)



(б)

Рисунок 1 – Образцы из ПФЛ-100 (а), образцы из СКУ-7Л (б)

В зависимости от формы образца при осадке возникают различные НДС:

- цилиндрический образец – осесимметричное объемное НДС;
- квадратный в плане образец – объемное НДС;
- призматический образец – чистый сдвиг.

Для осадки по схеме чистый сдвиг используется специальный контейнер (рисунок 2).

Таблица 1 – Характеристики исследуемых образцов.

Образец	Форма	Материал	Модификация*	Основной размер D, НММ	Высота h, мм
1	Цилиндр	ПФЛ-100	S	$50 \pm 0.2$	$20 \pm 0.2$
2	Цилиндр	ПФЛ-100	A	$50 \pm 0.2$	$20 \pm 0.2$
3	Квадрат	ПФЛ-100	S	$(95 \pm 0.2) \times (95 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
4	Квадрат	ПФЛ-100	A	$(95 \pm 0.2) \times (95 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
5	Цилиндр	СКУ-7Л	S	$50 \pm 0.2$	$20 \pm 0.2$
6	Цилиндр	СКУ-7Л	A	$50 \pm 0.2$	$20 \pm 0.2$
7	Квадрат	СКУ-7Л	S	$(95 \pm 0.2) \times (95 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
8	Квадрат	СКУ-7Л	A	$(95 \pm 0.2) \times (95 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
9	Призма	ПФЛ-100	S	$(9.5 \pm 0.2) \times (100 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
10	Призма	ПФЛ-100	A	$(9.5 \pm 0.2) \times (100 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
11	Призма	СКУ-7Л	S	$(9.5 \pm 0.2) \times (100 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$
12	Призма	СКУ-7Л	A	$(9.5 \pm 0.2) \times (100 \pm 0.2)$	$20 \pm 0.2$

\*S – неармированный, A – армированный.

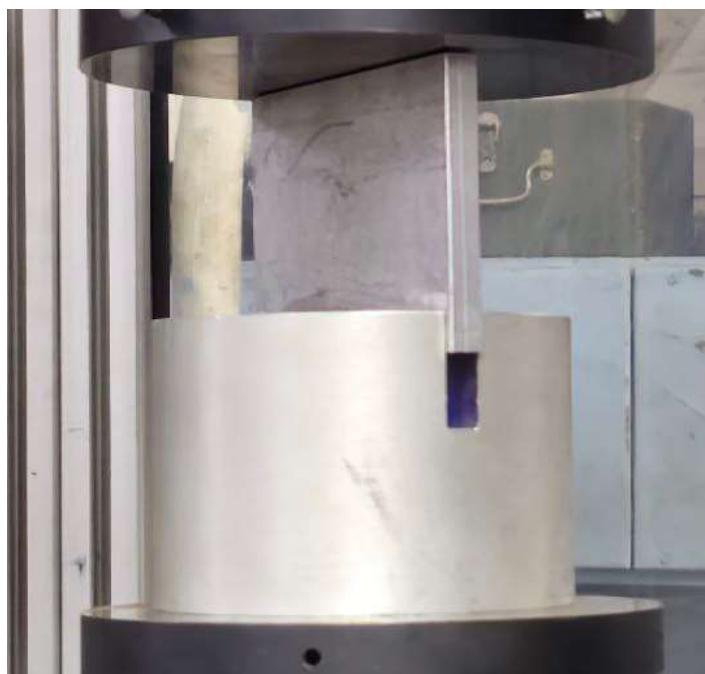


Рисунок 2 – Контейнер для осадки по схеме чистый сдвиг

Осадка образцов проводилась на испытательной машине INSTRON 600DX-F1-G1 (рисунок 3).



Рисунок 3 – Испытательная машина Instron 600DX-F1-G1

Константы Муни-Ривлина для гиперупругого материала могут быть определены путем минимизации среднеквадратичного отклонения  $E$  между диаграммой напряжения-деформации, полученной экспериментально и главными истинными напряжениями  $\sigma_{33}$ , МПа.

$$E = \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \widetilde{\sigma_{33}}(C_{10}, C_{01}, \lambda_i))^2,$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial C_{10}} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial C_{01}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – экспериментальное значение напряжения, МПа;  
 $\widetilde{\sigma_{33}}(C_{10}, C_{01}, \lambda_i)$  – значение главных истинных напряжений, МПа;  
 $n$  – количество экспериментальных точек.

**Объемное напряженное состояние.** Для осадки квадратного в плане образца характерно объемное напряженное состояние. Результаты осадки представлены на графике зависимости силы осадки, кН, от величины деформации, мм, (рисунок 4).

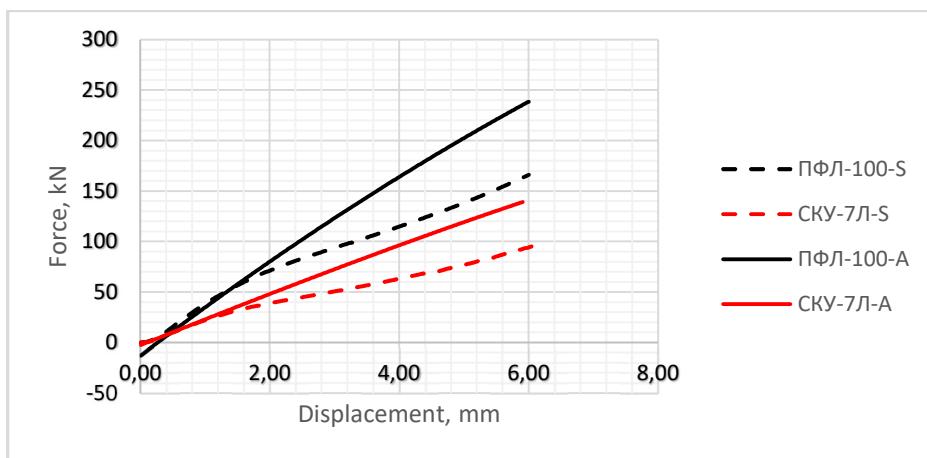


Рисунок 4 – Зависимость силы осадки от деформации квадратных образцов:  
 $S$  – неармированный,  $A$  – армированный

Сила осадки для армированного образца из ПФЛ-100-А достигает 230 кН, сила осадки для неармированного образца из ПФЛ-100-С достигает 160 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 1.44 раза.

Сила осадки для армированного образца из СКУ-7Л-А достигает 140 кН, сила осадки для неармированного образца из СКУ-7Л-С достигает 90 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 1.56 раза.

По методике, изложенной в [2], были рассчитаны коэффициенты Муни-Ривлина (таблица 2).

Таблица 2 – Константы Муни-Ривлина при объемном НДС:

	$C_{10}$ , МПа	$C_{01}$ , МПа
ПФЛ-100-С	5,12	0,68
СКУ-7Л-С	2,49	0,23
ПФЛ-100-А	6,71	0,73
СКУ-7Л-А	4,54	0,58

**Осесимметричное объемное напряженное состояние.** Для осадки цилиндрического образца характерно осесимметричное НДС. Результаты осадки представлены на графике зависимости силы осадки, кН, от величины деформации, мм, (рисунок 5).

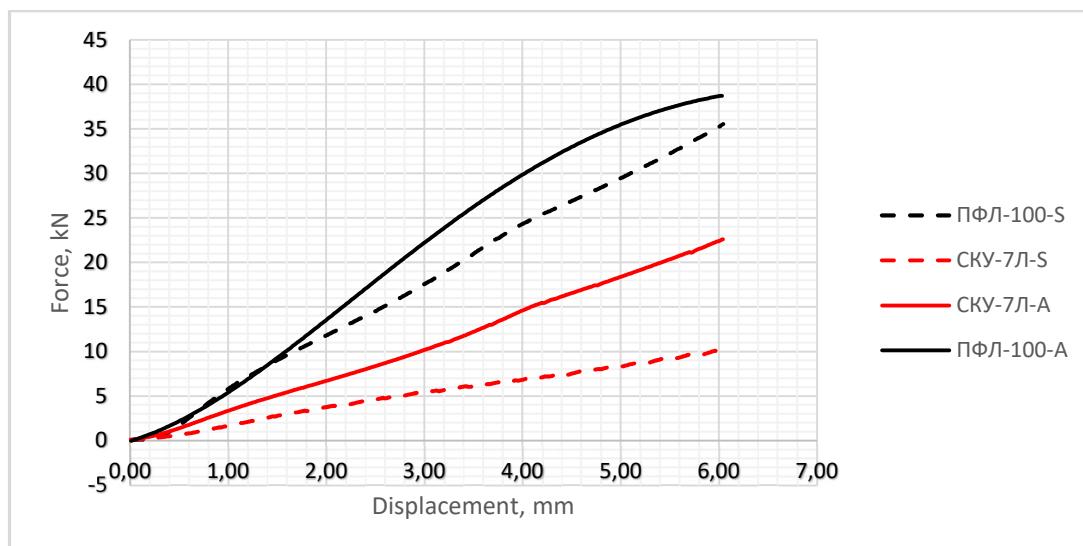


Рисунок 5 – Зависимость силы осадки от деформации цилиндрических образцов.  
(С – неармированный, А – армированный)

Сила осадки для армированного образца из ПФЛ-100-А достигает 43 кН, сила осадки для неармированного образца из ПФЛ-100-С достигает 35 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 1.23 раза.

Сила осадки для армированного образца из СКУ-7Л-А достигает 23 кН, сила осадки для неармированного образца из СКУ-7Л-С достигает 10 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 2.3 раза.

Коэффициенты Муни-Ривлина представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Константы Муни-Ривлина при осесимметричном объемном НДС:

	$C_{10}$ , МПа	$C_{01}$ , МПа
ПФЛ-100-С	5,81	0,75
СКУ-7Л-С	2,78	0,24
ПФЛ-100-А	7,12	0,83
СКУ-7Л-А	4,93	0,64

**Чистый сдвиг.** Для осадки призматического образца в контейнере характерно напряженное состояние – чистый сдвиг (плоское деформированное). Результаты осадки представлены на графике зависимости силы осадки, кН, от величины деформации, мм, (рисунок 6).

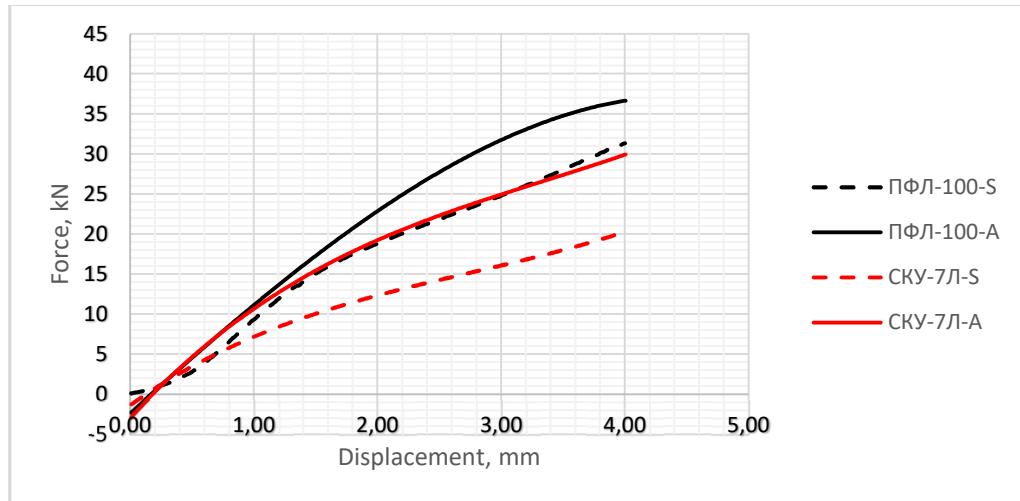


Рисунок 6 – Зависимость силы осадки от деформации призматических образцов.  
Постфикс *S* – неармированный, *A* – армированный

Сила осадки для армированного образца из ПФЛ-100-А достигает 38 кН, сила осадки для неармированного образца из ПФЛ-100-С достигает 31 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 1.23 раза.

Сила осадки для армированного образца из СКУ-7Л-А достигает 30 кН, сила осадки для неармированного образца из СКУ-7Л-С достигает 20 кН. Сила осадки для армированного образца превышает силу осадки неармированного образца в 1.5 раза.

Для чистого сдвига функция главных истинных напряжений  $\tilde{\sigma}_{33}$ , зависит от суммы коэффициентов Муни-Ривлина, поэтому нельзя определить значения констант, а только их суммарное значение.

Суммы коэффициентов Муни-Ривлина представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Константы Муни-Ривлина при чистом сдвиге:

	$C_{10} + C_{01}$ , МПа
ПФЛ-100-С	7,02
СКУ-7Л-С	3,13
ПФЛ-100-А	10,02
СКУ-7Л-А	5,18

### Заключение

Значение коэффициентов Муни-Ривлина зависит от вида напряженно-деформированного состояния. Для объемного НДС значение констант Муни-Ривлина от 1.3 до 1.8 раз больше (в зависимости от материала) чем для объемного осесимметричного НДС. Сумма констант Муни-Ривлина для чистого сдвига более чем в 2 раза превышает сумму констант объемного НДС.

Армирование полиуретана позволяет значительно увеличить величину силы осадки при объемном НДС. Силы осадки увеличивается в 1.4 раза для ПФЛ-100, в 1.5 раз для СКУ-7Л. Для осесимметричного НДС сила осадки возрастает в 1.1 раз для ПФЛ-100, в 2.3 раза для СКУ-7Л. Сила осадки для чистого сдвига увеличивается в 1.2 раза для ПФЛ-100, в 1.5 раз для СКУ-7Л.

В зависимости от вида деформации изделия для расчета процесса необходимо учитывать коэффициенты Муни-Ривлина в соответствие с НДС.

Применение армированного инструмента позволяет расширить технологические возможности штамповки в открытом объеме, а также процессы локальной формовки с помощью валков с эластичной оболочкой [3..4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая физика эластомеров. / М.Ф. Бухина. М.: Химия, 1984. – 224 с.
2. Повышение жёсткости эластичного рабочего инструмента для обработки тонколистового металла путём создания композитного материала на основе полиуретановых эластомеров и синтетических арамидных тканей. / И.Е. Семенов, Д.В. Савчук. // Восточно-Европейский научный журнал. 2020. № 12-2 (64). С. 33-41.
3. Modeling of continuous molding process with elastic composite working tool. / I.E.Semenov, V.Y.Lavrinenko, K.D.Reznyuk, D.A. Brayko // XVI International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2023” – SCOPUS. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/50/e3sconf\\_interagromash2023\\_02006](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/50/e3sconf_interagromash2023_02006)
4. Исследование напряженно-деформированного состояния тонколистовой заготовки при ее деформировании новым композитным рабочим инструментом. / И.Е. Семенов, К.Д. Резнюк // Заготовительное производство в машиностроении. – 2022. – №3. – С. 133 – 137.

**Семенов Иван Евгеньевич**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

доктор тех. наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: 8 (916) 821-56-88

E-mail: sieprof@mail.ru

**Резнюк Кирилл Дмитриевич**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аспирант кафедры «Технологии обработки материалов»

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: 8 (926) 672-45-69

E-mail: kirill.reznyuk@yandex.ru

SEmenov I.E., REznyuk K.D.

## THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE ELASTIC TOOL BASED ON POLYURETHANE FOR SHEET FORMING

**Abstract.** The paper presents the results of experiments to determine the effect of the stress-strain state scheme on the Mooney-Rivlin constants. The Mooney-Rivlin coefficients for a two-parameters model of reinforced and unreinforced working tools for sheet forming based on PFL-100 and SKU-7L were determined.

**Keywords:** polyurethane, composite, aramid fabrics, elastic working tools for sheet forming, 2-parametrs Mooney-Rivlin hyperelastic model.

## BIBLIOGRAPHY

1. Technical physics of elastomers. / M.F. Bakhina. Moscow: Chemistry, 1984. – 224 p.
2. Increasing the rigidity of an elastic working tool for processing thin sheet metal by creating composite material based on polyurethane elastomers and synthetic aramide fabrics. / I.E. Semenov, D.V. Savchuk // East European Scientific Journal. 2020. No. 12-2 (64). – 33-41 p.
3. Modeling of continuous molding process with elastic composite working tool. / I.E.Semenov, V.Y.Lavrinenko, K.D.Reznyuk, D.A. Brayko // XVI International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2023” – SCOPUS. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/50/e3sconf\\_interagromash2023\\_02006](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/50/e3sconf_interagromash2023_02006)
4. Study of stress-strain state of thin-sheet billet during its deformation by a new composite working tool. / I.E.Semenov, K.D. Reznyuk // Procurement production in mechanical engineering. – 2022. – №3. – 133 – 137 p.

**Semenov Ivan Evgenievich**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Doctor of Science, Docent, Professor of «Pressure Processing Technologies» department

105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

Tel.: 8 (916) 821-56-88

E-mail: sieprof@mail.ru

**Reznyuk Kirill Dmitrievich**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Postgraduate student of «Materials Processing Technologies» department

105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

Tel.: 8 (926) 672-45-69

E-mail: kirill.reznyuk@yandex.ru

© Семенов И.Е., Резнюк К.Д., 2025

КОЖУС О.Г., БАРСУКОВ Г.В., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю.,  
ПЕТРУХИН А.В., ШЛЮПКИН П.И.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНОЙ ЧАСТИЦЫ С КАНАЛОМ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТРУБКИ СОПЛА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВВЕДЕНИИ ПАВ

**Аннотация.** Авторами статьи разработана математическая модель взаимодействия абразивной частицы, увлекаемой жидким потоком, со стенками канала, с учетом влияния поверхностно-активного вещества (ПАВ) на этот процесс, что позволило впервые получить выражения для определения закономерностей распределения давления на поверхности абразивной частицы, изменения силы сопротивления, скорости и глубины проникания в стенку канала фокусирующей трубы сопла.

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, абразив, сопло, фокусирующая трубка, гидравлическое сопротивление, поверхностно-активное вещество.

### 1. Введение

Гидроабразивное резание реализуется с применением уникального инструмента, который менее чувствителен к свойствам материала, практически не оказывает термического воздействия и создает минимальные напряжения. Этот процесс был впервые представлен в качестве производственной технологии для резки стекла в 1983 году.

В настоящее время этот процесс широко используется для обработки практически любых материалов, например, труднообрабатываемых, таких как керамика, керамические композиты, композиты, армированные волокнами и титановые сплавы, где традиционная обработка часто технически или экономически нецелесообразна.

Скорость гидроабразивного резания определяет производительность обработки деталей, а так как она используется в заготовительном производстве, то и количество выпускаемой конечной продукции (вертолетов, самолетов, кораблей, военной техники, систем ПВО, реакторов, котлов, и т.д.). В свою очередь, повышение скорости резки на имеющемся оборудовании за счет снижения гидродинамического сопротивления в канале сопла при формировании струи, позволит снизить время обработки до нескольких часов, продлить ресурс оборудования, уменьшить стоимость резки и будет способствовать росту выпуска готовой продукции.

Одним из способов снижения гидродинамического сопротивления в канале сопла является создание ламинарного потока жидкости за счет использования таких добавок, как полимеры или поверхностно-активные вещества (ПАВ). Их можно добавлять в воду перед ее подачей в систему гидроабразивной резки.

Полимеры представляют собой молекулы с длинной цепью, которые могут уменьшить турбулентность в воде за счет увеличения вязкости или толщины пограничного слоя, что способствует созданию ламинарного потока за счет уменьшения перемешивания молекул воды.

Целью исследования, представленного в [1], была разработка системы впрыска, подходящей для количественной оценки влияния различных типов полимерных добавок на режущую способность чистой струи воды. Результаты показали, что ряд полимерных добавок может быть рекомендован для резания гидроструеей мягких материалов большой толщины, таких как резиновые уплотнения, где более сфокусированная струя обеспечивает повышение производительности и высокое качество. Применение для гидроабразивной резки никаких преимуществ не выявило.

В своих исследованиях Погребняк А.В. показывает, что длину начального участка струи можно увеличить посредством добавления в рабочую среду водорастворимых полимеров, в качестве которых использовал карбоксиметилцеллюзу, глицерин, поливиниловый спирт, полиоксиэтиленгликоль, полиакриламид, полиоксиэтилен. Автор подтверждает, что полимерные добавки существенно стабилизируют струю, при этом уменьшается угол конусности внешних границ струи, увеличивается длина начального участка, по сравнению со струей чистой воды [2].

Молекулы ПАВ способствуют снижению коэффициента вязкости на стенке канала фокусирующей трубки сопла, который определяется физической природой жидкой фазы, состоянием течения (ламинарное или турбулентное), взаимодействием рабочей среды с твердой стенкой канала (прилипание или проскальзывание, наличие с определенной концентрацией или отсутствие взвешенных частиц – абразив, мицеллы, промежуточного слоя, например, ПАВ). Слой ПАВ на твердой металлической поверхности образуется в силу притяжения дипольной группы молекул лиофильных ПАВ под действием быстро убывающего по мере удаления от поверхности электрического поля [3, 4].

Увеличение скорости абразивной частицы за счет введения добавки ПАВ будет способствовать повышению производительности гидроабразивного резания материалов. Однако рост скорости потока может привести к росту количества контактов абразива со стенками канала сопла, что приведет к большим потерям энергии и большему износу стенки сопла.

Обнаружено, что абразив в потоке жидкости совершает множественные колебания по всей длине трубы сопла, что связано с интенсивной пульсацией поперечной составляющей скорости. В исследовании [5] выявлены 3 стадии пульсации поперечной составляющей скорости гидроабразивного потока на расстоянии 5, 10, 30 мм. Это объясняет то, что канал соплового насадка подвержен максимальному разрушению на участке перехода конической части его профиля в цилиндрическую часть примерно на отрезке длины 5 – 30 мм (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Износ канала фокусирующей трубы сопла гидроабразивной установки*

Необходимо отметить, что абразивные частицы совершают колебательные движения в поперечном направлении по собственным законам, а чистота колебаний у каждого абразива своя.

Установлено [5], что траектория движения одиночного абразива зависит, как от диаметра частицы, так и от начального расположения частиц на входе в сопло. Частицы большего диаметра отклоняются от линии потока и сильнее воздействуют на стенку канала сопла. Очевидно, что размер частицы оказывает большое влияние на траекторию частиц.

Установлено, что маленькие частицы (менее 100 мкм) увлекаются потоком жидкости и ударяются о стенку сопла, в то время как более крупные частицы с начальным положением на больших радиальных расстояниях будут иметь более высокую вероятность столкновения со стенкой сопла [5]. Имея информацию о траектории частиц, можно установить закономерности распределения давления на поверхности абразивной частицы, изменения силы сопротивления, скорости проникания в стенку канала фокусирующей трубы сопла с учетом влияния ПАВ на этот процесс. Это позволит в дальнейшем провести количественную оценку эрозии в месте удара.

## 2. Основная часть

На основании гипотезы Бернулли движение материала канала фокусирующей трубы сопла при взаимодействии с абразивной частицей преграды поперечные сечения, плоские и нормальные до деформации, остаются плоскими и нормальными после деформации [6]. В области  $S$  вблизи поверхности абразивной частицы материал канала фокусирующей трубы сопла находится в неупругом состоянии. Состояние материала фокусирующей трубы упругое. Материал поверхности канала трубы в зоне взаимодействия не подвергается упрочнению. Область, где материал трубы находится в неупругом состоянии, характеризуется пластичностью. Поэтому состояние этой области можно описать с использованием уравнений идеального пластического течения.

Для определения закономерностей взаимодействия абразивной частицы с поверхностью канала фокусирующей трубки сопла задача определения сил, действующих на абразив, сводится к исследованию процесса расширения круговой цилиндрической полости, начиная с нулевого радиуса. Область пластичности имеет радиус  $r$  и зависит от времени контактного взаимодействия  $t$ . За пределами области пластичности материал находится в упругом состоянии. Выражения для области взаимодействия абразива со стенками канала фокусирующей трубки запишем в цилиндрических лагранжевых координатах  $r, \theta$ .

Для области пластичности запишем следующее выражение:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \tau_{s\theta} + \tau_{sr}, \quad (1)$$

где  $\sigma_\theta$  - окружные напряжения;

$\sigma_r$  - радиальные напряжения;

$\tau_{s\theta}, \tau_{sr}$  - придел текучести при сдвиге.

Для упругой области с учетом закона Гука запишем выражения в следующем виде:

$$u = \sqrt{\frac{\tau_{s\theta} \tau_{sr}}{E_\theta E_r}} \frac{(1+\nu)c^2(t)}{r}, \quad (2)$$

$$\sigma_r = -\frac{\tau_{sr} c^2(t)}{r^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{\tau_{s\theta} c^2(t)}{r^2}, \quad (4)$$

где  $u$  - смещение точек материала поверхности канала фокусирующей трубки сопла;

$E_\theta, E_r$  - модуль Юнга;

$\nu$  - коэффициент Пуассона.

Из уравнений (2), (3), (4) следует, что объемная деформация равна нулю и выполняется условие несжимаемости среды.

Запишем уравнения несжимаемой среды в переменных Лагранжа:

$$\frac{1}{\phi+1} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^{\phi+1} = \frac{\rho_0}{\rho} r^\phi, \quad (5)$$

$$\rho_0 r^\phi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u)^\phi \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^\phi,$$

где  $r$  - начальное расстояние точек материала трубки от центра симметрии;

$t$  - время;

$\rho_0, \rho$  - начальная и текущая массовая плотность точек материала фокусирующей трубки сопла. При этом  $\rho_0 = \rho$ ;

$\phi = 0, 1, 2$  - соответственно для сферического, цилиндрического и плоского случая движения.

Запишем уравнения движения и сохранения массы для несжимаемой среды:

$$\rho_0 r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u) \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r+u), \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r+u)^2 = 2r. \quad (7)$$

Для определения давления, действующего на абразивную частицу при проникании в поверхность канала трубки, запишем условие непрерывности смещения на внешней границе области пластичности с учетом (4) и (6):

$$a = \frac{c^2}{R^2} = \left( \frac{2\tau_r \tau_\theta (1+\nu)}{E_r E_\theta} \left[ 1 + \frac{\tau_r \tau_\theta (1+\nu)}{2E_r E_\theta} \right] \right)^{-1}. \quad (8)$$

Обозначим  $H(t)$ , как глубину проникания абразива в поверхность канала фокусирующей трубки с учетом времени  $t$ , тогда  $H_1(t_1)$  - глубина проникания в момент времени  $t_1$ :

$$0 \leq t_1 \leq t, \\ 0 \leq H_1(t_1) \leq H(t).$$

Расстояние от вершины абразивной частицы до сечения  $H_1(t_1)$  обозначим через  $x$ , тогда уравнение образующей абразива можно представить в виде:

$$R = f(x), \quad (9)$$

$$x = H(t) - H_1(t_1). \quad (10)$$

После дифференцирования (8) по времени  $t$ :

$$\frac{dR}{dt} = \frac{df(x)}{dx} \frac{dH}{dt}, \quad (11)$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{d^2f(x)}{dx^2} \frac{dH}{dt} + \frac{df(x)}{dx} \frac{d^2H}{dt^2}. \quad (12)$$

Подставляя (10), (11) в (6) и меняя на  $P$ , получим:

$$p = \frac{\rho}{2} \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 \left( \frac{df(x)}{dx} \right)^2 \left[ \ln(1+a) - \frac{a}{1+a} \right] + \\ + \frac{\rho}{2} \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 \frac{d^2f(x)}{dx^2} f(x) \ln(1+a) + \\ + \frac{\rho}{2} \frac{d^2H}{dt^2} \frac{df(x)}{dx} f(x) \ln(1+a) + \frac{1}{2} (\tau_{s\theta} + \tau_{sr}) (1 + \ln(1+a)) \quad (13)$$

Сила, действующая на элемент проникающей абразивной частицы между двумя близкими нормальными сечениями против направления проникания равна:

$$dF = 2\pi p f(x) \frac{df(x)}{dx} dx. \quad (14)$$

Полную силу сопротивлению проникания абразива в поверхность канала фокусирующей трубки сопла определим, проинтегрировав (14) в пределах от нуля до  $H$ :

$$F = \rho\pi \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 \left[ \ln(1+a) - \frac{a}{1+a} \right] \int_0^H \left( \frac{df(x)}{dx} \right)^3 f(x) dx + \\ + \rho\pi \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 \ln(1+a) \int_0^H \frac{d^2f(x)}{dx^2} \frac{df(x)}{dx} f^2(x) dx + \\ + \rho\pi \frac{d^2H}{dt^2} \ln(1+a) \int_0^H \left( \frac{df(x)}{dx} \right)^2 f^2(x) dx + \\ + \pi (\tau_{s\theta} + \tau_{sr}) (1 + \ln(1+a)) \int_0^H \frac{df(x)}{dx} f(x) dx \quad (15)$$

Рассмотрим проникание конусного абразива в поверхность канала трубы.

Запишем закон движения абразивной частицы:

$$m \frac{d^2 H}{dt^2} = -F. \quad (16)$$

Начальные условия:

$$H(0) = 0, \quad \frac{dH}{dt} = V_0.$$

Тогда (15) для конической области абразивного зерна запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} F = \rho \frac{\pi}{2} \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 H^2 \left[ \ln(1+a) - \frac{a}{1+a} \right] \tan^4(\beta) + \\ + \rho \pi \frac{d^2 H}{dt^2} H^3 \ln(1+a) \tan^4(\beta) + \\ + \pi (\tau_{s\theta} + \tau_{sr}) (1 + \ln(1+a)) \int_0^H \frac{df(x)}{dx} f(x) dx \end{aligned}$$

Произведем замену переменных:

$$\begin{aligned} \mathcal{G} &= \left( \frac{dH}{dt} \right)^2, \\ \dot{H} &= \frac{1}{2} \frac{d\mathcal{G}}{dH} = \frac{1}{2} \mathcal{G}', \end{aligned}$$

получим линейное уравнение первого порядка вида:

$$\mathcal{G}' + \varphi_1(H) \mathcal{G} = \varphi_2(H), \quad (17)$$

где функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  примут следующие значения:

$$\varphi_1 = \frac{\chi \alpha H^2}{1 + \chi \omega H^3}; \varphi_2 = \frac{-\chi c H^2}{1 + \chi \omega H^3}.$$

где

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\pi \rho_0 \operatorname{tg}^4 \beta}{m} \ln(1+a), \\ \alpha_1 &= \frac{\pi \rho_0 \operatorname{tg}^4 \beta}{m} \left\{ \ln(1+a) - \frac{a}{1+a} \right\}, \\ c &= \frac{2\pi \tau_0}{m} \operatorname{tg}^2 \beta (1 + \ln(1+a)) \\ \chi &= 1 + \mu_0 c \operatorname{tg} \beta, \end{aligned}$$

Уравнения (17) решим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{G} &= e^{-q(H)} \left\{ \mathcal{G}_0 + \int_0^H \phi_2(H) e^{q(H)} dH \right\}, \\ q(H) &= \int_0^H \phi_2(H) dH, \end{aligned}$$

где  $\mathcal{G}_0$  - значение  $\mathcal{G}$  при  $H = 0$ .

Учитывая, что  $\mathcal{G}_0$  есть квадрат начальной скорости, запишем  $\dot{H}^2$  в следующем виде:

$$\dot{H}^2 = \frac{v_0^2 + \frac{c}{\alpha_1}}{(1 + \omega H^3)^{\alpha_1/3\omega}} - \frac{c}{\alpha_1}, \quad (18)$$

где  $v_0$  - начальное значение скорости.

После определения  $\vartheta$  из уравнения (17) определим ускорение абразивной частицы:

$$\ddot{H} = -\frac{\alpha_1}{2} \frac{\left(v_0^2 + \frac{c}{\alpha_1}\right) H^2}{(1 + \omega H^3)^{\alpha_1}}, \quad (19)$$

Для определения максимальной глубины проникновения абразивной частицы в поверхность канала фокусирующей трубы сопла гидроабразивной установки положим  $\left(\frac{dH}{dt}\right)^2 = 0$ , тогда получим:

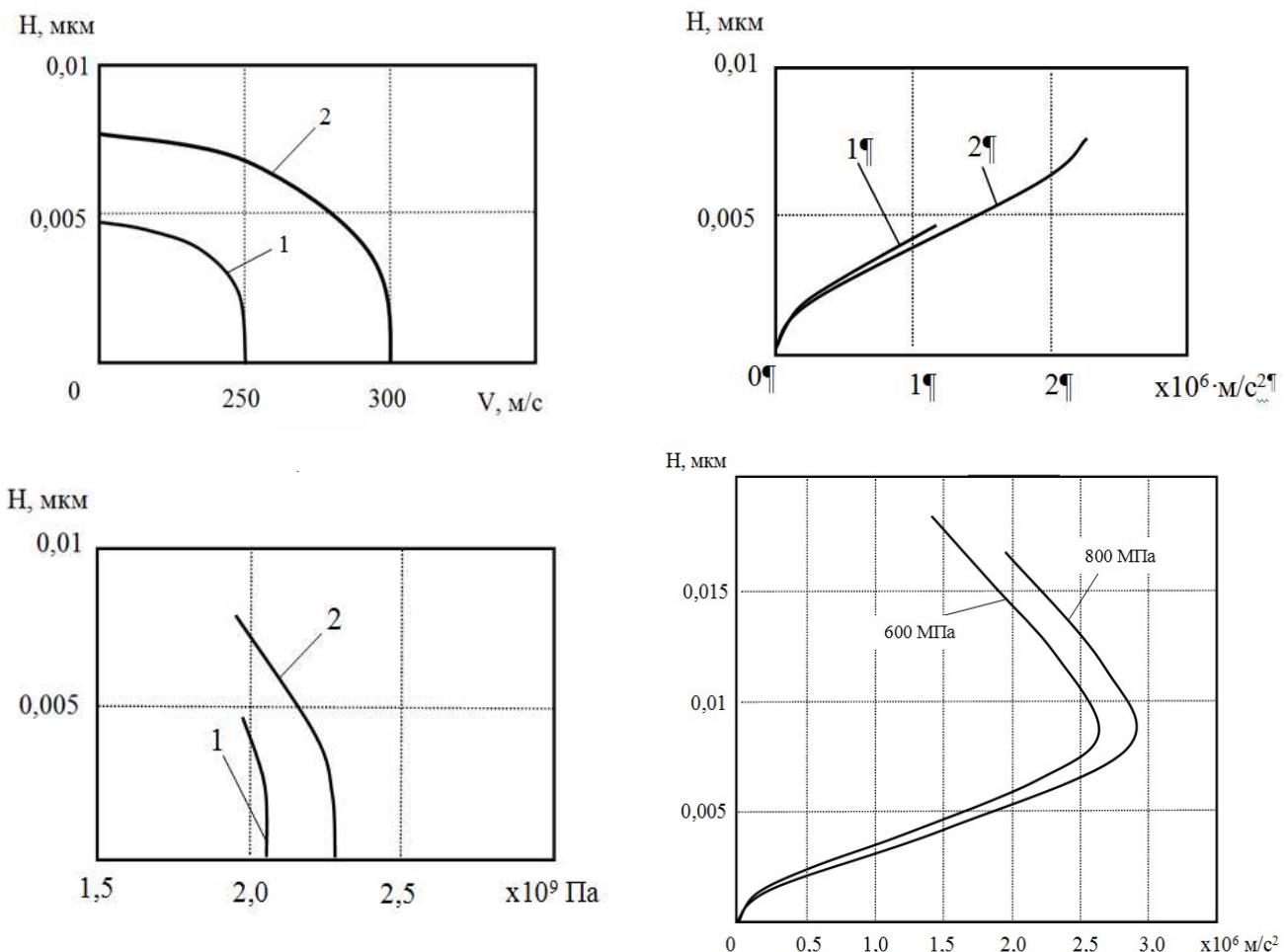
$$H = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{v_0^2 \alpha_1}{c} + 1\right)^{\frac{3\omega}{\alpha_1}} - 1}{\omega}}, \quad (20)$$

### 3. Выводы и обсуждение

В работе [4] установлено, что при введении в струю добавки ПАВ гидрофобный материал в контакте с водой должен уменьшать вязкость ее поверхностного слоя из-за уменьшения энергии активации ее молекул в  $\approx 3$  раза. В результате проявляется эффект «проскальзывания» вдоль стенок канала, покрытых ПАВ. Моделирование скорости движения абразивной частицы в канале фокусирующей трубы сопла [5] позволило определить, что течение гидроабразивного потока с «проскальзыванием» увеличивает начальную скорость частицы примерно на 14 %. На рисунке 2 представлена зависимость глубины проникания абразива в поверхность канала фокусирующей трубы сопла от начальной скорости частицы 250 м/с без добавки ПАВ и 300 м/с с добавкой ПАВ. Видно, что глубина внедрения абразива в поверхность канала увеличивается с 0,0048 мкм до 0,0075 мкм с ростом скорости абразива.

Полученные результаты позволяют предположить, что при введении добавки ПАВ в поток жидкости ускоряется износ фокусирующей трубы сопла. Это обусловлено тем, что частота соударений абразивных частиц со стенками канала фокусирующей трубы сопла примерно составляет несколько десятков тысяч ударов в секунду. Поэтому интенсивность износа определяется скоростью и частотой соударений абразивных частиц со стенками канала трубы. Однако это характерно для достаточно больших углов взаимодействия более 5 град., когда абразивная частица выходит из конусной части канала трубы [5]. Для рассматриваемых материалов по длине фокусирующей трубы, значения контактных напряжений при углах взаимодействия менее 5 град. не превышают значения динамического предела текучести. На основании этого выдвинуто предположение о том, что материал фокусирующей трубы сопла преимущественно разрушается вследствие циклического нагружения, что свидетельствует об усталостном механизме разрушения поверхности трубы. Что позволяет сделать вывод, что введение ПАВ не окажет существенного влияния на скорость износа фокусирующей трубы сопла, поскольку частота ударного взаимодействия и значение количества циклов нагружения не меняется.

В то же время применение сверхтвердых абразивных материалов, таких как электрокорунд, карбид кремния и других, составляющая среза при небольших углах контакта вызывает разрушение материала фокусирующей трубы. Наблюдается переход от ударного действия абразивных частиц к срезающему. На рисунке 3 показан износ фокусирующей трубы от абразивных частиц из электрокорунда.



**Рисунок 2 - Зависимость глубины проникания абразива в поверхность канала фокусирующей трубки от:**  
 а) начальной скорости частицы, б) ускорения частицы, в) величины давления на поверхности частицы,  
 г) ускорения частицы при различных пределах текучести материала фокусирующей трубы,  
 1- без ПАВ, 2 – с добавкой ПАВ



**Рисунок 3 - Износ канала фокусирующей трубы при использовании абразива из карбида кремния**

Процесс разрушения происходит очень быстро, в течение 5 минут, вследствие не большого соотношения твердости материала трубы и абразива. Это позволяет характеризовать процесс разрушения фокусирующей трубы сопла как микрорезание, доля которого велика на всем протяжении канала.

При ударе о поверхность канала фокусирующей трубы угловатой сверхтвёрдой частицы процесс микрорезания усиливается. Срезы осуществляются вершинами абразивных частиц и, из-за скоротечности и направленности ударного воздействия, оно носит очень специфический характер. Результаты такого воздействия зависят от так называемого угла

заострения частицы. Результаты моделирования показывают, что максимальный унос материала канала фокусирующей трубы будет наблюдаться при углах заострения абразива от 5 до 10<sup>0</sup> (рисунок 4).

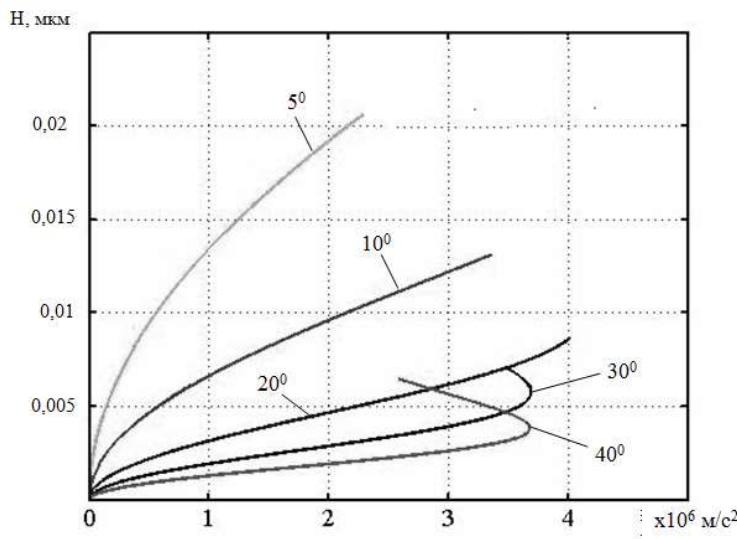


Рисунок 4 – Зависимость глубины проникания от ускорения при различных углах заострения абразивной частицы

Поэтому для снижения износа фокусирующей трубы сопла твердость материала фокусирующей трубы сопла должна, примерно в 1,3 раза превосходить твёрдость абразивов. Дальнейшее повышение характеристик прочности не даёт ощутимого эффекта [7]. На рисунке 5 показана зависимость давления на поверхности абразива при различных значениях предела текучести материала трубы без и с добавкой ПАВ. Величина предела текучести материала фокусирующей трубы характеризует ее износостойкость, так как определяет сопротивление материала разрушению его поверхностных слоёв при скольжении абразива. При наличии добавки ПАВ давление на поверхности абразива увеличивается, кинетическая энергия абразива значительней расходуется на пластическое деформирование материала канала соплового насадка, что может привести к хрупкому разрушению абразива на мелкие осколки.

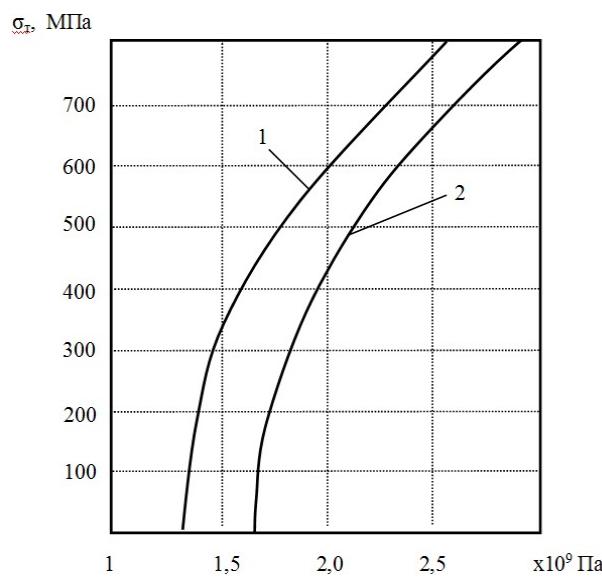


Рисунок 5 - Зависимость давления на поверхности абразива при различных значениях предела текучести материала трубы: 1- без ПАВ, 2 – с добавкой ПАВ

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-79-10245.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Annoni, M.; Monno, M.; Bertola, V.; Goletti, M. The role of polymeric additives in water jet cutting. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 2009, 6, 285–304. [CrossRef]
2. Pogrebnyak A.V., Pogrebnyak V.G. Peculiarities of the Hydro-jet Water-Polymer Processing of Food Products by Cutting. *World Journal of Food Science and Technology.* Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 28-31. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170101.15
3. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Petrukhin A., Tinyakova E. Theoretical substantiation of formation of a layer of surfactants on the walls of the nozzle focusing tube for the technological process of waterjet cutting. *AIP Conf. Proc.* 24 April 2024; 3154 (1): 020037. <https://doi.org/10.1063/5.0201249>
4. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71).
5. Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Журавлева Т.А., Тинякова Е.А., Преснечева В.Ю. Моделирование кинематических характеристик движения абразивных частиц в сопле гидроабразивного станка с ПАВ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 3 (365). С. 31-39.
6. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов [Текст] / Н.М. Беляев. - М.: Наука, 1965. – 480 с.
7. Ткачев Б.В. Защита металлических трубопроводов от абразивного износа // Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении. – 2017. – С. 260-265.

**Кожус Ольга Геннадьевна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, кандидат технических наук, Начальник УНИР г. Орёл ул. Наугорское ш. 29 Тел: +79038806976 [okozhus@mail.ru](mailto:okozhus@mail.ru)

**Фроленкова Лариса Юрьевна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Заведующая кафедрой машиностроение, доктор технических наук, профессор, г. Орёл ул. Московская д. 34 Тел: +79038806976

**Шлюпкин Павел Игоревич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, аспирант кафедры машиностроение г. Орёл ул. Московская д. 34 Тел: +79038806976 [awj@list.ru](mailto:awj@list.ru)

**Барсуков Геннадий Валерьевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроение г. Орёл ул. Московская д. 34 Тел: +79038806976 [awj@list.ru](mailto:awj@list.ru)

**Петрухин Антон Владимирович**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, аспирант кафедры машиностроение г. Орёл ул. Московская д. 34 Тел: +79038806976 [awj@list.ru](mailto:awj@list.ru)

---

KOZHUS O.G., BARSUKOV G.V., FROLENKOVA L.U., PETRUKHIN A.V., SHLYUPKIN P.I.

## REGULARITIES OF INTERACTION OF AN ABRASIVE PARTICLE WITH THE CHANNEL OF THE FOCUSING TUBE OF THE NOZZLE OF A WATER-ABRASIVE MACHINE WHEN INTRODUCING A SURFACTANT

**Abstract.** The authors of the article have developed a mathematical model of the interaction of an abrasive particle carried away by a liquid flow with the walls of the channel, taking into account the influence of a surfactant (surfactant) on this process, which made it possible for the first time to obtain expressions for determining the regularities of pressure distribution on the surface of an abrasive particle, changes in the resistance force, speed and depth of penetration into the wall of the channel of the focusing tube of the nozzle.

**Keywords:** waterjet cutting, abrasive, nozzle, focusing tube, hydraulic resistance, surfactant.

## BIBLIOGRAPHY

1. Annoni, M.; Monno, M.; Bertola, V.; Goletti, M. The role of polymeric additives in water jet cutting. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 2009, 6, 285–304. [CrossRef]
2. Pogrebnyak A.V., Pogrebnyak V.G. Peculiarities of the Hydro-jet Water-Polymer Processing of Food Products by Cutting. *World Journal of Food Science and Technology.* Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 28-31. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170101.15
3. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Petrukhin A., Tinyakova E. Theoretical substantiation of the formation of a layer of surfactants on the walls of the nozzle focusing tube for the technological process of waterjet cutting. *AIP Conf. Proc.* 24 April 2024; 3154(1):020037. <https://doi.org/10.1063/5.0201249>
4. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasimov, V.R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71).
5. Kozhus, O.G., Barsukov, G.V., Galinovsky, A.L., Zhuravleva, T.A., Tinyakova, E.A., Presnetsova, V.Yu. Modeling of kinematic characteristics of abrasive particles motion in the nozzle of a waterjet machine with surfactants // *Fundamental and applied problems of engineering and technology.* 2024. No. 3 (365). P. 31-39.
6. Belyaev, N.M. Strength of materials [Text] / N.M. Belyaev. - M.: Nauka, 1965. - 480 p.
7. Tkachev B.V. Protection of metal pipelines from abrasive wear // *Effective formulations and technologies in construction materials science.* - 2017. - P. 260-265.

**Kozhus Olga Gennadievna**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Candidate of Technical Sciences,  
Head of R&D Department  
Orel, Naugorskoe sh. 29  
+79038806976  
okozhus@mail.ru

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

Oryol State University named after I.S. Turgenev,  
Head of the Department of Mechanical Engineering,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor,  
Oryol, Moskovskaya St., 34 Tel: +79038806976

**Shlyupkin Pavel Igorevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
postgraduate student of the Department of Mechanical  
Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976

**Barsukov Gennady Valeryevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

**Petrukhin Anton Vladimirovich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
postgraduate student of the Department of Mechanical  
Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

© Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Фроленкова Л.Ю., Петрухин А.В., Шлюпкин П.И., 2025

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

**Аннотация.** Оптимизация параметров технологического процесса изготовления изделий с поверхностями второго порядка направлена на обеспечение требуемых технических показателей качества изделий, среди которых определяющими являются соответствие геометрии вдоль всей поверхности изделия, а также наличие концентрированных дефектов и ожидаемый ресурс изделия. В настоящей работе рассмотрена финишная асферизация исходных сферических заготовок при центральном вращении секторного многолепесткового инструмента и получены координаты оптимальной точки в факторном пространстве параметров, которые максимизируют качество получаемых изделий.

**Ключевые слова:** поверхность второго порядка, неразвертываемая поверхность, моделирование, финишная обработка, управление качеством, обработка в неподвижных осях.

### Введение.

При функционировании технологической линии возникает задача поддержания качества выпускаемой серии изделий при отклонениях параметров поступающих заготовок от проектных значений. При этом, как правило, реализуется обратная связь по линии «изготовленная деталь – управляющее воздействие».

Вместе с тем, трудозатраты могут быть в той или иной степени сокращены, если еще на этапе проектирования технологического процесса задаться оптимизацией его по критерию качества выпускаемых изделий. Для этого требуется установить влияние выбранных факторов технологического процесса на качество и решить оптимизационную задачу [1].

Тогда сходимость ряда управляющих воздействий будет обеспечиваться к оптимальной точке факторного пространства [2], что во многих случаях приводит к повышению производительности.

Применительно к изделиям с неразвертываемыми поверхностями второго порядка с малыми допусками задача сохраняет актуальность в связи с ограниченной формализацией критериев качества и значительной трудоемкостью контроля и аттестации изготовленных изделий [3].

В работах [4] и [5] были получены оценки качества поверхности второго порядка в виде линейной комбинации факторов с набором весовых коэффициентов, дающей меру качества применительно к заданному изделию.

Вместе с тем возникает задача управления технологическим процессом, использующим эту меру качества. Мера относится к готовому изделию, которое может быть получено разными способами с различным распределением интенсивности обработки на разных стадиях, что вызывает разные затраты времени и расходных материалов.

Задачу оптимизации в общем виде сформулируем как максимизацию качества изделий, выпускаемых технологической линией при вариациях внешних факторов.

Рассмотрим частный случай финишной обработки, при котором на вход линии поступают условно сферические заготовки, уже обработанные до заданного уровня чистоты, на выходе должны быть получены поверхности вращения с ненулевым эксцентриситетом.

### Постановка задачи

Получить условия максимизации качества при изготовлении изделий с поверхностями второго порядка на производственной линии, использующей метод получения таких поверхностей при центральном вращении профилированного инструмента, рассмотренного в работе [6].

### Материал исследования

Рассматриваемый принцип обработки изделий в неподвижных осях профилированным инструментом направлен на получение из сферической заготовки поверхности вращения с

ненулевым эксцентризитетом. При этом используется свойство последовательного преобразования поверхностей второго порядка, согласно которому эксцентризитет изготавливаемой поверхности постепенно увеличивается при центральном вращении прилегающего гибкого секторного инструмента. В процессе обработки вершинный радиус кривизны остается постоянным.

Получим целевую функцию оптимизации качества, используя дискретно-непрерывную меру дефектов, рассмотренную в работе [5]

$$M = \alpha \cdot \varepsilon_k + \gamma \cdot S_\delta + \delta \cdot \varepsilon_p, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_k$  - относительное отклонение размеров;  $S_\delta$  - количество единичных дефектов размера концентраторов напряжений;  $\varepsilon_p$  - относительная потеря ресурса;  $\alpha, \gamma, \delta$  - весовые коэффициенты.

Выразим величины, входящие в (1) через следующие факторы, поддающиеся управлению:

- коэффициент интенсивности съема материала  $k$ ;
- среднее давление между заготовкой и обрабатывающим инструментом  $p$ ;
- среднюю угловую скорость вращения инструмента  $\omega$ .

Будем искать оптимальную точку в факторном пространстве параметров технологического процесса.

Рассмотрим влияние компонентов, образующих целевую функцию на качество изделия.

#### *Относительное отклонение размеров*

Рассмотрим одну поверхность в виде однозначной функции прямоугольных координат  $x$  и  $y$  относительно базовой плоскости. В этом случае относительное отклонение размеров, входящее в формулу (1), можно описать соотношением

$$\varepsilon_k = \iint_D \left( \frac{h_p(x, y) - h_\phi(x, y)}{h_p(x, y)} \right) \cdot \lambda(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где  $h_p$  - расчетная высота точки поверхности с координатами  $x$  и  $y$ ;  $h_\phi$  - фактическая высота точки поверхности с теми же координатами;  $\lambda(x, y)$  - весовой коэффициент, определяющий значимость соблюдения размеров в данной точке.

Если значимость ошибки поверхности постоянна и ошибка обусловлена нерасчетным эксцентризитетом, что имеет место при центральном вращении инструмента, то при вершинном радиусе  $R$  кривизны изделия будут иметь место зависимости:

$$h_p(x, y) \approx \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R} + \frac{(x^2 + y^2)^2 \cdot (1 - e^2_p)}{8 \cdot R^3}, \quad (3)$$

$$h_\phi(x, y) \approx \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R} + \frac{(x^2 + y^2)^2 \cdot (1 - e^2_\phi)}{8 \cdot R^3}. \quad (4)$$

Введем цилиндрическую систему координат в которой разность (3) и (4) представлена выражением

$$h_p - h_\phi = \frac{r^4 \cdot (e^2_\phi - e^2_p)}{8 \cdot R^3}. \quad (5)$$

В случае малого отклонения обрабатываемого участка от плоскости, оценку (2) можно описать зависимостью

$$\varepsilon_k = \iint_{D_m} \frac{r^3 \cdot (e^2_\phi - e^2_p)}{4 \cdot R^2} \cdot \lambda(r, \phi) dr d\phi, \quad (6)$$

где  $r$  - полярный радиус;  $\phi$  - полярный угол.

В случае заданной весовой функции и обрабатываемой области вида поверхности вращения формулу (6) можно дополнительно упростить. Так, для равной степени ущерба от

отклонения поверхности в любой точке ( $\lambda = \text{const}$ ), выражение (6) может быть представлено зависимостью

$$\varepsilon_k = \frac{\pi \cdot a^4 \cdot (e_{\phi}^2 - e_p^2)}{8 \cdot R^2}, \quad (7)$$

где  $a$  – наибольший радиус детали.

С другой стороны, согласно [6], время обработки  $t$ , давление между деталью и инструментом  $p$  а также угловая скорость инструмента  $\omega$  связаны с фактически получаемым фактором формы  $e$  соотношением

$$k \cdot p \cdot t \cdot \omega = \frac{a^3 \cdot e^2}{16 \cdot \pi \cdot R^3}. \quad (8)$$

Выразив квадрат фактического фактора формы через параметры обработки, представим соотношение (7) в виде

$$\varepsilon_k = 2k \cdot \pi^2 \cdot p \cdot t \cdot \omega \cdot a \cdot R - \frac{\pi \cdot a^4 \cdot e^2}{8 \cdot R^2}. \quad (9)$$

Формула (9) показывает, что относительное отклонение размеров равно линейной комбинации произведения всех трех рассматриваемых факторов управления и обращается в ноль при выполнении соотношения (8).

*Количество единичных дефектов размера концентраторов напряжений*

Принимаем, что количество сосредоточенных (точечных и линейных) дефектов пропорционально интенсивности обработки угловой скорости инструмента, тогда получим

$$S_d = \gamma \cdot \lambda_k \cdot k + \gamma \cdot \lambda_{\omega} \cdot \omega, \quad (10)$$

где  $\lambda_k$  и  $\lambda_{\omega}$  – коэффициенты пропорциональности.

*Относительная потеря ресурса*

Будем считать, что относительная потеря ресурса фактически изготовленного изделия по сравнению с гипотетическим изделием из того же материала, но не содержащим дефекты внутренней структуры, возникшие в ходе обработки, обусловливается наличием данных дефектов.

Дефекты считаем возникающими в ходе циклического инструментального воздействия, пропорционально характеристикам периодически меняющихся нормальных и касательных напряжений.

Относительная потеря ресурса готового изделия во многом происходит вследствие развития усталостных повреждений структуры материала, приводящих к уменьшению эксплуатационной долговечности. Развивающиеся дефекты возникают в ходе циклического инструментального воздействия.

В свою очередь, принимаем, что в рассматриваемом технологическом процессе имеет место отнулевой цикл, при котором амплитуда нормальных напряжений  $\sigma_a$  в зоне обработки пропорциональна давлению заготовки на инструмент

$$\sigma_a = k_{\sigma} \cdot p, \quad (11)$$

где  $k_{\sigma}$  – коэффициент концентрации напряжений.

Средняя потеря ресурса в серии однотипных изделий на основании исследований проведенных в [9] и [10], может быть представлена выражением

$$\Delta T = t \cdot \frac{\sigma_a \cdot f}{\sigma_{a \text{ эксп}} \cdot f_{\text{эксп}}}, \quad (12)$$

где  $f$  – частота перемены напряжений при обработке,  $\sigma_{a \text{ эксп}}$  – амплитуда циклических нормальных напряжений в эксплуатации,  $f_{\text{эксп}}$  – частота перемены напряжений в эксплуатации.

Тогда относительная потеря ресурса, входящая в формулу (1), принимает вид

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta T}{T}, \quad (13)$$

где  $T$  – расчетный ресурс изделия.

Учитывая целевую функцию (1) и соотношения (7) ... (13), представим задачу максимизации качества в виде

$$\begin{cases} p \cdot k \cdot \omega = \frac{a^3 \cdot e^2 p}{16 \cdot t \cdot \pi \cdot R^3} \\ \frac{\delta \cdot t \cdot k_\sigma \cdot f}{T \cdot \sigma_{a_{\text{эксп}}} \cdot f_{\text{эксп}}} \cdot p + \gamma \cdot \lambda_k \cdot k + \gamma \cdot \lambda_\omega \cdot \omega = \min \end{cases}. \quad (14)$$

В формулировке (14) задача сводится к нахождению условного экстремума функции трех переменных в виде второго уравнения с функцией связи в виде первого уравнения.

Разделим её на три задачи однопараметрической оптимизации, поочередно фиксируя одну переменную и выполняя совместный поиск двух остальных, обеспечивающих появление стационарной точки. Проведем решение оптимизационной задачи для каждого из трёх случаев.

Введём обозначения

$$Q = \frac{a^3 \cdot e^2 p}{16 \cdot t \cdot \pi \cdot R^3}, \quad (15)$$

$$A = \frac{\delta \cdot t \cdot k_\sigma \cdot f}{T \cdot \sigma_{a_{\text{эксп}}} \cdot f_{\text{эксп}}}, \quad (16)$$

$$B = \gamma \cdot \lambda_k, \quad (17)$$

$$C = \gamma \cdot \lambda_\omega. \quad (18)$$

В случае, когда задана средняя угловая скорость обработки  $\omega$  установим оптимальные значения давления  $p$  и коэффициента интенсивности съёма материала  $k$ .

Учитывая формулы (14) ... (18), выразим коэффициент интенсивности съёма материала  $k$  в явном виде из первого уравнения системы (14)

$$k = \frac{Q}{p \cdot \omega} \quad (19)$$

Подставим выражение (19) во второе уравнение (14) и получим однопараметрическую оптимизационную задачу

$$A \cdot p + \frac{Q \cdot B}{p \cdot \omega} + C \cdot \omega = \min \quad (20)$$

Решение этой задачи возможно при тех значениях давления  $\tilde{p}$ , которые обеспечат обращение в ноль производной левой части выражения (20).

$$\frac{d}{dp} \cdot \left( A \cdot p + \frac{Q \cdot B}{p \cdot \omega} + C \cdot \omega \right) = A - \frac{B \cdot Q}{p^2 \cdot \omega}; \quad A - \frac{B \cdot Q}{\tilde{p}^2 \cdot \omega} = 0. \quad (21)$$

Уравнение (21) позволяет получить величину давления  $\tilde{p}$

$$\tilde{p} = \pm \sqrt{\frac{B \cdot Q}{A \cdot \omega}}. \quad (22)$$

По условиям физического смысла требуются положительные значения, поэтому будем проверять только величину

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{B \cdot Q}{A \cdot \omega}}. \quad (23)$$

Для того, чтобы значение давления обработки (23) обеспечило минимум, достаточным будет положительное значение второй производной левой части уравнения (20) при подстановке в неё выражения (23).

$$\frac{d^2}{dp^2} \cdot \left( A \cdot p + \frac{Q \cdot B}{p \cdot \omega} + C \cdot \omega \right) = \frac{d}{dp} \cdot \left( A - \frac{B \cdot Q}{p^2 \cdot \omega} \right) = \frac{2 \cdot B \cdot Q}{p^3 \cdot \omega}. \quad (24)$$

Учитывая, что выражения (23) положительно, то выражение (24) также будет положительно, что соответствует достаточному условию минимума.

Определим оптимальное значение коэффициента интенсивности съема материала  $\tilde{k}$ , соответствующее полученному оптимальному давлению  $\tilde{p}$ , подставляя выражение (23) в уравнение (19)

$$\tilde{k} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{B \cdot Q}{A \cdot \omega} \cdot \omega}} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{B \cdot Q \cdot \omega}{A}}} = Q \cdot \sqrt{\frac{A}{B \cdot Q \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{A \cdot Q}{B \cdot \omega}}. \quad (25)$$

Этот же результат получается, если разрешить первое уравнение системы (14) относительно коэффициента интенсивности съема материала, найти ноль производной полученной функции, а давление определить из формулы (19).

На основании вышеизложенного величина давления обработки  $\tilde{p}$  и значение коэффициента интенсивности съема материала  $\tilde{k}$ , минимизирующие целевую функцию (1), будут равны

$$\begin{cases} \tilde{p} = \sqrt{\frac{B \cdot Q}{A \cdot \omega}} \\ \tilde{k} = \sqrt{\frac{A \cdot Q}{B \cdot \omega}} \end{cases}. \quad (26)$$

*В случае, когда задано давление между инструментом и заготовкой  $p$  установим оптимальные значения коэффициента интенсивности съема материала  $\tilde{k}$  и угловой скорости инструмента  $\tilde{\omega}$ .*

Аналогично ранее рассмотренному случаю, составим целевую функцию относительно коэффициента интенсивности съема материала и оптимизируем её аналитически.

Оптимальные значения коэффициента интенсивности съема материала  $\tilde{k}$  и средней угловой скорости инструмента  $\tilde{\omega}$  будут равны

$$\begin{cases} \tilde{k} = \sqrt{\frac{C \cdot Q}{B \cdot p}} \\ \tilde{\omega} = \sqrt{\frac{B \cdot Q}{C \cdot p}} \end{cases}. \quad (27)$$

*В случае, когда задан коэффициент интенсивности съема материала  $k$  установим оптимальные значения угловой скорости инструмента  $\omega$  и давления между инструментом и заготовкой  $p$ .*

Применяя тот же подход, что и в предыдущих случаях, получим

$$\begin{cases} \tilde{\omega} = \sqrt{\frac{A \cdot Q}{C \cdot k}} \\ \tilde{p} = \sqrt{\frac{C \cdot Q}{A \cdot k}} \end{cases}. \quad (28)$$

Формулы (16) ... (18) определяют разные точки факторного пространства, выбор каждой из которых осуществляется, исходя из производственных возможностей и достигаемого качества изделий.

Совокупность оптимальных точек образует оптимальную поверхность, движение по которой устанавливает глобальный минимум целевой функции (1). В такой постановке задача оказывается эквивалентной поиску глобального максимума обобщенной целевой функции качества.

При наличии ограничений, накладываемых на параметры производственного процесса, зависимости (16) ... (18) устанавливают локальные максимумы качества выпускаемых изделий, пригодные для выбранного технологического процесса.

## Выводы

В настоящей работе рассмотрена оптимизация параметров технологического процесса изготовления деталей с поверхностями второго порядка.

Оптимизация направлена на максимизацию качества изделий, выпускаемых технологической линией при вариациях внешних факторов.

Максимизация качества достигалась как минимум целевой функции (1) возникающих дефектов, в качестве которых учитывались интегральная мера отклонений поверхности от расчетной, количество сосредоточенных дефектов и степень потери эксплуатационного ресурса вследствие технологической усталости от воздействия циклических нагрузок при обработке.

Целевая функция (1) была выражена через параметры технологического процесса: коэффициент интенсивности съёма материала, угловую скорость инструмента и удельное давление между инструментом и заготовкой, которые при точно выполненной поверхности должны дополнительно удовлетворять соотношению (8) в результате были получены формулы (14), являющиеся формализацией рассматриваемой оптимизационной задачи.

В постановке (14) были получены аналитические решения при фиксации одного параметра из трёх и нахождения стационарных точек по двум остальным, непосредственные результаты представлены в виде формул (26) ... (28).

Отметим, что задача допускает также нахождение единственной точки как глобального минимума, что предполагает все три фактора переменными, и может быть выполнено, в частности, методом множителей Лагранжа.

Предложенная методика обеспечивает максимизацию качества изготавливаемого изделия исходя из производственных условий, что позволяет повысить эффективность технологического процесса в условиях серийного производства деталей с малыми допусками.

Направлением дальнейших исследований представляется оценка отклика рассмотренной технологической системы на флуктуации технологических факторов и построение системы управления качеством на этой основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chukwunweike, J., Anang, A. N., Adeniran, A. A., & Dike, J. (2024). Enhancing manufacturing efficiency and quality through automation and deep learning: addressing redundancy, defects, vibration analysis, and material strength optimization Vol. 23. World Journal of Advanced Research and Reviews. GSC Online Press.
2. Matos, M. A., Rocha, A. M. A., & Costa, L. A. (2021). Many-objective optimization of build part orientation in additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112(3), 747-762.
3. Tang, L., & Meng, Y. (2021). Data analytics and optimization for smart industry. Frontiers of Engineering Management, 8(2), 157-171.
4. Неменко А.В. Оценки качества изделий с поверхностями второго порядка/ А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии,2024,№6(368),С
5. Неменко А.В. Непрямые оценки качества поверхностей второго порядка при финишной обработке/ А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023,№4(360),С.84-89.
6. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке / А.В.Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии,2020, №4(342), С. 52-58.
7. Xie, M., Pan, Y., An, Z., Huang, S., & Dong, M. (2022). Review on surface polishing methods of optical parts. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1), 8723269.
8. Неменко А.В. Оценка изменения структуры материала изделия при его механической обработке / А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №4(348),С. 164-169.
9. Неменко А.В. Прогноз трещиноустойчивости изделия после механической обработки/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№4(348),С. 170-174.
- 10.Неменко А.В. Прочностная надежность изделия в зависимости от особенностей финишной обработки/ А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №5(355), С. 144-149.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788150316  
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M.

## PARAMETER OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS WHILE MANUFACTURING OF PRODUCTS WITH SECOND ORDER SURFACES

**Abstract.** In the production of machine parts with second-order surfaces, the stability of the quality of the manufactured products is of great importance. The quality is affected by the conformity of the geometry along the entire surface of the product, the presence of concentrated defects, and the expected resource of the product under cyclic loads. These values vary depending on the adopted technological process. In this paper, we consider the final aspherization of the original spherical blanks with the central rotation of a sector multi-petal tool and obtain the coordinates of the optimal point in the factor space of parameters that maximize the quality of the resulting details.

**Keywords:** parts of machines, second-order surfaces, modeling, finishing, technological fatigue, cyclic loading.

### BIBLIOGRAPHY

1. Chukwunweike, J., Anang, A. N., Adeniran, A. A., & Dike, J. (2024). Enhancing manufacturing efficiency and quality through automation and deep learning: addressing redundancy, defects, vibration analysis, and material strength optimization Vol. 23. World Journal of Advanced Research and Reviews. GSC Online Press.
2. Matos, M. A., Rocha, A. M. A., & Costa, L. A. (2021). Many-objective optimization of build part orientation in additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112(3), 747-762.
3. Tang, L., & Meng, Y. (2021). Data analytics and optimization for smart industry. Frontiers of Engineering Management, 8(2), 157-171.
4. Nemenko A.V. Ocenikachestvaizdelij s poverhnostjamivtorogoporjadka/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii,2024,№6(368),S
5. Nemenko A.V. Neprjamyeocenikachestvapoverhnostejevtorogoporjadkaprifinishnojobrabitke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii, 2023,№4(360),C.84-89.
6. Nemenko A.V. Upravlenieprocessompoluchenijapoverhnostejevtorogoporjadkaprifinishnojobrabitke /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii,2020,№4(342),S. 52-58.
7. Xie, M., Pan, Y., An, Z., Huang, S., & Dong, M. (2022). Review on surface polishing methods of optical parts. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1), 8723269.
8. Nemenko A.V. Ocenkaizmenenijastrukturymaterialaizdelijapri ego mehanicheskoyobrabitke /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii, 2021,№4(348),S. 164-169.
9. Nemenko A.V. Prognoztreshhinoustojchivostiiuzdelijaposlemechanicheskoyobrabitki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii, 2021,№4(348),S. 170-174.
10. Nemenko A.V. Prochnostnajanadezhnost izdelija v zavisimostitosobennostejefinishnojobrabitki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnyeiprikladnyeprblemytehnikiitehnologii, 2022,№5(355),S. 144-149.

**Nemenko Aleksandra Vasilyevna**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol  
Ph.D., docent of chair «Digital design »  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788330519  
E-mail:valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhaylovich**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol  
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788150316  
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-69-75

БОНДАРЕНКО М.Э., ГОРИН А.В., КОЧЕТКОВ Е.В.,  
СЕРЕБРЕННИКОВ А.Д., БОНДАРЕНКО К.В.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ С ИНЕРЦИОННЫМ ГАСИТЕЛЕМ НА ПОДШИПНИКОВЫЕ УЗЛЫ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований вибрационного состояния подшипника качения экспериментального роторного стенда с инерционным гасителем. Показана установка для экспериментальных исследований. Представлены зависимости, позволяющие рассчитать частоты дефектов дорожек колец, элементов качения и сепаратора подшипника качения. Установлено, что спектры выброскорости и выброускорения подшипника качения позволяют выявить в системе дополнительные вибрационные воздействия, которые связаны с наличием неуравновешенных масс ротора, а также с наличием дефектов подшипника качения: деформацией внешней и внутренней дорожек качения, деформацией тела качения и трещины в сепараторе. Даны рекомендации по снижению интенсивности колебаний роторной системы

**Ключевые слова:** подшипник, вибрация, скорость, ускорение, деформация.

#### **Введение**

Роторные системы как сложные динамические объекты являются источниками вибрации и шума [1-4]. Вибрационные процессы генерируются в различных частях роторной системы и в случае превышения определенных нормативных показателей могут приводить к аварийным ситуациям [5, 6]. Кроме того, вибрации в инфра и низкочастотном спектре оказывают вредное воздействие на самочувствие и работоспособность человека-оператора [7]. Для снижения интенсивности вибрации используют виброзащитные системы. Причем непосредственное контактное взаимодействие виброзащитной системы с источником вибрации позволяет наилучшим образом блокировать распространение колебаний [8].

Разработка высокоэффективных виброзащитных систем является сложной задачей. На первом этапе её решения необходимо получить достоверную информацию об исходном вибрационном состоянии различных частей роторной системы [9]. По крайней мере это необходимо для создания адекватной математической модели «источник вибрации – виброзащитная система – защищаемый объект» и дальнейшего использования методов оптимизации [10].

В статье изложены результаты мониторинга вибрационного состояния экспериментального роторного стенда, учитывающие дефекты подшипникового узла и наличие неуравновешенной массы ротора. На основании этой информации предложены и обоснованы варианты виброзащитных систем подшипника качения и ротора.

#### **Основная часть**

Экспериментальная установка, показанная на рисунке 1 представляет собой роторно-опорный узел, состоящий из асинхронного электродвигателя 1 соединённого через муфту 2 с ротором 3, который установлен в опорных подшипниковых узлах 4 и 5, закрепленных на платформе 6. На роторе 3 закреплен нагруженный диск 7 с возможностью установки элементов 8 для изменения дисбаланса системы. Опорный узел с подшипником качения 4 и 5 представляет собой корпус 9, в котором размещена промежуточная втулка-корпус 10 с подшипником качения 11.

Осьное крепление подшипников качения 11 относительно корпуса осуществляется с помощью закладных крышек 12 и 13, а относительно ротора 3 с упором в ступень 14 и стопорным кольцом (на рисунке не указано). Управление двигателем 1 осуществлялось с помощью частотного преобразователя 15. В качестве контрольно-измерительной системы 16 для оценки вибрации в опорных подшипниковых узлах использовали виброанализатор АГАТ-М.

Эксперимент проводился на стационарной частоте вращения 50 Гц. В таблице 1 отображены технические характеристики диагностируемого подшипника качения 6202, используемого в качестве опоры.

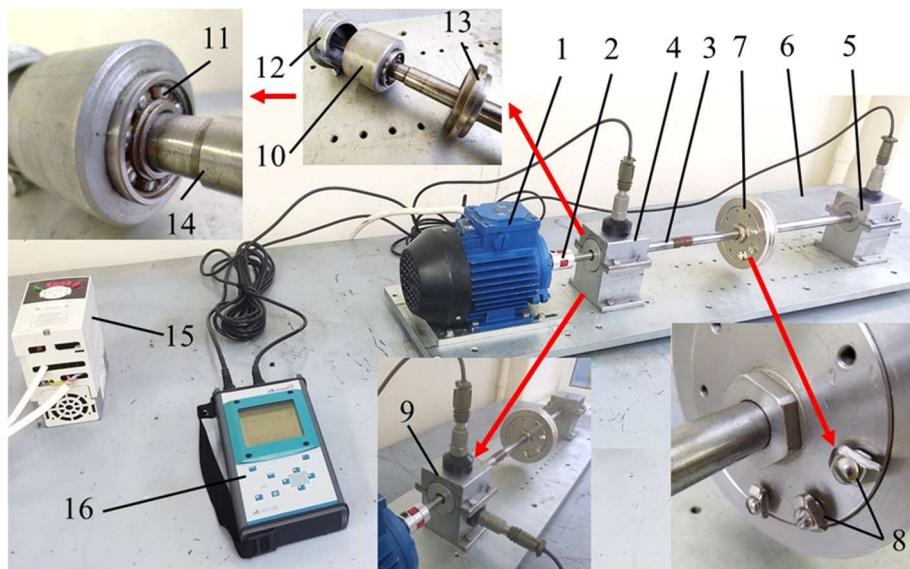


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

Таблица 1 - Технические характеристики подшипника качения

Параметры	Обозначение	Значение
Диаметр шарика	$d$	0,00794 м
Диаметр делительной окружности	$D$	0,025 м
Количество шариков	$N$	8
Угол контакта	$\alpha$	0°

По имеющимся техническим характеристикам подшипника качения можно теоретически рассчитать частоты дефектов дорожек колец, элементов качения и сепаратора подшипника качения [11, 12].

Частота дефекта внешней дорожки (BPFO - Ball Pass Frequency Outer race):

$$BPFO = \frac{N}{2} fr \left( 1 - \frac{D}{d} \cos(\alpha) \right), \quad (1)$$

где  $N$  – количество элементов качения;

$fr$ , Гц – частота вращения вала;

$d$ , м – диаметр элемента качения;

$D$ , м – диаметр делительной окружности подшипника;

$\alpha$ , рад – угол контакта.

Частота дефекта внутренней дорожки (BPFI - Ball Pass Frequency Inner race):

$$BPFI = \frac{N}{2} fr \left( 1 + \frac{D}{d} \cos(\alpha) \right). \quad (2)$$

Частота дефекта элемента качения (BSF - Ball Spin Frequency):

$$BSF = \frac{D}{2d} fr \left( 1 - \left( \frac{D}{d} \cos(\alpha) \right)^2 \right). \quad (3)$$

Частота дефекта сепаратора (FTF - Fundamental Train Frequency):

$$FTF = \frac{fr}{2} \left( 1 - \frac{D}{d} \cos(\alpha) \right). \quad (4)$$

Частоты дефектов (BPFO, BPFI, BSF, FTF) используются при проведении анализа вибрационных сигналов. Так, совпадение пиков на спектре вибрации с теоретически

рассчитанными частотами дефектов указывает на наличие соответствующих повреждений. Например, если повреждена наружная дорожка подшипника, то это неизбежно приводит к повышению интенсивности вибрационного воздействия на частоте BPFO.

Согласно представленных уравнений проведен расчет дефектов дорожек колец, элементов качения и сепаратора подшипника качения и представим полученные значения в таблице 2.

Таблица 2 - Частота вращения и частоты неисправностей подшипника качения

№	Параметр	Значение
1	Частота вращения, Гц	50
2	BPFO - частота прохода тела качения по наружной дорожке качения, Гц	136,5
3	BPFI - частота прохода тела качения по внутренней дорожке качения, Гц	263,5
4	BSF - частота вращения тела качения, Гц	70,8
5	FTF - основная частота качения, Гц	17,1

Проводимый эксперимент делился на три этапа: первый – включал в себя снятие вибрационных сигналов (виброскорости и виброускорения) для нового (идеального) подшипника качения; второй этап – снятие вибрационных сигналов для нового подшипника качения, воспринимающего вибрационные воздействия от неуравновешенной массы ротора; третий этап – снятие вибрационных сигналов для подшипника качения с заранее заложенными дефектами, а также воспринимающего вибрационные воздействия от неуравновешенной массы ротора.

Роль неуравновешенной массы выполнял трёхграммовый элемент 8 установленный на диске 7 ротора 3 (рисунок 1) с эксцентризитетом 0,05 м. Подшипник качения имел следующие дефекты: деформацию внешней и внутренней дорожек качения, деформацию тела качения и трещину в сепараторе.

Задача экспериментальных исследований, связанная с мониторингом вибрационного состояния подшипниковых узлов, заключается в получении исходной информации, которая необходима для выбора и обоснования систем виброзащиты, обеспечивающих вибрационную безопасность роторных систем.

В ходе проведенных экспериментов были получены следующие результаты. На рисунке 2 – 4 представлены спектры виброскорости в полосе частот 0 – 1000 Гц, снятые при частоте вращения ротора 50 Гц.

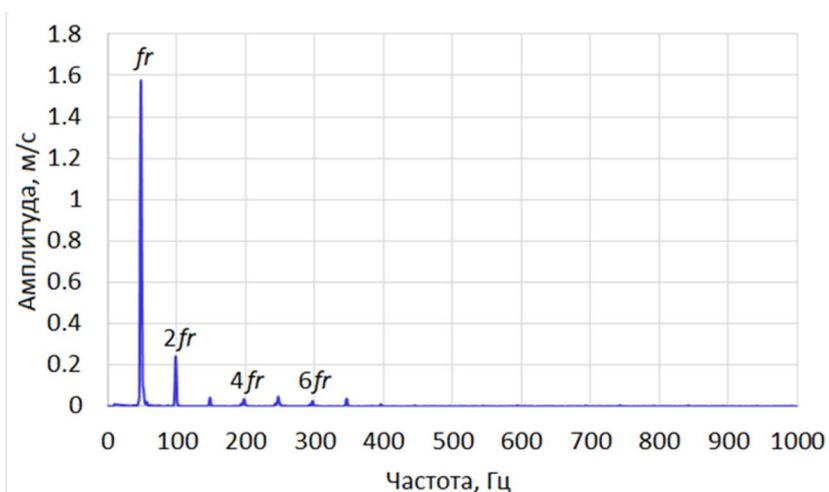


Рисунок 2 - Спектр FFT вертикальной скорости для подшипника без дефектов

Спектр виброскорости на рисунке 2 демонстрирует хорошее состояние нового подшипника качения, которое характеризуется низким уровнем основной гармоники на преобладающей частоте вращения ротора и наличием ряда гармоник малой амплитуды 2fr, 3fr, 4fr, 5fr, 6fr, 7fr.

На рисунке 3 представлен спектр виброскорости, который характеризует влияние на подшипник качения дополнительных вибрационных воздействий, связанных с наличием неуравновешенных масс ротора. Отмечается, что в этом случае амплитуда основной гармоники увеличилась почти в 2 раза.

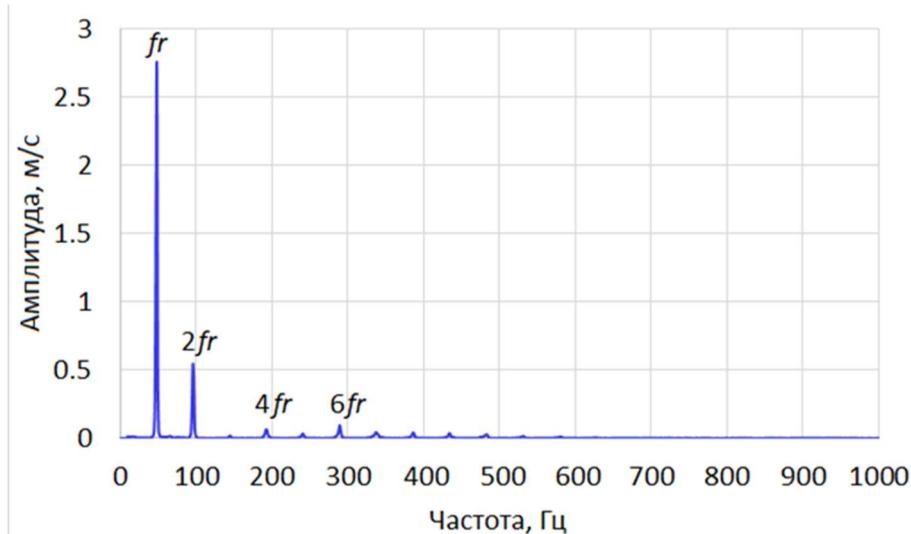


Рисунок 3 - Спектр FFT вертикальной скорости для подшипника при наличии неуравновешенной массы ротора

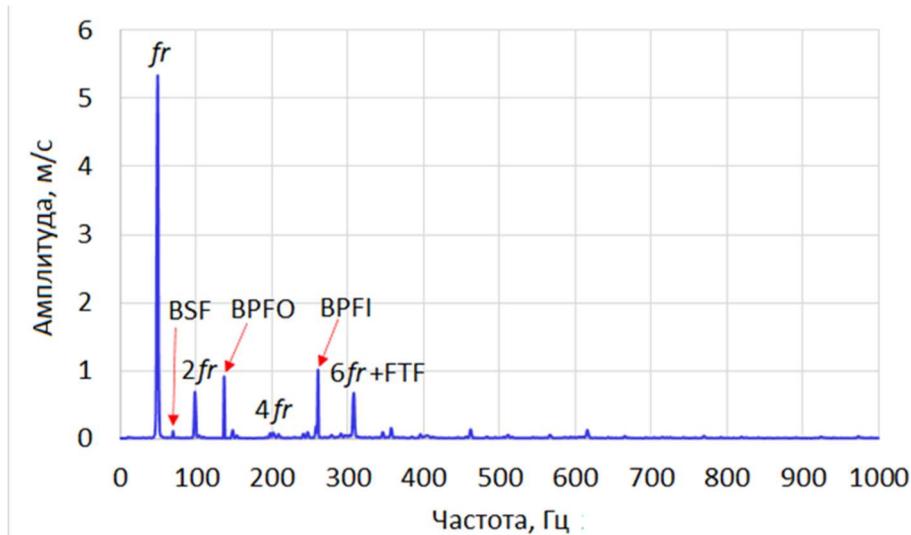


Рисунок 4 - Спектр FFT вертикальной скорости для поврежденного подшипника

Дополнительно на рисунке 4 представлен спектр виброскорости, который позволяет идентифицировать по периодическим импульсам (пиковым значениям) соответствующие дефекты, а также наличие неуравновешенных масс ротора. Пиковые значения спектра виброускорения на частотах  $fr=50$  Гц,  $BPFO = 136,5$  Гц,  $BPFI = 263,5$  Гц,  $BSF = 70$  Гц свидетельствуют соответственно о наличии дисбаланса ротора, неисправности внешнего кольца, неисправности внутреннего кольца, неисправности тела качения. Кроме того, также идентифицируется гармоника, генерируемая модуляцией частот неисправности сепаратора, такая как  $6fr + FTF = 317$  Гц, что в целом представляет собой типичную вибрационную характеристику подшипников качения с начальными дефектами дорожек качения, тела качения и сепаратора [13].

Для подшипников качения также можно выделить характерные спектрограммы вертикального виброускорения, связанные с различной степенью повреждения, представленные на рисунках 5 и 6.

Как видно, исправное состояние подшипника качения характеризуется наличием незначительных по амплитуде составляющих в низкочастотной области исследуемого спектра

10...4000 Гц. Наличие же повреждений подшипника качения связано с образованием широкополосного шума в области высоких частот в диапазоне 7...10 кГц с пиковыми значениями 2,5...4 м/с<sup>2</sup>. Дальнейшая эксплуатация подшипника качения без наличия виброзащитной системы неизбежно приведет к аварийной ситуации.

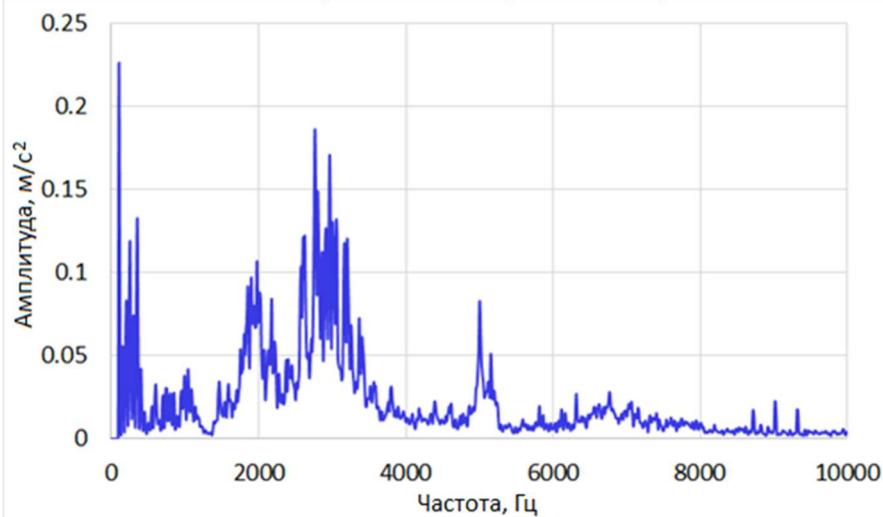


Рисунок.5 - Спектр вертикального виброускорения для подшипника без дефектов

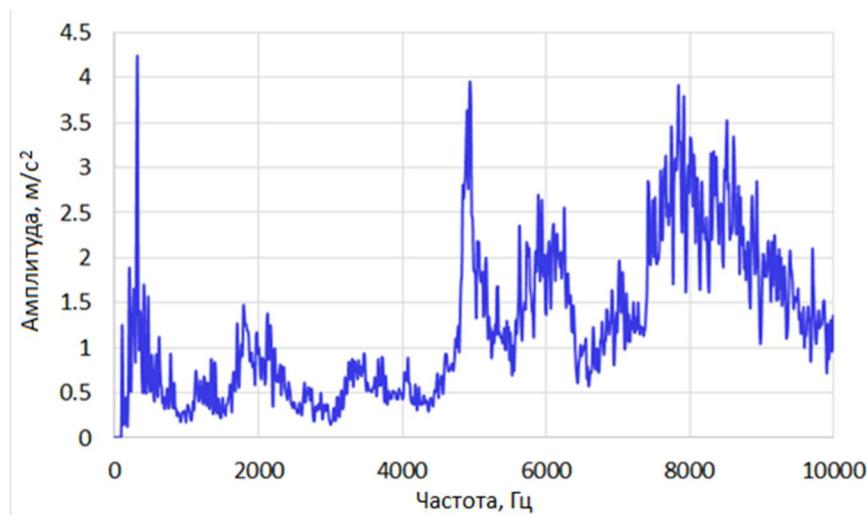


Рисунок.6 - Спектр вертикального виброускорения для поврежденного подшипника

Поскольку роторная система генерирует высокочастотные и существенно нелинейные вибрационные процессы, то для снижения их интенсивности и, соответственно, повышения вибрационной безопасности роторной системы, необходимо применять высокоэффективные управляемые виброзащитные системы. Предполагается, что при оптимальном управлении исполнительные элементы этих систем, которые реализуют, например, пьезоэлектрические или магнитострикционные эффекты, могут обеспечить требуемую интенсивность вибрации подшипниковых узлов [14]. Аналогично, с этими же целями, при наличии электромагнитных актуаторов, действующих на ротор, можно целенаправленно изменять относительное смещение ротора [15].

### Выводы

В результате мониторинга вибрационного состояния подшипника качения экспериментальной роторной системы установлено, что спектры виброскорости и виброускорения подшипника качения позволяют выявить в системе дополнительные вибрационные воздействия, которые связаны с наличием неуравновешенных масс ротора, а также с наличием дефектов подшипника качения: деформацией внешней и внутренней дорожек качения, деформацией тела качения и трещины в сепараторе.

Поскольку роторная система генерирует высокочастотные и существенно нелинейные вибрационные процессы, то для снижения их интенсивности и, соответственно, повышения вибрационной безопасности роторной системы, необходимо применять высокоэффективные управляемые виброзащитные системы.

*Работа выполнена в ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-08 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 23.08.2024 г., проект 1024041900021-8-2.3.1;2.2.3 Разработка конструкторских и программно-аппаратных решений управления вибрационными процессами в вертолётном транспорте, обеспечивающих формирование оптимальных компенсационных воздействий (FSGN-2024-0013).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хвостиков А.С. Вибрационный анализ роторной системы турбокомпрессоров // Современные научноемкие технологии. 2020. № 6-2. С. 293-298.
2. Калашников В.С., Кузина Е.А., Яшин Д.С. Анализ причин возникновения вибрации в изделиях авиационной техники // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Том 1. С.165-167.
3. Алексеева Л.Б., Уваров В.П. Причины возникновения и методы уменьшения вибраций роторных машин // Наука и современность. 2012. №18. С. 172-176.
4. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Причины и снижение низко- и высокочастотной вибрации энергетических машин // Современные научноемкие технологии. 2015. № 4. С. 89-94.
5. Миронов Д.А., Сальников А.Ф. Анализ исследований динамического поведения роторных систем в процессе эксплуатации (обзор) // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2023. №73. С. 41-51.
6. Белобородов С.М., Цельмер М.Л., Модорский В.Я. Анализ и минимизация аварийной вибрационности высокоскоростных роторов // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. №5. С. 53-55.
7. Говердовский В.Н, Зобов А.В. Состояние и методы повышения качества виброзащиты вертолета // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 4. С. 191-196.
8. Кирюхин А.В., Мильман О.О., Сережкин Л.Н., Лошакарева Е.А. Снижение вибрации и шума от энергетических установок пассивными и активными методами // Теплоэнергетика. 2022. №11. С. 57-68.
9. Чичков Б.А. Способ вибрационного мониторинга роторных машин // Научный Вестник МГТУ ГА 2018 Том 21. №1. С. 137-146.
10. Чернышев В.И., Майоров С.В., Фоминова О.В. Разработка модели управляемой роторной системы // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 6. С. 128-135.
11. Jinfeng Huang, Lingli Cui, Jianyu Zhang. Tracking the location of bearing outer raceway defects using multidimensional synchronous signal fusion and tensor Rank-1 decomposition. Measurement Volume 198. July 2022. 111137
12. Xiaomeng Li, Yi Wang, Guangyao Zhang, Baoping Tang, Yi Qin. Correlation warping radius tracking for condition monitoring of rolling bearings under varying operating conditions. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 208, 15 February 2024, 110943
13. Ступин А.В., Пудов Д.И. Эксплуатационные дефекты подшипников качения и их проявление в выбросигнале // Научный альманах. 2016. №4-3(18). С. 197-204.
14. А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, П.В. Карев Исполнительные устройства и системы для микропреремещений. СПб: Университет ИТМО, 2017. 134 с.
15. Брель Д.И., Гаммель Р.А., Гордиенко А.В. Применение «умных» структур в станкостроении // Новые горизонты - 2022: сборник материалов IX Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, 10-11 ноября 2022 года. Минск: БНТУ, 2022. С. 85-87.

**Бондаренко Максим Эдуардович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Горин Андрей Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Кочетков Евгений Викторович**

Академия ФСО России, г.Орел  
кандидат технических наук, сотрудник  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: mr.koch91@mail.ru

**Бондаренко Кристина Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
студент  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Серебренников Антон Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: silver 57.93@mail.ru

BONDARENKO M.E., GORIN A.V., KOCHETKOV E.V., SEREBRENNIKOV A.D., BONDARENKO K.V.

## STUDY OF VIBRATION EFFECT OF A SYSTEM WITH AN INERTIAL DAMPER ON BEARING UNITS

**Abstract.** The article presents the results of monitoring studies of the vibration state of the rolling bearing included in the experimental rotor stand. The experimental research setup is shown. Dependencies are presented that allow calculating the frequencies of defects in the ring tracks, rolling elements and separator of a rolling bearing. It is established that the vibration velocity and vibration acceleration spectra of a rolling bearing allow identifying additional vibration effects in the system that are associated with the presence of unbalanced rotor masses, as well as with the presence of rolling bearing defects: deformation of the outer and inner rolling tracks, deformation of the rolling element and cracks in the separator. Recommendations are given for reducing the intensity of vibrations of the rotor system.

**Keywords:** bearing, vibration, speed, acceleration, deformation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Khvostikov A.S. Vibration analysis of the rotor system of turbochargers // Modern science-intensive technologies. 2020. No. 6-2. P. 293-298.
2. Kalashnikov V.S., Kuzina E.A., Yashin D.S. Analysis of the causes of vibration in aviation products // Proceedings of the international symposium "Reliability and Quality". 2016. Vol. 1. P. 165-167.
3. Alekseeva L.B., Uvarov V.P. Causes of occurrence and methods for reducing vibrations of rotary machines // Science and Modernity. 2012. No. 18. P. 172-176.
4. Mindrin V.I., Pachurin G.V., Rebrushkin M.N. Causes and reduction of low- and high-frequency vibration of power machines // Modern science-intensive technologies. 2015. No. 4. P. 89-94.
5. Mironov D.A., Salnikov A.F. Analysis of studies of the dynamic behavior of rotor systems during operation (review) // Bulletin of PNIPU. Aerospace engineering. 2023. No. 73. P. 41-51.
6. Beloborodov S.M., Tselmer M.L., Modorskiy V.Ya. Analysis and minimization of emergency vibration activity of high-speed rotors // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2017. No. 5. P. 53-55.
7. Goverdovsky V.N., Zobov A.V. Status and methods for improving the quality of helicopter vibration protection // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2009. No. 4. P. 191-196.
8. Kiryukhin A.V., Milman O.O., Serezhkin L.N., Loshkareva E.A. Reduction of vibration and noise from power plants by passive and active methods // Thermal Power Engineering. 2022. No. 11. P. 57-68.
9. Chichkov B.A. Method of vibration monitoring of rotary machines // Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation 2018 Vol. 21. No. 1. P. 137-146.
10. Chernyshev V.I., Mayorov S.V., Fominova O.V. Development of a model of a controlled rotor system // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2017. No. 6. P. 128-135.
11. Jinfeng Huang, Lingli Cui, Jianyu Zhang. Tracking the location of bearing outer raceway defects using multidimensional synchronous signal fusion and tensor Rank-1 decomposition. Measurement Volume 198. July 2022. 111137
12. Xiaomeng Li, Yi Wang, Guangyao Zhang, Baoping Tang, Yi Qin. Correlation warping radius tracking for condition monitoring of rolling bearings under varying operating conditions. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 208, 15 February 2024, 110943
13. Stupin A.V., Pudov D.I. Operational defects of rolling bearings and their manifestation in vibration signal // Scientific almanac. 2016. No. 4-3 (18). P. 197-204.
14. A.A. Bobtsov, V.I. Boykov, S.V. Bystrov, V.V. Grigoriev, P.V. Karev. Actuators and systems for micro-movements. SPb: ITMO University, 2017. 134 p.
15. Brel D.I., Gammel R.A., Gordienko A.V. Application of "smart" structures in machine tool building // New horizons - 2022: collection of materials of the IX Belarusian-Chinese youth innovation forum, November 10-11, 2022. Minsk: BNTU, 2022. P. 85-87.

#### **Bondarenko Maxim Eduardovich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

#### **Gorin Andrei Vladimirovich**

Orel State University  
Associate professor of the department mechatronics,  
mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### **Kochetkov Evgeniy Viktorovich**

Academy of the Federal Security Service of Russia  
candidate of Technical Sciences, employee  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: mr.koch91@mail.ru

#### **Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57/93@mail.ru

#### **Bondarenko Kristina Vladimirovna**

Orel State University,  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

КОЗЫРЕВ Д.Л., ПОЛЯКОВ Р.Н., ГОРИН А.В., СЕРЕБРЕННИКОВ А.Д.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ДЕМПФЕРА СУХОГО ТРЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА ВИБРОЗАЩИТЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПЛАТФОРМ

**Аннотация.** В статье рассматривается потенциал применения управляемого демпфера сухого трения при проектировании транспортных медицинских платформ. Представлена структурно-функциональная схема подвески. Предложен алгоритм работы фрикционного амортизатора, а также конструктивные решения. Сделаны выводы о путях дальнейшего совершенствования подобных систем.

**Ключевые слова:** управляемый демпфер, сухое трение, мехатронная система, транспортировка, рычажная подвеска, силовой закон, алгоритм демпфирования.

### Введение

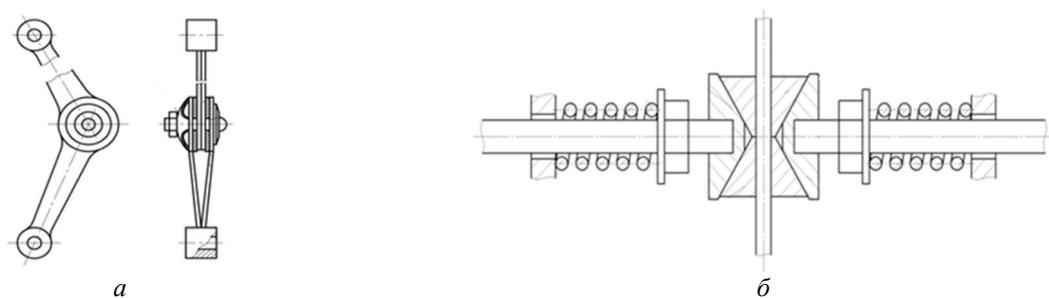
Проблема защиты оборудования и грузов от вибраций при транспортировке является одной из ключевых задач современной инженерии. Механизмы виброзащиты должны обеспечивать минимизацию динамических нагрузок, возникающих вследствие движения транспортного средства по неровностям дороги или рельсовому пути [1, 2]. При транспортировке тяжелобольных накладывается ряд повышенных требований вибрационной защите, так как именно низкочастотные колебания оказывают наиболее негативное воздействие на организм человека. Традиционные методы борьбы с вибрациями включают использование пружинных амортизаторов, гидравлических демпферов и других устройств, основанных на упругости материалов и вязкости жидкостей [3, 4]. Однако эти системы имеют ряд недостатков, таких как сложность конструкции, высокая стоимость обслуживания и ограниченная эффективность при небольших частотах колебаний, невозможность достаточно быстро адаптирования к изменяющимся внешним факторам.

### Основная часть

Амортизационные свойства фрикционных демпферов основывается на трении поверхностей твердых рабочих элементов. Фрикционные амортизаторы обладают простотой конструкции, устойчивостью к мелким повреждениям, относительно простой ремонтопригодностью [5, 6]. Рабочие характеристики фрикционных демпферов практически не чувствительны к изменению положения в пространстве. Главный недостаток фрикционных демпферов – износ труящихся поверхностей.

Амортизаторы с жёсткими элементами, которые обеспечивают трение, можно классифицировать по определённым признакам:

1. по принципу создания давления на труящихся поверхностях: дисковые, клиновые (рисунок 1);



*Рисунок 1 – Схемы фрикционных амортизаторов: а – дисковый, б – клиновый*

2. по типу используемых материалов (стальными, металлокерамические, пластиковые поверхности трения);

3. по типу используемых к конструкции упругих элементов (пружинно-фрикционные, резино-фрикционные элементы);
4. по типу используемых к конструкции упругих элементов (пружинно-фрикционные, резино-фрикционные элементы);
5. по типу используемых к конструкции упругих элементов (пружинно-фрикционные, резино-фрикционные элементы);
6. по алгоритму совместной работы упругих и фрикционных элементов (на демпферы с одновременно работающими элементами и включающимися в работу по заданному закону демпфирования);
7. по видам силовых законов. (рисунок 2) [7].

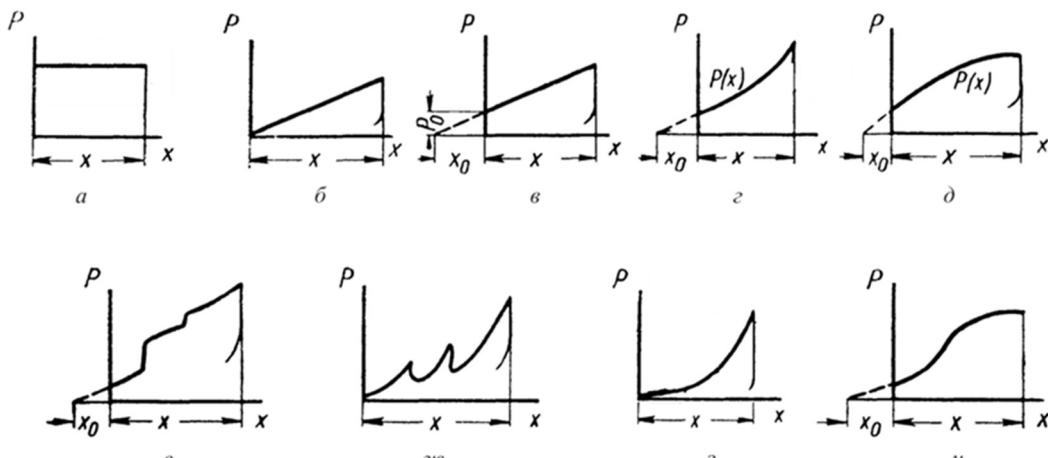


Рисунок 2 – Виды силовых законов демпфирования

Силовой закон является наиболее важным показателем работы демпфера и представляет собой зависимость между силой  $P$  и перемещением  $x$ . При этом энергия удара, воспринимаемая демпфером

$$E = \int_0^x P(x)dx, \quad (1)$$

т.е. численно равна площади под кривой на рисунке 2. Коэффициент эффективности  $\xi$  также характеризует работу демпфера и показывает какой ход имел бы идеальный демпфер при заданной максимальной силе  $P_{\max}$  и энергии удара  $E$ .

$$\xi = \frac{E}{P_{\max}} \quad (2)$$

Выбор материалов трущихся поверхностей является ключевым фактором при разработке демпфера. Стальные трущиеся поверхности, например, могут демонстрировать изменчивость коэффициента трения при длительной работе амортизатора. К поверхностям фрикционной пары обычно предъявляют следующие требования:

1. Колебания коэффициента трения в процессе эксплуатации должны быть незначительными и не сказываться на функционировании демпфера;
2. Значение коэффициента трения должно быть достаточно высоким, чтобы обеспечить диссипацию энергии возмущающего воздействия;
3. Трущиеся поверхности должны обеспечивать долговечность и не подвергаться значительному износу;
4. В то же время поверхности не должны схватываться, так как это приводит к заклиниванию и выходу из строя.

Существует несколько видов износа фрикционной пары. Механический износ возникает при абразивном взаимодействии трущихся поверхностей. Фрикционное взаимодействие осуществляется через малые площадки контакта размером от 30 до 50 мкм. При механическом износе фактическая площадь контакта уменьшается, что приводит к

увеличению давления на трещицкие поверхности. При нормальной работе фрикционной пары трещицкие поверхности подвергаются упругой деформации. Увеличение давления влечёт за собой появление пластической деформации, так возникает молекулярно-механический износ.[8, 9]. Также на работоспособность фрикционной пары влияют коррозионные и окислительные процессы. Стоит отметить, что наличие оксидной пленки может предохранять поверхности от непосредственного контакта и схватывания.[10].

На рисунке 3 представлена виброзащитная платформа для транспортировки пострадавшего.

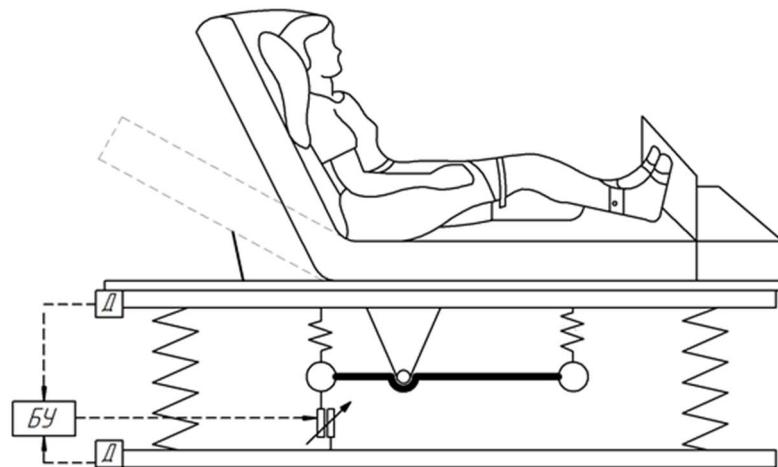


Рисунок 3 – Виброзащитная платформа для транспортировки пострадавшего

В основе конструкции лежит рычажный механизм, а также управляемый демпфер сухого трения. Применение рычажной схемы в конструкции подвески позволяет уменьшить габаритные размеры и даёт возможность относительно легко откалибровать виброзащитные свойства в зависимости от массы пострадавшего путём изменения соотношения плеч рычага. Также рычаг с закреплённой на одном из плеч дополнительной массой можно рассматривать как динамический гаситель. Применение демпфера прерывистого действия даёт возможность адаптироваться к различным дорожным условиям. На схеме присутствуют два датчика  $D$ , которые передают в блок управления БУ информацию о колебаниях основания и колебаниях, которые воздействуют на пострадавшего. Блок управления генерирует управляющий сигнал для осуществления прерывистого демпфирования.

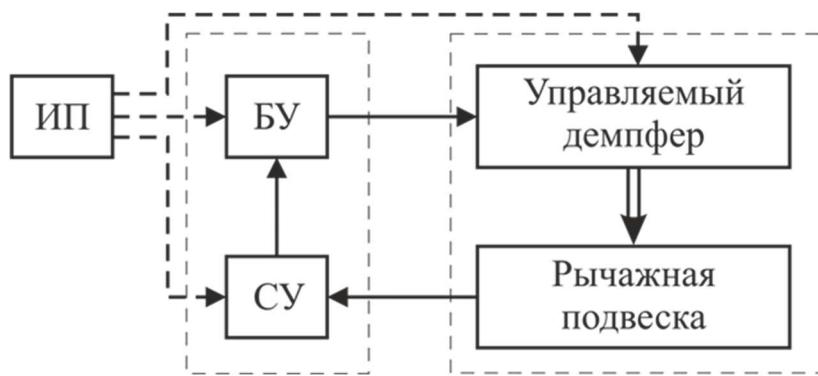


Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема подвески

Применение управляемого демпфирования позволяет рассматривать подвеску как сложную систему, включающую в себя механические, электрические и электронные компоненты, то есть можно говорить о мехатронной виброзащитной системе. В такой системе можно выделить три основные части: механическую, электронную и информационно-измерительную. Такое разделение на части, которые работают на основе разных физических

принципов, позволяет определить требования к каждому компоненту в отдельности. Это, в свою очередь, даёт возможность проектировать подсистемы системы независимо и параллельно. Функциональная схема управляемой подвески как мехатронной системы представлена на рисунке 4. [11, 12].

Механическая подсистема представляет собой неотъемлемую часть установки, которая активно участвует в рабочем процессе. В её состав входят подвеска с объектом защиты и управляемый демпфер, который регулирует усилие, влияющее на свойства подвески. При разработке механической подсистемы необходимо уделить внимание вопросам прочности, надёжности, выбору материалов и другим аспектам. Важно отметить, что для функционирования рассматриваемой виброзащитной системы достаточно наличия только механической части. Остальные подсистемы служат для увеличения виброзащитных свойств при сложных дорожных условиях.

Информационно-измерительная система отслеживает состояние электромеханической системы и генерирует управляющий сигнал, который определяет режим демпфирования. В состав системы сбора информации входят датчики (сенсорные устройства, СУ), которые собирают данные о текущем состоянии подвески, и блок управления БУ, который на основе этих данных формирует управляющий сигнал. Задачей датчика также является преобразование неэлектрической величины (в данном случае механическое перемещение) в электрический сигнал. В современных измерительных системах этот сигнал проходит через несколько этапов преобразования, каждый из которых вносит свою погрешность.[7]. Кроме того, на сигнал могут влиять внешние помехи. Поэтому при проектировании системы сбора информации важно выбрать датчики, которые обеспечивают необходимую точность и будут работать в заданных условиях. Блок управления в современных системах представляет собой микропроцессорное устройство, поэтому разработка системы сбора информации включает в себя также создание программы, которая реализует алгоритм демпфирования.

Демпфер наиболее эффективен, когда включен в работу в тот момент, когда сила демпфирования противодействует росту скорости движения объекта защиты  $\dot{x}$ . Направление же силы демпфирования определяется соотношением  $(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x})$ , где  $\dot{z}$  – скорость основания,  $\dot{y}$  – линейная скорость плеча рычага. Тогда условие включения демпфера в работу:

$$\dot{x}(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x}) < 0. \quad (3)$$

На рисунке 5 изображена блок-схема алгоритма демпфирования. Если частота входных колебаний приближается к резонансной, проверяется условие (3) и принимается решение о включении или выключении демпфера.



Рисунок 5 – Алгоритм работы фрикционного амортизатора

### Заключение

В итоге можно сделать вывод о том, что использование демпферов сухого трения в конструкции механизма виброзащиты для транспортных платформ является перспективным

решением. Эти устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с гидравлическими амортизаторами:

–Сила трения демпфера не зависит от текущего состояния, что упрощает построение системы управления демпфированием.

–При срабатывании демпфера отсутствуют переходные процессы, сила демпфирования остаётся постоянной, что повышает быстродействие и эффективность демпфирования.

–Фрикционный демпфер нечувствителен к расположению в пространстве, что дает большую свободу в конструктивных решениях.

Быстродействие и относительная простота конструкции фрикционного демпфера упрощает проведение диагностических исследований.

*Работа выполнена в ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-08 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 23.08.2024 г., проект 1024041900021-8-2.3.1;2.2.3 Разработка конструкторских и программно-аппаратных решений управления вибрационными процессами в вертолётном транспорте, обеспечивающих формирование оптимальных компенсационных воздействий (FSGN-2024-0013).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
2. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
3. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
4. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
5. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
6. Гусаров, В.И. Виброзащитные механизмы переменного демпфирования систем железнодорожного транспорта / В.И. Гусаров, А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин; подред. О.П. Мулюкина. – Самара: СамГАСП, 2004. – 178 с.
7. Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин/Г.А. Смирнов.– М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. Клинов, А.В. Динамика рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.В. Клинов. – Орел, 2001. – 115 с.
9. Клинов, А.В. Влияние массы рычага на динамические характеристики рычажной релаксационной виброзащитной системы / А.В. Клинов // Сб. науч. тр., Т.9. – Орел: ОрелГТУ, 1997. – С.156-158.
10. Белозерова, Е.Б. Повышение эффективности виброзоляции виброактивного оборудования за счет прерывистого демпфирования: дис. канд. техн. наук: 01.02.06 / Е.Б. Белозерова. – Орел, 2012. – 184 с.
11. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
12. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

#### Козырев Дмитрий Леонидович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Учебный мастер Политехнического института имени  
Н.Н. Поликарпова  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: kozyrev.dd@yandex.ru

#### Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Заведующий кафедрой мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: romanpolak@mail.ru

#### Горин Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### Серебренников Артем Дмитриевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: silver57.93@mail.ru

KOZYREV D.L., POLYAKOV R.N., GORIN A.V., SEREBRENNIKOV A.D.

## RESEARCH OF THE POSSIBILITIES OF USING A CONTROLLED DRY FRICTION DAMPER IN THE DESIGN OF A VIBRATION PROTECTION MECHANISM FOR TRANSPORT PLATFORMS

**Abstract.** The article considers the potential of using a controlled dry friction damper in the design of transport medical platforms. A structural and functional diagram of the suspension is presented. An algorithm for the operation of the friction shock absorber, as well as design solutions, are proposed. Conclusions are made on the ways of further improving such systems.

**Keywords:** controlled damper, dry friction, mechatronic system, transportation of victims, lever suspension, force law, damping algorithm.

### BIBLIOGRAPHY

1. Mayorov, S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - Orel: I.S. Turgenev OSU - No. 3 (353) 2022 - P. 73-82.
2. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of an active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU No. 1 (357) - 2023. P. 133 - 140.
3. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable stiffness and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU No. 5 (355) - 2022. Pp. 51 - 58.
4. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of industrial equipment units and assemblies / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU No. 6 (362) - 2023. Pp. 101 - 108.
5. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the rotor position in liquid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: I.S. Turgenev OSU No. 3 (353) - 2022. P. 103 - 110.
6. Gusarov, V.I. Vibration protection mechanisms of variable damping of railway transport systems / V.I. Gusarov, A.V. Kovtunov, O.P. Mulyukin; edited by O.P. Mulyukin. - Samara: SamGASP, 2004. - 178 p.
7. Smirnov, G.A. Theory of motion of wheeled machines / G.A. Smirnov. - Moscow: Mashinostroenie, 1990. - 352 p.
8. Klimov, A.V. Dynamics of lever relaxation suspension with intermittent damping: dis.... candidate of technical sciences: 01.02.06 / A.V. Klimov. - Orel, 2001. - 115 p.
9. Klimov, A.V. Influence of the lever mass on the dynamic characteristics of the lever relaxation vibration protection system / A.V. Klimov // Coll. of scientific papers, Vol. 9. - Orel: OrelSTU, 1997. - Pp. 156-158.
10. Belozerova, E.B. Increasing the efficiency of vibration isolation of vibroactive equipment due to intermittent damping: dis. candidate of technical sciences: 01.02.06 / E.B. Belozerova. - Orel, 2012. - 184 p.
11. German-Galkinn, S.G. Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC / S.G. German-Galkinn. - St. Petersburg: KORONA-Vek, 2008. - 368 p.
12. Fryden, J. Modern sensors. Handbook / J. Fryden. - M.: Tekhnosphere, 2005. - 592 p.

#### Kozyrev Dmitry Leonidovich

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Training master of the Polytechnic Institute named after  
N.N. Polikarpov  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: kozyrev.dd@yandex.ru

#### Gorin Andrei Vladimirovich

Orel State University  
Associate professor of the department mechatronics,  
mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

#### Polyakov Roman Nikolaevich

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Head of the Department of Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: romanpolak@mail.ru

#### Serebrennikov Artem Dmitrievich

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57.93@mail.ru

МАРАХИН Н.А.

# ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬ РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ С МНОГОКЛИНОВОЙ КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Аннотация:** Проведено моделирование гибридного подшипника жидкостного трения с многоклиновой конической и гладкой цилиндрической поверхностями. Представлен результат расчета грузоподъемности радиально-упорного подшипника в зависимости от рабочих и геометрических параметров. Предложен подход расчета оптимальных размеров подшипника при заданных значениях радиальных и осевых сил.

**Ключевые слова:** гибридные радиально-упорные подшипники жидкостного трения, многоклиновая коническая поверхность, поля давлений в смазочном слое, структурные и рабочие параметры, математическая и алгоритмическая модель, максимальные давления, метод конечных разностей.

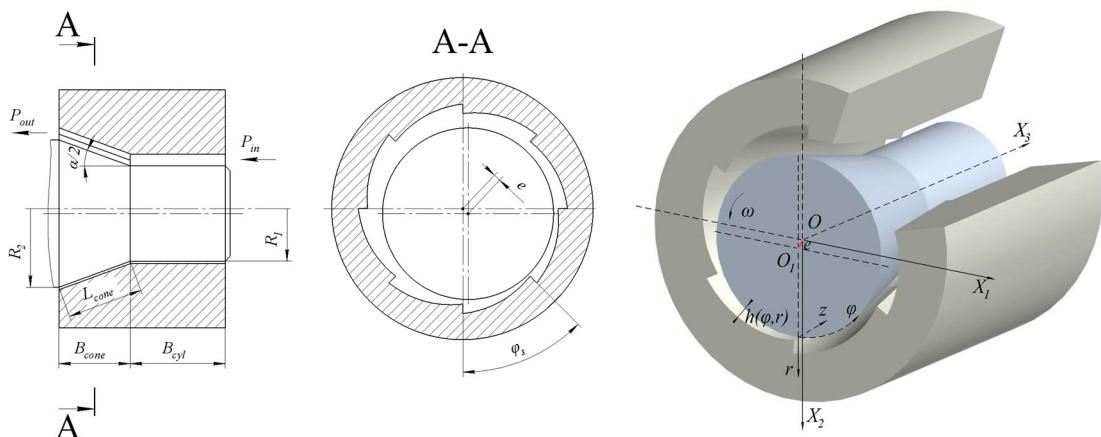
## Введение

В современной инженерной практике для обеспечения долговечности, снижения износа и работы на высоких частотах вращения всё чаще применяются гибридные подшипники жидкостного трения (ГПЖТ).

Гибридные подшипники жидкостного трения (ГПЖТ) отличаются тем, что в одном конструкционном элементе реализуются различные физические принципы создания несущей способности. Несущая способность в таких подшипниках может создаваться за счет гидродинамического клина, формирующегося при сдвиговом течении смазочного материала в результате вращения ротора, и под действием гидростатического подъема при насосной подаче смазки под высоким давлением в отдельные зоны смазочного слоя. Также ГПЖТ реализуются за счет совмещения в себе радиального и упорного ПЖТ, что позволяет передавать силы как в радиальном, так и в осевом направлении, при этом опорные поверхности могут быть как гладкими, так и многоклиновыми [1].

В настоящей статье рассматриваются поля давления и грузоподъемность радиально-упорных подшипников жидкостного трения с многоклиновой конической поверхностью. Анализируются особенности их работы, рассматриваются математические модели и результаты расчетов, что позволит углубить понимание принципов их функционирования и расширить область их практического применения.

## Математическая модель расчета поля давления



**Рисунок 1 – Структурная схема гибридного подшипника жидкостного трения с многоклиновой конической поверхностью**

Для начала рассмотрим структурную схему гибридного ПЖТ (рисунок 1). Данный подшипник состоит из цилиндрической и конической частей, где цилиндрическая часть имеет длину  $B_{cyl}$ , а коническая –  $B_{cone}$ . Радиусы подшипника на различных участках обозначены как  $R_1$  (радиус цилиндрической части) и  $R_2$  (радиус на выходе конического участка). Угол

конусности конического участка –  $\alpha$ . На разрезе конического участка подшипника видна многоклиновая структура конической опорной поверхности. Согласно схеме, подача смазочного материала происходит из полости высокого давления  $P_{in}$  на торце цилиндрического участка участка. Слив смазки происходит в полость низкого давления  $P_{out}$  на внешней стороне конического многоклинового участка.

Рассмотрим математическую модель расчета поля давлений и интегральных характеристик гибридного конически-цилиндрического подшипника жидкостного трения. Данная математическая модель базируется на модифицированном уравнении Рейнольдса, которое получается путем совместного решения уравнения движения жидкости и уравнения неразрывности среды [2]. Полученное модифицированное уравнение Рейнольдса для конически-цилиндрического гидродинамического подшипника жидкостного трения выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial}{r\partial r}\left(rh^3\frac{\partial p}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\alpha}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\varphi}\right) = \omega\mu\frac{\partial h}{\partial\varphi}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата,  $\varphi$  – угловая координата,  $h$  – значение зазора смазочного слоя,  $\alpha$  – угол конусности,  $\omega$  – угловая скорость,  $\mu$  – динамическая вязкость смазочного вещества,  $p$  – давление жидкости.

Функция зазора для данного вида подшипников принимает следующий вид, и может быть применена как для цилиндрической части, так и для конической многоклиновой с учетом того, что угол конусности в цилиндрической части подшипника стремится к нулю:

$$\begin{cases} h = h_0(1 - \varepsilon \cos \varphi) \cos(\alpha/2), & \text{если } R = R_1; \\ h = h_0(1 - \varepsilon \cos \varphi) \cos(\alpha/2) + h_s, & \text{если } R_2 > R > R_1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varepsilon = \frac{e}{h_0}$  – безразмерный эксцентризитет,  $h_s$  – функция зазора вдоль поверхности сегмента, определяемая геометрией этого сегмента в окружном направлении [3, 4]:

$$h_s = \frac{2}{1 + K_s \cos(n\varphi_s - \varphi)} - 1, \quad \text{при } \varphi \geq (n-1)\varphi_s \quad (3)$$

где  $n$  – номер сегмента ( $n = 1, \dots, N_s$ ),  $\varphi_s$  – угол развертки одного сегмента, определяемый соотношением  $\varphi_s = \frac{2\pi \sin(\alpha/2)}{N_s}$ ,  $K_s$  – коэффициент высоты клина. Соответствие высоты клина в зависимости от коэффициента приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Размер (высота) клина в зависимости от коэффициента  $K_s$

Коэффициент $K_s$	0,11	0,33	0,67
Максимальная высота клина $h_{smax}$	$0,8h_0$	$0,5h_0$	$0,2h_0$

#### Численное решение уравнения Рейнольдса

Для решения уравнения Рейнольдса в качестве численного метода был выбран метод конечных разностей [5-7]. Для этого уравнение Рейнольдса в частных производных должно быть представлено в разностном виде в соответствие с выбранной расчетной сеткой (рисунок 2) и приведено к виду:

$$A_{i,j}p_{c_{i,j}} + B_{i,j}p_{c_{i+1,j}} + C_{i,j}p_{c_{i-1,j}} + D_{i,j}p_{c_{i,j+1}} + E_{i,j}p_{c_{i,j-1}} = F_{i,j} \quad (4)$$

#### Программная модель

Разработанная модель гибридного ПЖТ была реализована в программном комплексе Matlab. Верификация моделей и программного продукта была проведена с использованием имеющихся данных экспериментальных исследований и результатов расчета для конических и цилиндрических подшипников [8, 9].

Модель гидродинамического конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения была реализована в программном комплексе MATLAB. С учетом полученных конечно-разностных коэффициентов, которые использовались для решения системы линейных арифметических уравнений, с учетом граничных условий: давление подачи и слива жидкости известны, начало развертки и конец связаны, температура смазочной жидкости и вязкость постоянны.

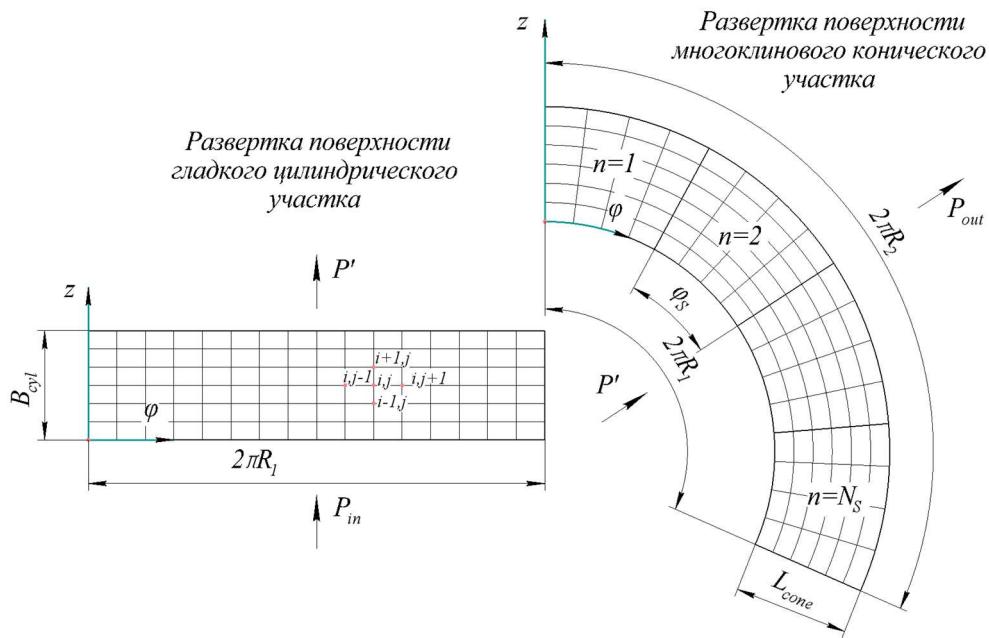


Рисунок 2 – Расчетная конечно-разностная сетка гибридного подшипника жидкостного трения

Согласно структурной схемы подшипника (рисунок 1) смазка подается из камеры высокого давления  $P_{in}$  на цилиндрическом участке и сливается под действием атмосферного давления на выходе из конической части гибридного подшипника  $P_{out}$ . Значения давления, указанные на входе и выходе, будут определять граничные условия при расчете. Параметры моделируемого гидродинамического гибридного подшипника представлены в таблице 2.

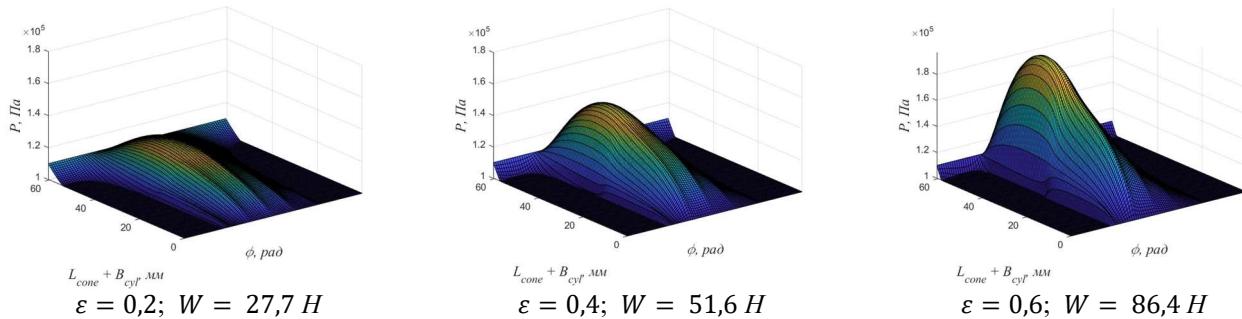
Таблица 2 – Геометрические и рабочие параметры подшипника

Параметры	Гибридный		
	Конический	Цилиндрический	
$L$ Длина подшипника	(мм)	20...40	40...20
$R$ Радиус	(мм)	-	15
$\alpha$ Угол конусности	(Град.)	10...30	-
$\mu$ Вязкость смазки	(Па.с)	$1 \times 10^{-3}$	
$\varepsilon$ Относительный эксцентриситет	(-)	0,2...0,6	
$N$ Частота вращения вала	(об/мин)	5000...15000	
$h_0$ Начальный зазор	(мкм)	60...100	
$P_{in}$ Давление питания	(Па)	$1,1 \cdot 10^5$	
$P_{out}$ Давление окружающего среды	(Па)	$1 \cdot 10^5$	
$j, c$ Индекс цилиндрической, конической части	(-)	(-)	

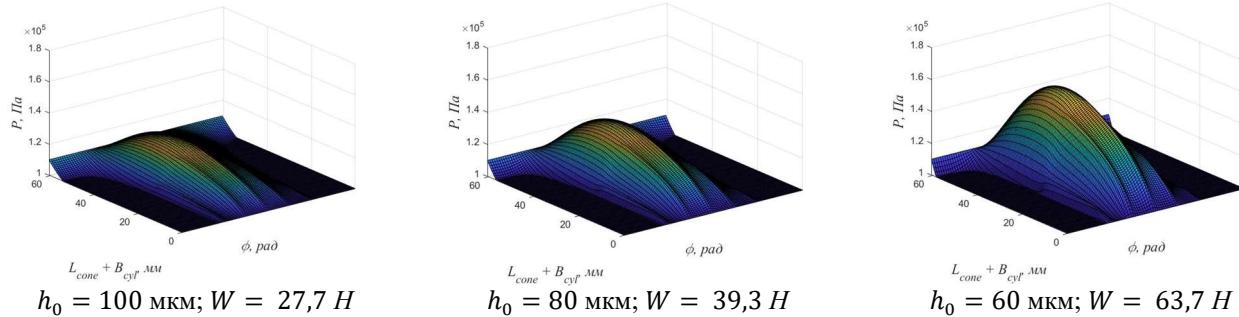
### Результаты моделирования

Результаты, представленные на рисунках 3-5, показывают, что увеличение эксцентриситета  $\varepsilon$ , уменьшение минимального зазора  $h_0$  и повышение частоты вращения  $N$  положительно влияют на давление в смазочном слое и, следовательно, на несущую способность гибридного подшипника с гладкой цилиндрической и многоклиновой конической опорной поверхностью. При увеличении относительного эксцентриситета  $\varepsilon$  с 0,2 до 0,6 наблюдается возрастание максимального давления и, как следствие, несущей способности. Уменьшение минимального зазора с 100 мкм до 60 мкм также приводит к увеличению максимального давления, так как уменьшение зазора усиливает

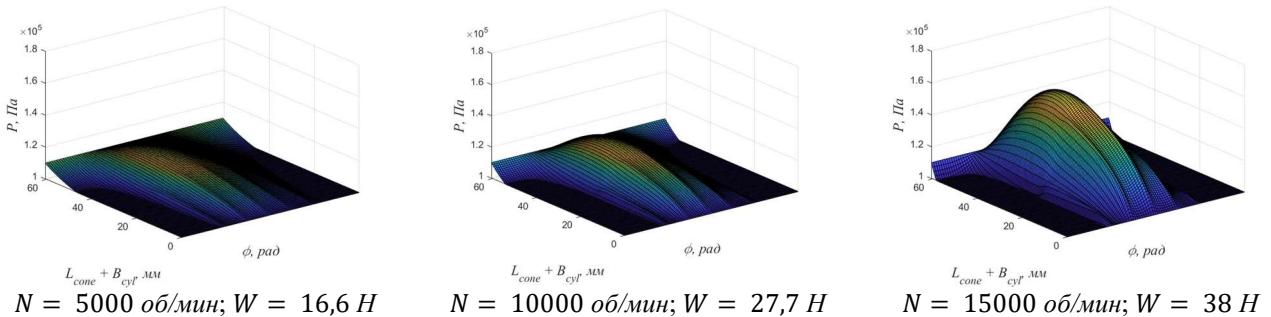
гидродинамическое давление и повышает устойчивость подшипника. Кроме того, увеличение частоты вращения с 5000 до 15000 об/мин также способствует росту максимального давления и несущей способности за счет усиления гидродинамического давления.



**Рисунок 3 – Поля давлений гибридного подшипника с гладкой цилиндрической и многоклиновой конической опорной поверхностью:  $h_0 = 100$  мкм,  $N = 10000$  об/мин,  $K_s = 0,67$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $P_{in} = 0,11$  МПа**



**Рисунок 4 – Поля давлений гибридного подшипника с гладкой цилиндрической и многоклиновой конической опорной поверхностью:  $\varepsilon = 0,2$ ,  $N = 10000$  об/мин,  $K_s = 0,67$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $P_{in} = 0,11$  МПа**



**Рисунок 5 – Поля давлений гибридного подшипника с гладкой цилиндрической и многоклиновой конической опорной поверхностью:  $h_0 = 100$  мкм,  $\varepsilon = 0,2$ ,  $K_s = 0,67$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $P_{in} = 0,11$  МПа**

Это не все параметры, которые могут положительно влиять на максимальное давление и несущую способность подшипника. Важное значение также имеют вязкость смазочного материала  $\mu$  – более высокая вязкость может увеличить гидродинамическое давление; давление подачи смазки  $P_{in}$ , которое определяет начальное давление в смазочном слое; угол конусности  $\alpha$  многоклиновой конической опорной поверхности; длины участков гибридного подшипника и их соотношения; Все эти параметры могут существенно влиять на работу подшипника и его способность поддерживать нагрузку.

Рассмотрим, как соотношение длин участков влияет на характеристики подшипника. На рисунке 6 представлены графики зависимости несущей способности  $W$  от отношения длины конического участка гибридного подшипника к цилиндрическому  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$ , при различных

углах конусности  $\alpha$  и различных коэффициентах высоты клина  $K_s$ .

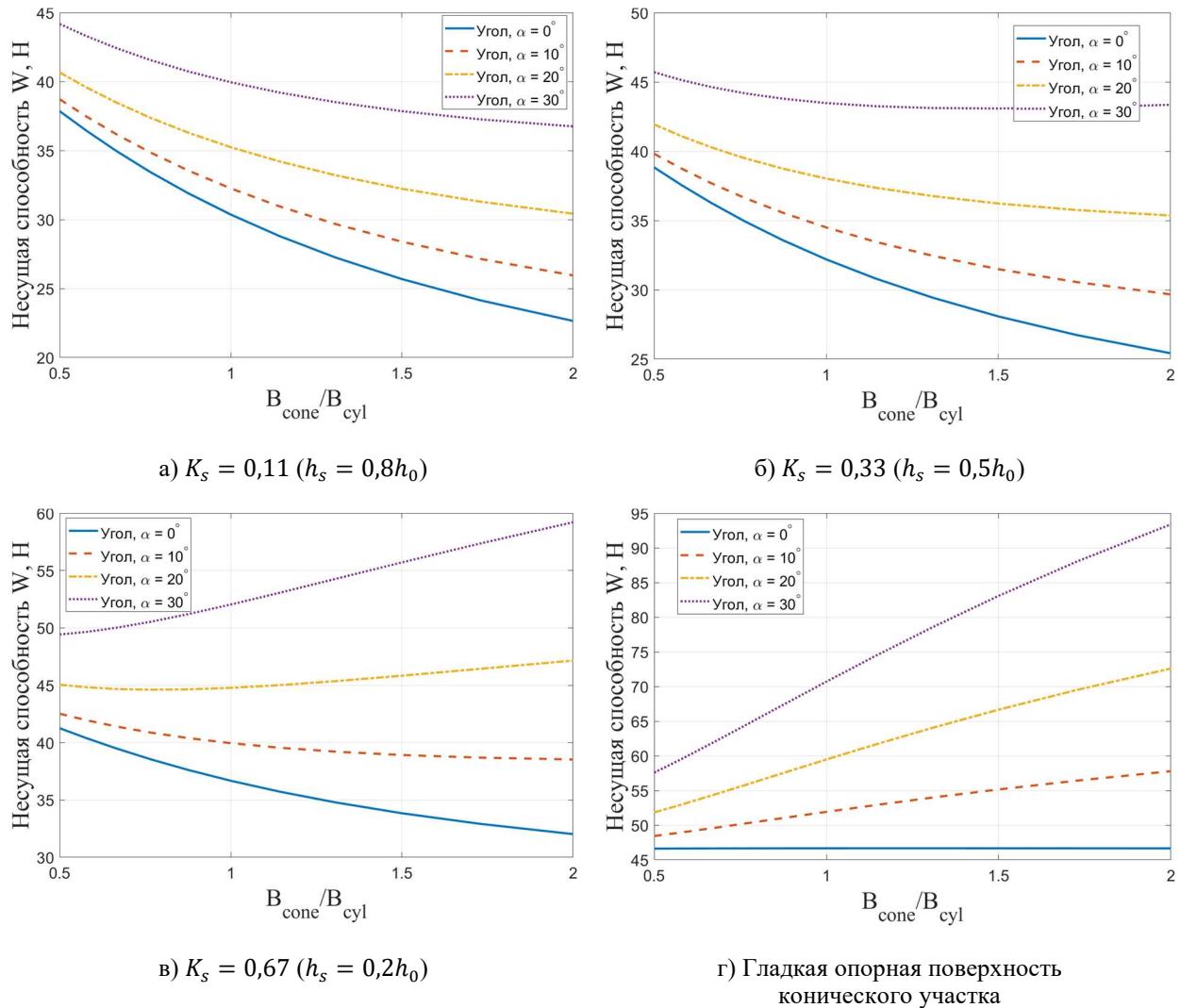


Рисунок 6 – Графики зависимости несущей способности ГПЖТ от отношения длины конического участка к цилиндрическому

Для расчета был выбран сценарий, когда длина конического участка  $B_{cone}$  меняется в промежутке от 20 мм до 40 мм, а длина цилиндрического  $B_{cyl}$  – от 40 мм до 20 мм, так, что общая длина гибридного подшипника жидкостного трения  $B$  – всегда составляет 60 мм. Из чего можно заключить, что отношение  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$  для конкретного примера меняется в промежутке от 0,5 до 2. Постоянные параметры ГПЖТ: радиус цилиндрического участка вала  $R_1 = 15$  мм, средний зазор  $h_0 = 60$  мкм, относительный эксцентриситет  $\varepsilon = 0,2$ , число оборотов вала  $N = 5000$  об/мин, давление подачи смазочного материала  $P_{in} = 0,11$  МПа, вязкость смазочного материала  $\mu = 1$  мПа·с, количество клиньев на конической опорной поверхности  $N_s = 8$ .

Для конфигурации, представленной на рисунке 6 а) при коэффициенте высоты клиньев  $K_s = 0,11 (h_s = 0,8h_0)$ , увеличение отношения  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$  оказывает негативное влияние на несущую способность ГПЖТ. При этом, увеличение угла конусности  $\alpha$  положительно влияет на общую несущую способность  $W$ . Максимальное значение  $W$  достигается при  $\alpha = 30^\circ$  и минимальном соотношении длин  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}} = 0,5$ .

При увеличении коэффициента высоты клиньев (рисунок 6 б) до  $K_s = 0,33 (h_s = 0,5h_0)$ , наблюдается аналогичная тенденция. Однако значения  $W$  в целом выше, чем при  $K_s = 0,11$ .

При дальнейшем увеличении коэффициента высоты клиньев (рисунок 6 в) до  $K_s = 0,67 (h_s = 0,2h_0)$ , картина кардинально меняется. При углах конусности  $\alpha = 20^\circ \dots 30^\circ$ , увеличение

отношения  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$  начинает оказывать положительное влияние на несущую способность ГПЖТ. При  $\alpha = 30^\circ$  и  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}} = 2$  достигаются максимальные значения  $W$ .

Для сравнения, на графике г), представлены зависимости для случая, когда оба участка ГПЖТ: и цилиндрический и конический – имеют гладкую опорную поверхность. Видно, что несущая способность  $W$  значительно выше по сравнению с многоклиновыми конфигурациями. В частном случае, когда угол конусности  $\alpha$  второго участка равен нулю, несущая способность остается неизменной, поскольку подшипник в этом случае представляет собой цилиндрический участок на всей своей длине. При увеличении угла конусности  $\alpha$  и соотношения  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$  общая несущая способность  $W$  возрастает, достигая максимальных значений при  $\alpha = 30^\circ$  и  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}} = 2$ .

Таким образом, соотношение длин  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$  влияет на несущую способность следующим образом: при малых углах конусности  $\alpha$  и относительно глубоких клиньях (при  $K_s = 0,11 \dots 0,33$ ), увеличение длины конического участка относительно цилиндрического снижает несущую способность. Однако при больших углах и малой глубине клиньев  $K_s = 0,67$ , увеличение длины конического участка относительно цилиндрического положительно влияет на несущую способность. Следовательно, для повышения несущей способности гибридного подшипника жидкостного трения необходимо тщательно подбирать значения коэффициента  $K_s$ , угла конусности  $\alpha$  и соотношения  $\frac{B_{cone}}{B_{cyl}}$ , в зависимости от условий эксплуатации. Более мелкие клинья при большом угле конусности и увеличенной длине конического участка дают наилучшие результаты для поддержания нагрузки.

### Заключение

В работе рассмотрено моделирование и анализ гибридного подшипника жидкостного трения с многоклиновой конической поверхностью. Результаты расчета показали, что выбор геометрических и рабочих параметров оказывает значительное влияние на несущую способность подшипника. Наиболее высокие значения несущей способности достигаются при оптимальных значениях угла конусности, коэффициента высоты клина и соотношения длины конического участка к цилиндрическому. Это подчеркивает важность тщательного подбора параметров для достижения наилучших эксплуатационных характеристик подшипников.

Полученные результаты подтверждают, что многоклиновая структура конической поверхности позволяет гибридному подшипнику эффективно распределять нагрузку, повышая его устойчивость и долговечность. Проведенное исследование и созданная математическая модель могут быть использованы для дальнейших исследований и оптимизации конструкции подобных подшипников в различных условиях эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марахин Н.А., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Казаков Ю.Н., Савин Л.А. Гибридные Подшипники Жидкостного Трения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, № 6 (362), С. 35.
2. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин // М.: Машиностроение–1, 2006. – С. 444
3. Корнеев А. Ю. Конические подшипники жидкостного трения : монография / А. Ю. Корнеев, Л. А. Савин, О. В. Соломин; под общ. ред. Л. А. Савина.–Москва : Машиностроение – 1, 2008. – 172 с.
4. Корнеев А. Ю. Определение функции полного зазора в конических подшипниках скольжения различной геометрической формы / А. Ю. Корнеев, М. М. Ярославцев // Материалы научно-практической конференции «Образование, наука, производство и управление». - Старый Оскол, 2008. – Т. 5. – С. 76–81.
5. Korneev A.Yu. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // Journal of Donghua University, 2012, Т. 29(2), С. 115 – 122.
6. Yuri N. Kazakov, Alexey V. Kornaev, Denis V. Shutin, Shengbo Li, Leonid A. Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // Journal of Tribology, 2022, Т. 144, №8. <https://doi.org/10.1115/1.4053776>
7. Никитин, А.К. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме / А.К. Никитин [и др.] // М.: Наука, 1981 - 316 с.
8. Denis Shutin, Yuri Kazakov, Ivan Stebakov, Leonid Savin Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // Tribology International, 2024, Т. 191. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109136.

9. W.M. Hannon and M.J. Braun Numerical Solution of a Fully Thermally Coupled Generalized Universal Reynolds Equation (GURE) and its Application. Part 1: Conical Bearing // Tribology Transactions, 2007, T. 50, № 4, C. 540–557. doi:10.1080/10402000701631742 (2007).

**Марахин Н.А.**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г Орёл  
Аспирант  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8 (910) 303–96–65  
E-mail: nikitam123321@yandex.ru

---

MARAKHIN N.A.

## PRESSURE FIELDS AND LOAD-CARRYING CAPACITY OF THRUST-RADIAL HYDRODYNAMIC BEARINGS WITH A MULTI-WEDGE CONICAL SURFACE

**Abstract.** A hybrid hydrodynamic bearing with a multi-wedge conical and smooth cylindrical surface has been modeled. The results of load-carrying capacity calculations for a thrust-radial bearing are presented as functions of operational and geometric parameters. A method for determining the optimal bearing dimensions under specified radial and axial forces is proposed.

**Keywords:** hybrid thrust-radial hydrodynamic bearings, multi-wedge conical surface, pressure fields in the lubricant layer, structural and operational parameters, mathematical and algorithmic model, maximum pressures, finite difference method.

### BIBLIOGRAPHY

1. Marakhin N.A., Nguyen Thai Ha, Liu Yifan, Kazakov Yu.N., Savin L.A. Hybrid Fluid Friction Bearings // Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2023, No. 6 (362), pp. 35.
2. Savin, L.A. Modeling of rotor systems with fluid friction supports: monograph / L.A. Savin, O.V. Solomin // M.: Mashinostroenie-1, 2006. – pp. 444
3. Korneev, A. Yu., Savin, L. A., & Solomin, O. V. Conical Hydrodynamic Bearings: Monograph / Ed. by L. A. Savin. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2008. 172 p.
4. Korneev, A. Yu., & Yaroslavtsev, M. M. Determination of the Complete Clearance Function in Conical Sliding Bearings of Various Geometries. // Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Education, Science, Production, and Management." Stary Oskol, 2008. Vol. 5, pp. 76–81.
5. Korneev A.Yu. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // Journal of Donghua University, 2012, Vol. 29(2), pp. 115 – 122.
6. Yuri N. Kazakov, Alexey V. Kornaev, Denis V. Shutin, Shengbo Li, Leonid A. Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // Journal of Tribology, 2022, Vol. 144, No. 8. <https://doi.org/10.1115/1.4053776>
7. Nikitin, A.K. Hydrodynamic theory of lubrication and calculation of sliding bearings operating in stationary mode / A.K. Nikitin [etc.] // M.: Nauka, 1981 - 316 pp.
8. Denis Shutin, Yuri Kazakov, Ivan Stebakov, Leonid Savin Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // Tribology International, 2024, Vol. 191. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109136.
9. W.M. Hannon and M.J. Braun Numerical Solution of a Fully Thermally Coupled Generalized Universal Reynolds Equation (GURE) and its Application. Part 1: Conical Bearing // Tribology Transactions, 2007, Vol. 50, No. 4, pp. 540–557. doi:10.1080/10402000701631742 (2007).

**Marakhin N.A.**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia  
Graduate student  
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29  
Tel.: 8 (910) 303–96–65  
E-mail: nikitam123321@yandex.ru

© Марахин Н.А., 2025

ЖУРАВЛЕВ Д.Н.

## УЧЕТ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ ОТ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОПОРНОЙ ПАРЫ ТИПА «ИГЛА-ПОДПЯТНИК»

**Аннотация.** Опорные пары типа «игла-подпятник» являются элементами конструкции быстровращающихся роторных систем. За длительный срок эксплуатации изделия могут присутствовать как стационарные режимы, так и режимы разгона и торможения. Настоящая работа посвящена конечно-элементному моделированию износоконтактного взаимодействия осесимметричной вращающейся пары трения в квазистационарной постановке на режиме разгона ротора. Особенностью выполненной работы является учет зависимостей параметров математической модели изнашивания от угловой скорости вращения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о важности учета подобного рода зависимостей на этапе проектирования изделий для корректного определения ресурса оборудования.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, износоконтактная задача, коэффициент трения, коэффициент износа, разгон/торможение.

### Введение

Опорные пары типа «игла-подпятник», применяющиеся в высокоскоростных роторных системах, таких как кинетические накопители энергии и газовые центрифуги, представляют собой осесимметричные трибологические системы.

Ввиду важности разработки новых поколений обозначенных выше роторных систем, и повышенных нагрузках на опорную пару, актуальной является проблема разработки и совершенствования цифровых моделей пар трения «игла-подпятник», учитывающих явление износа контактной поверхности.

Принимая во внимание скорости вращения подобных роторных систем (порядка 1000 ... 1500 оборотов в секунду) и сроки их эксплуатации (десятки лет), очевидно, что для создания эффективной модели изнашивания необходимо рассматривать квазистационарную постановку износоконтактной задачи, которая, кроме того, с учетом особенностей прикладываемых нагрузок и геометрических характеристик систем, может быть сведена к двумерной осесимметричной постановке.

Существует несколько сотен математических выражений, применяемых для описания различных видов процесса изнашивания. В настоящей работе в качестве определяющего соотношения для описания явления изнашивания контактной поверхности используется уравнение Арчарда [1, 2]:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} p^n v^m \quad (1)$$

где  $w$  – величина линейного износа поверхности;

$K$  – безразмерный коэффициент износа;

$H$  – твердость поверхности;

$p$  – контактное давление;

$v$  – скорость относительного сдвига контактирующих поверхностей;

$n$  и  $m$  – показатели степеней.

Соотношение (1) может быть адаптировано для использования в квазистационарной постановке [3...7] и в условиях наличия осевой симметрии нагрузок и геометрии принимает вид [8...11]:

$$\Delta w_i = \frac{K}{H} p^n (r \tilde{\omega}_i)^m \Delta \tau_i \quad (2)$$

где  $\Delta w_i$  – приращение величины износа на  $i$ -й итерации;

$\Delta \tau_i$  – инкремент, соответствующий  $i$ -й итерации;

$\tilde{\omega}_i$  – условная угловая скорость, соответствующая количеству оборотов пары трения, моделируемому в рамках  $i$ -й итерации.

В случае постоянства угловой скорости на рассматриваемом интервале выражение для вычисления условной угловой скорости выглядит как:

$$\tilde{\omega}_i = 2\pi \frac{\Delta N_i}{\Delta \tau_i} \quad (3)$$

где  $\Delta N_i$  – количество оборотов пары трения, соответствующее  $i$ -й итерации.

### Основная часть

Наряду со стационарными режимами работы роторных систем, которые могут быть с успехом промоделированы с применением соотношения (2), возникает необходимость рассмотрения режимов разгона и торможения, соответствующих переменной угловой скорости вращения.

Основное воздействие скорости скольжения на износ заключается в повышении температуры в точках контакта, что может приводить к различным последствиям, в числе наиболее важных из них [12]:

- повышение химической активности поверхностей трения и частиц износа по отношению к окружающей атмосфере или смазке;
- структурные изменения в материале, сильно влияющие на износ;
- существенное облегчение диффузии и образование сплавов на поверхности трения;
- плавление контактирующих поверхностей, сопровождающееся сильным снижением трения и износа.

Способ учета изменения температуры контактной поверхности вследствие фрикционного нагрева и связанного с ним изменения значений коэффициента износа и твердости показан в статьях [9, 10]. В настоящей работе остановимся на учете зависимости коэффициентов износа и трения от скорости скольжения.

Известно, что как в случае наличия смазочного материала в зоне контактного взаимодействия [13, 14, 15], так и при сухом трении [16, 17] коэффициент трения нелинейно зависит от скорости скольжения, качественные зависимости приведены на рисунке 1.

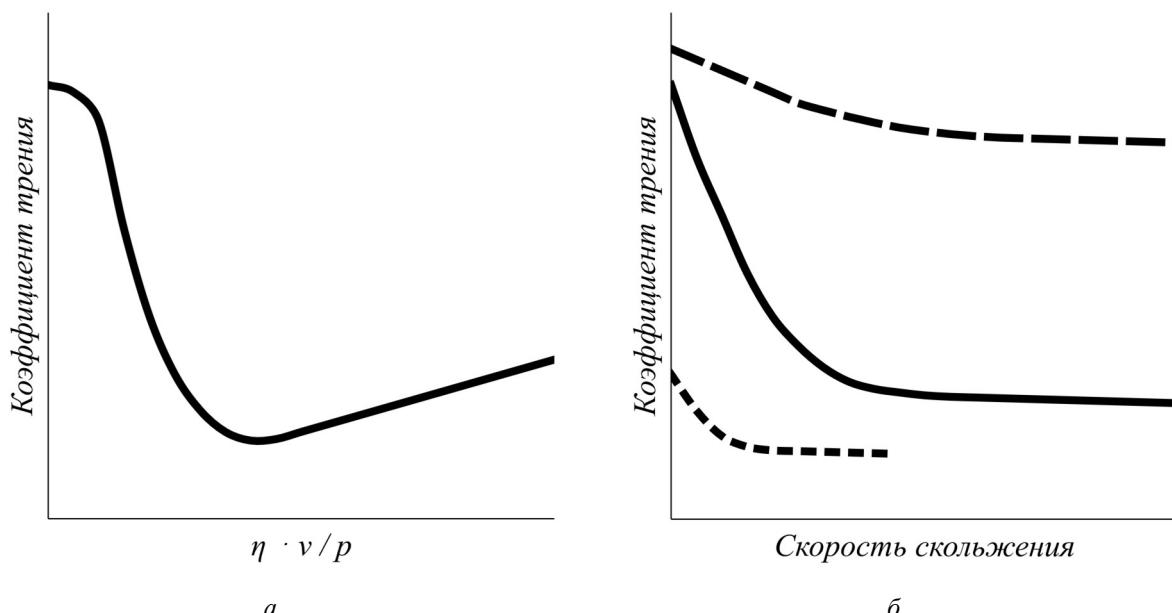


Рисунок 1 – Качественные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения  
а – с учетом смазки ( $\eta$  – вязкость); б – зависимости для различных материалов в условиях сухого трения

Коэффициент износа, обозначаемый в (2) как  $K$ , также имеет зависимость от скорости скольжения [17...19], показанную на рисунке 2.

Анализ ряда источников также показывает наличие корреляции значений коэффициентов трения и износа для различных типов материалов [20, 21].

Предположим, что разгон и торможение роторной системы реализуются путем линейного изменения угловой скорости:

$$\omega(t) = \omega_b + \frac{\omega_e - \omega_b}{t_e} t \quad (4)$$

где  $\omega_b$  – значение угловой скорости в начальный момент времени;

$\omega_e$  – значение угловой скорости в конечный момент времени;  
 $t_e$  – продолжительность рассматриваемого интервала времени.

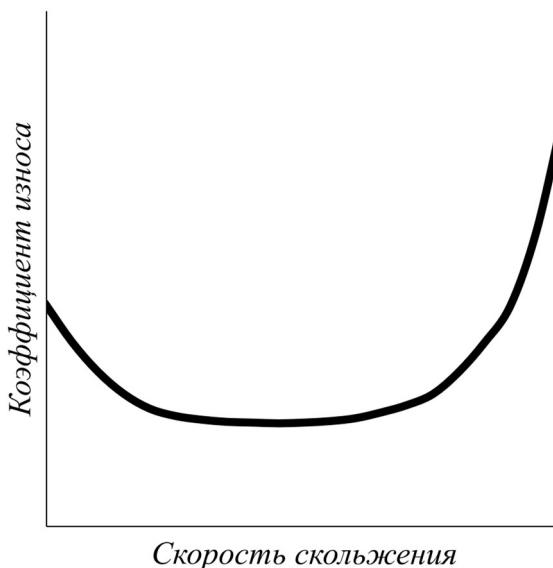


Рисунок 2 – Качественная зависимость коэффициента износа от скорости скольжения

В таком случае, считая известным количество оборотов опорной пары  $N_e$ , совершенное за рассматриваемый интервал времени, можно определить его продолжительность:

$$2\pi N_e = \int_0^{t_e} \omega(t) dt \Rightarrow t_e = \frac{4\pi N_e}{\omega_b + \omega_e} \quad (5)$$

При проведении подобного рода расчетов длительных процессов в квазистационарной постановке устанавливается взаимно-однозначное соответствие между реальным промежутком времени  $t \in [0; t_e]$  и условным отрезком времени  $\tau \in [\tau_b; \tau_e]$ , таким образом значение реального времени  $t_c$ , требуемое для достижения некоторого текущего количества оборотов  $N_c$ , может быть выражено как:

$$t_c = t_e \frac{\tau_c - \tau_b}{\tau_e - \tau_b} \quad (6)$$

где  $\tau_b$  – условное время, соответствующее началу квазистационарного расчета;

$\tau_e$  – условное время, соответствующее окончанию квазистационарного расчета;

$\tau_c$  – условное время, соответствующее окончанию текущей итерации квазистационарного расчета,

причем  $\tau_b, \tau_e, \tau_c$  являются известными величинами во все моменты расчета.

Значение совершенного на текущий момент количества оборотов  $N_c$  определяется как:

$$2\pi N_c = \int_0^{t_c} \omega(t) dt \Rightarrow N_c = \frac{1}{(4\pi)^2 N_e} (\omega_e^2 - \omega_b^2) t_c^2 + \frac{1}{2\pi} \omega_b t_c \quad (7)$$

Продолжительность реального интервала времени, моделируемого в рамках текущей итерации квазистационарного расчета, может быть определена из соотношения:

$$\delta t_i = t(\tau_c) - t(\tau_{c-1}) = t_e \frac{\tau_c - \tau_b}{\tau_e - \tau_b} - t_e \frac{\tau_{c-1} - \tau_b}{\tau_e - \tau_b} = t_e \frac{\tau_c - \tau_{c-1}}{\tau_e - \tau_b} = t_e \frac{\Delta\tau_i}{\tau_e - \tau_b} \quad (8)$$

где  $\Delta\tau_i$  – условная продолжительность текущей итерации квазистационарного расчета.

Наконец, количество оборотов, моделируемое в рамках текущей итерации, вычисляется как:

$$2\pi \Delta N_i = \int_{t_c - \delta t_i}^{t_c} \omega(t) dt \Rightarrow \Delta N_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta t_i}{t_e} \left( \omega_e t_c + (t_e - t_c) \omega_b - \frac{(\omega_e - \omega_b) \delta t_i}{2} \right) \quad (9)$$

Таким образом, величина условной угловой скорости, соответствующая текущей итерации, может быть вычислена по аналогии со стационарным режимом, используя выражение (3).

Для возможности вычисления параметров модели изнашивания, зависящих от скорости скольжения – коэффициентов трения и износа, – последние аппроксимируются полиномиальными зависимостями вида  $\mu = P(\omega)$ ,  $K = Q(\omega)$ .

Продемонстрируем эффект от учета зависимостей параметров модели изнашивания от скорости вращения на примере численного решения износоконтактной задачи для некоторой геометрической конфигурации опорной пары, двумерная осесимметричная конечно-элементная модель которой представлена на рисунке 3.

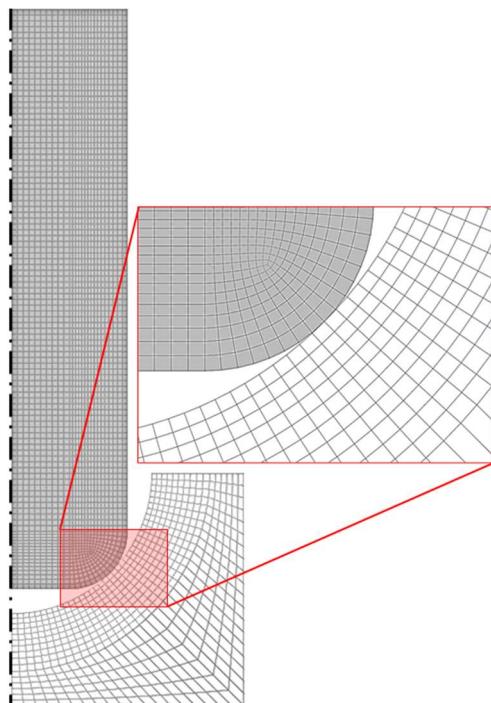


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель опорной пары

Рассмотрим четыре постановки, соответствующие 1) постоянным значениям коэффициентов модели изнашивания и постоянной скорости вращения, 2) учету зависимости параметров модели изнашивания от температуры при постоянной скорости вращения, 3) учету зависимости параметров модели изнашивания от температуры при переменной скорости вращения, 4) учету зависимости параметров модели изнашивания от температуры и от скорости вращения при переменной скорости вращения. Начальное и конечное значение скорости вращения в режиме разгона и значение скорости вращения в стационарном режиме подобраны таким образом, чтобы суммарное количество оборотов опорной пары (путь трения) во всех случаях было одинаковым.

Расчетные зависимости твердости от температуры и коэффициентов трения и износа от скорости скольжения приведены на рисунке 4.

Сравнительные результаты решения износоконтактной задачи в четырех указанных постановках, полученные с применением расчетных зависимостей параметров модели изнашивания, приведены на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены поля эквивалентных напряжений, соответствующие конечной итерации квазистационарной износоконтактной задачи для каждого из рассмотренных вариантов.

Отличия в распределениях эквивалентных напряжений наглядно демонстрируют различный уровень износа контактной поверхности при учете тех или иных зависимостей параметров математической модели изнашивания.

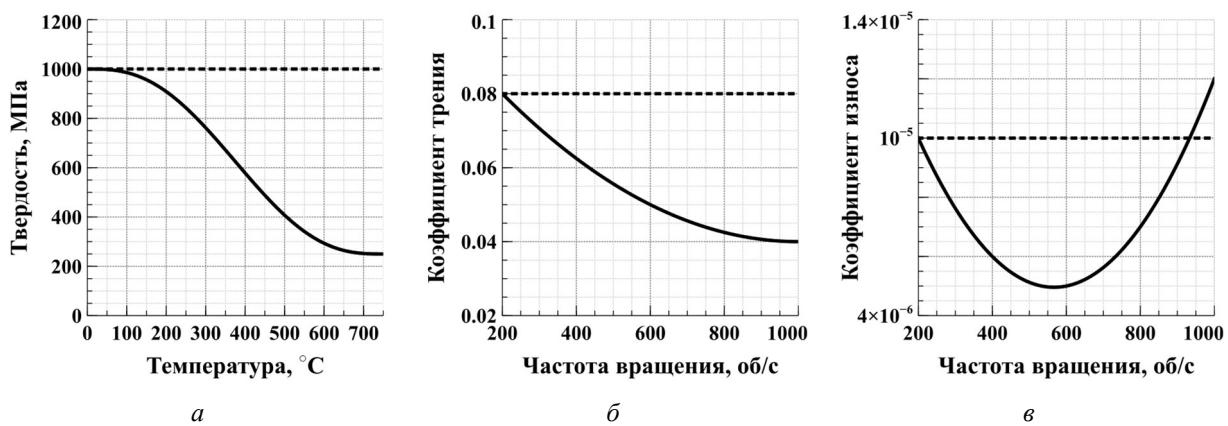


Рисунок 4 – Расчетные зависимости параметров модели изнашивания  
 а – твердости от температуры; б – коэффициента трения от частоты вращения;  
 в – коэффициента износа от частоты вращения

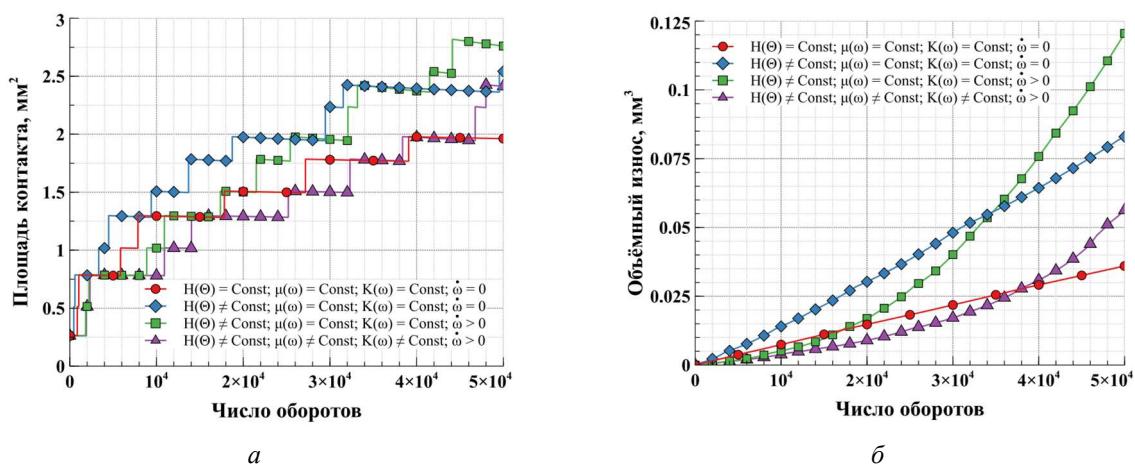


Рисунок 5 – Сравнение результатов решения износоконтактной задачи  
 а – площадь контакта; б – величина объемного износа

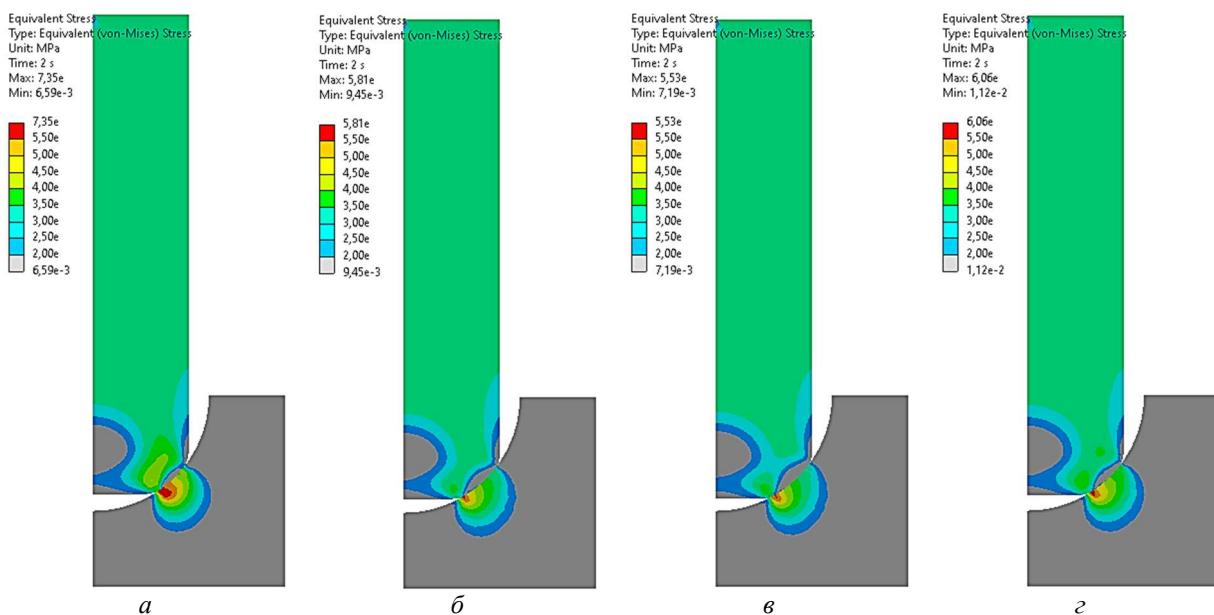


Рисунок 6 – Поля эквивалентных напряжений в опорной паре

а – при постоянных значениях параметров модели и постоянной скорости вращения; б – при учете зависимостей параметров модели от температуры и постоянной скорости вращения; в – при учете зависимостей параметров модели от температуры и переменной скорости вращения; г – при учете зависимости параметров модели от скорости вращения при переменной скорости вращения

### Заключение

Предложенная в настоящей работе методика моделирования режимов разгона и торможения роторных систем при решении износоконтактных задач в квазистационарной осесимметричной постановке позволяет расширить сферу применения разработанной ранее модели изнашивания.

Учет большего числа зависимостей параметров математической модели изнашивания с одной стороны усложняет её, делая процесс настройки и запуска расчета весьма трудоемким и нетривиальным, а другой стороны – существенно повышает адекватность модели.

При наличии необходимых данных о зависимостях параметров модели (от температуры, скорости скольжения и пр.) можно добиться существенного приращения точности результатов моделирования, в первую очередь – величины износа контактирующих поверхностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24 (8), 1953, pp.981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
2. Archard J.F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society*, 236 (1206), 1956, pp.397-410. <https://doi.org/10.2307/99967>
3. Hegadekatte V. et al. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International*, 41 (11), 2008, pp.1020-1031. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.020>
4. Pödra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International*, 32, 1999, pp.71-81. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00012-2)
5. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Wear*, 267, 2009, pp.2243-2251. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.09.004>
6. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application. *Wear*, 302, 2013, pp.1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.032>
7. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear. *Wear*, 504-505, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204402>
8. Журавлев Д.Н., Боровков А.И. Моделирование изнашивания камневой опоры при действии переменной вертикальной нагрузки. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №1 (363), 2024, с.9-16
9. Журавлев Д.Н., Боровков А.И. Разработка методики учета температурной зависимости свойств материалов при моделировании изнашивания быстровращающейся опорной пары типа «игла-подпятник». Омский научный вестник, №2 (190), 2024, с.50-58
10. Zhuravlev D., Borovkov A. Accounting for the temperature dependence of hardness in numerical simulation of wear in pivot-jewel bearings. *Journal of Materials and Engineering*, vol.2, iss.2, 2024, pp.136-141
11. Журавлев Д.Н., Боровков А.И. Повышение качества компьютерной модели изнашивания осесимметричной пары трения путем увеличения ее адекватности. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, №3, 2024, с.84-92
12. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968.
13. Hutchings I., Shipway Ph. Tribology. Friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann, 2017
14. Wills J.G. Lubrication fundamentals. Marcel Dekker Inc., 1980
15. Dai X.-J., Tang C.-L., Yu S.-Q. Measuring friction coefficient of the high-speed pivot bearing in oil bath lubrication by a varying load method. *Tribology*, vol.31, iss.1, 2011, pp.7-11
16. Bhushan B. Introduction to tribology. Wiley-Blackwell, 2013
17. Stachowiak G.W. Wear. Materials, mechanisms and practice. Wiley, 2005
18. Кривина Л.А. Повышение прочности и трибологических характеристик металлических деталей пар трения методами ионно-плазменного воздействия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Нижний Новгород, 2019
19. Hirst W., Lancaster J.K. The influence of speed on metallic wear. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol.259, no.1297, 1960, pp.228-241
20. Xu X., Zhang Z., Wang X., Huang B., Qin H., Zhao X. Experimental study on friction coefficients of miter gate bottom pivot with different solid lubrication. *Tribology*, vol.32, no.5, 2022, pp.1044-1052
21. Friedrich K., Schlarb A.S. Tribology of polymeric nanocomposites. Butterworth-Heinemann, 2013

Журавлев Дмитрий Николаевич

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург

ПИИШ «Цифровой инжиниринг»

Инженер-исследователь

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

E-mail: zhuravlev@compmechlab.ru

ZHURAVLEV D.N.

## WEAR MODEL PARAMETERS DEPENDENCES CONSIDERATION ON THE PIVOT-JEWEL BEARING VARIABLE ROTATION SPEED

**Abstract.** Pivot-jewel bearings are structural elements of fast-rotating rotary systems. Over the long life of the product, both stationary modes and acceleration and deceleration modes may be present. This paper is devoted to finite element modeling of wear-contact interaction of an axisymmetric rotating friction pair in a quasi-stationary setting in the rotor acceleration mode. A feature of the work performed is the consideration of the dependences of the parameters of the mathematical model of wear on the angular velocity of rotation. The results obtained allow us to conclude that it is important to take into account such dependencies at the product design stage in order to correctly determine the equipment resource.

**Keywords:** finite element method, wear-contact problem, coefficient of friction, coefficient of wear, acceleration/deceleration.

### BIBLIOGRAPHY

1. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24 (8), 1953, pp.981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
2. Archard J.F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society*, 236 (1206), 1956, pp.397-410. <https://doi.org/10.2307/99967>
3. Hegadekatte V. et al. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International*, 41 (11), 2008, pp.1020-1031. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.020>
4. Pödra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International*, 32, 1999, pp.71-81. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00012-2)
5. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Wear*, 267, 2009, pp.2243-2251. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.09.004>
6. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application. *Wear*, 302, 2013, pp.1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.032>
7. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear. *Wear*, 504-505, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204402>
8. Zhuravlev D.N., Borovkov A.I. Modeling the wear of a pivot jewel bearing under the action of a variable vertical load. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, №1 (363), 2024, p.9-16
9. Zhuravlyov D.N., Borovkov A.I. Development of a methodology taking into account the temperature dependence of material properties in simulation of wear in fast-rotating pivot jewel bearing support. *Omsk scientific bulletin*, №2 (190), 2024, p.50-58
10. Zhuravlev D., Borovkov A. Accounting for the temperature dependence of hardness in numerical simulation of wear in pivot-jewel bearings. *Journal of Materials and Engineering*, vol.2, iss.2, 2024, pp.136-141
11. Zhuravlyov D.N., Borovkov A.I. Improving the quality of the computer model of the wear of an axisymmetric friction pair by increasing its adequacy. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, №3, 2024, p.84-92
12. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. M.: Mashinostroenie, 1968.
13. Hutchings I., Shipway Ph. *Tribology. Friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann, 2017
14. Wills J.G. *Lubrication fundamentals*. Marcel Dekker Inc., 1980
15. Dai X.-J., Tang C.-L., Yu S.-Q. Measuring friction coefficient of the high-speed pivot bearing in oil bath lubrication by a varying load method. *Tribology*, vol.31, iss.1, 2011, pp.7-11
16. Bhushan B. *Introduction to tribology*. Wiley-Blackwell, 2013
17. Stachowiak G.W. *Wear. Materials, mechanisms and practice*. Wiley, 2005
18. Krivina L.A. Increasing the strength and tribological characteristics of metal parts of friction pairs by ion-plasma exposure methods. *Dissertation for the decree of Candidate of Technical Sciences*. Nizhniy Novgorod, 2019
19. Hirst W., Lancaster J.K. The influence of speed on metallic wear. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol.259, no.1297, 1960, pp.228-241
20. Xu X., Zhang Z., Wang X., Huang B., Qin H., Zhao X. Experimental study on friction coefficients of miter gate bottom pivot with different solid lubrication. *Tribology*, vol.32, no.5, 2022, pp.1044-1052
21. Friedrich K., Schlarb A.S. *Tribology of polymeric nanocomposites*. Butterworth-Heinemann, 2013

**Zhuravlev Dmitriy Nikolaevich**

St. Petersburg Polytechnic University  
Advanced engineering school “Digital engineering”  
Research engineer  
195251, St. Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29  
E-mail: zhuravlev@compmechlab.ru

© Журавлев Д.Н., 2025

ЕВСИКОВ А.А., КОКОВИН В.А., ЛЕОНОВ А.П.

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕРВОПРИВОДОВ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**Аннотация.** Сервоприводы переменного тока с векторным управлением обладают широкими функциональными возможностями и являются базовой частью современного прецизионного автоматизированного оборудования. Они широко используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами и производствами. В статье на примере промышленных сервоприводов серии СПС определены условия, при соблюдении которых обеспечивается эффективное использование возможностей сложного технического оборудования. При этом анализируются три составляющих: структура и функциональные возможности сервоприводов серии СПС; набор знаний и умений инженера, необходимых для реализации широких функциональных возможностей сервоприводов; организация подготовки инженеров для работы со сложными техническими системами.

**Ключевые слова:** сервопривод, векторное управление, интеллектуальное оборудование, знания и умения инженера, подготовка инженера.

### Введение

В настоящее время происходит обновление основных фондов в таком ключевом и перспективном направлении экономики как автоматизация технологических процессов и производств [1, 2].

Как правило, частью системы автоматизированного управления являются системы автоматического управления (САУ), исключающие влияние человеческого фактора на производительность и точность обработки изделия или выполнения технологического процесса. Однако роль человека в настройке САУ на конкретный объект автоматизации, в проектировании нового, более совершенного оборудования является определяющей.

Ведущие позиции в современной технике САУ заняли электроприводы с синхронными двигателями [3, 4, 5], имеющими абсолютно жесткие механические характеристики. Примером такого электропривода является универсальный, комплектный сервопривод серии СПС [6], представляющий собой сложное интеллектуальное устройство с широкими функциональными возможностями, включая настройку на конкретный объект автоматизации.

Автоматизируемый технологический процесс или производство играют роль объекта управления, а инженер (пользователь) – роль субъекта (рисунок 1). Между субъектом и объектом управления располагаются определенные программно-аппаратные средства, через которые пользователь, с одной стороны, воздействует на объект управления через интерфейс пользователя и техническую систему (например, сервопривод СПС), с другой – получает информацию о текущем состоянии объекта (через техническую систему и интерфейс пользователя). Как правило, в интерфейс пользователя входит графический интерфейс.

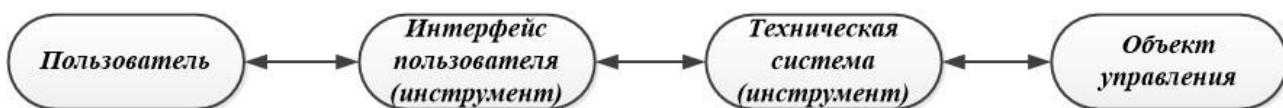


Рисунок 1 – Взаимодействие пользователя с объектом управления

Цель статьи – определение условий, при которых обеспечивается эффективное использование функциональных возможностей сложного, универсального оборудования в автоматизированных системах управления технологическими процессами и производствами (на примере сервоприводов серии СПС).

Для достижения поставленной цели необходимо решить три задачи:

- определить структуру и функциональные возможности используемого оборудования;
- определить компетенции (знания и умения), которыми должен обладать инженер для эксплуатации, модернизации и проектирования интеллектуальных систем на базе сервоприводов серии СПС;
- обеспечить теоретическую и практическую подготовку инженеров, работающих с современным автоматизированным оборудованием.

### Анализ структуры и функциональных возможностей сервоприводов серии СПС

Универсальный комплектный сервопривод серии СПС [6] на базе трехфазного синхронного двигателя подходит для:

- модернизации действующего оборудования;
- построения современных систем контурной обработки;
- реализации позиционных задач с возможностью объединения приводов в распределенную сеть;
- выполнения множества вспомогательных задач, решение которых увеличивает надежность и срок службы приводов и систем, построенных на их основе, уменьшает эксплуатационные расходы, упрощает пусконаладочные работы.

Анализ выполним для конкретного сервопривода СПС 25. В его структуру входят стандартные модули, функциональные блоки и датчики, необходимые для решения задач прецизионного позиционирования с возможностью настройки переходного процесса на заданный режим разгона/торможения и вспомогательных задач (для обеспечения надежности оборудования) [5, 7]:

– механический модуль (модуль линейных перемещений), предназначенный для высокоточного перемещения объекта в горизонтальной или вертикальной плоскостях;

- трехфазный синхронный двигатель (СД);
- цифровой датчик позиции (энкодер);

– блок управления (БУ), содержащий сервоконтроллер, в состав которого, в частности, входят преобразователь частоты (ПЧ), и встроенный программируемый логический контроллер (ПЛК); БУ обеспечивает работу с дробными числами и позволяет реализовывать достаточно сложные алгоритмы управления без использования контроллера верхнего уровня; имеет цифровые порты ввода/вывода с оптической связью и обладает возможностью сетевого взаимодействия, управления по сети удаленными приводами;

– преобразователь частоты (ПЧ), который управляет СД и реализует алгоритм векторного управления [8], обеспечивая регулирование по моменту (току), скорости и позиции в рамках трехконтурной системы подчиненного управления позиционированием с использованием цифровых пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) и пропорционально-интегрального (ПИ) алгоритмов;

– встроенный в БУ программируемый логический контроллер, предназначенный для разработки и выполнения созданных пользователем прикладных программ без применения внешних контроллеров;

– специализированное программное обеспечение [9], включающее программу MotoMaster® и язык программирования *Servo Motor Language (SML)*, предназначенное для:

- разработки, настройки и анализа прикладных программ пользователем;
- адаптации универсальных приводов к конкретной задаче;
- отображения в реальном времени всех динамически изменяемых параметров привода (токов, напряжений, скорости, позиции и т. д.) с помощью графического интерфейса MotoMaster®.

– функция синхронизации работы большой группы СПС (до 128 приводов на базе промышленной шины *CAN*); реализован режим работы «*master-slave*»;

– функция электронного редуктора, которая используется для преобразования величины перемещения, указанной в реальных физических единицах, в импульсы энкодера датчика серводвигателя, что обеспечивает экономию ресурсов контроллера и времени на программирование.

– для удобства настройки и эксплуатации все параметры сервопривода разбиты на несколько групп [10] и доступны в графическом интерфейсе:

- статические параметры, не изменяемые в процессе работы привода;
- параметры управления;
- динамические параметры;
- системные параметры, предназначены для настройки внутренних алгоритмов и режимов работы, а также для выполнения проверки работоспособности и выявления неисправностей;
- параметры тестирования, позволяют задать режим тестирования качества настройки привода.

– для настройки механических и электрических параметров сервопривода, их отображения в реальном времени, разработки программ движения каждый сервопривод укомплектован компьютером, на котором установлена программа МотоМастер® и реализован графический интерфейс.

Сервопривод СПС обладает широким диапазоном регулирования скорости [11] от 1:1000 до 1:12000 в зависимости от разрешения энкодера (от 4096 импульсов/оборот до 160000 импульсов/оборот). В зависимости от момента инерции нагрузки на валу двигателя частота дискретизации (обновления управляющего кода) контура скорости может достигать 5 кГц, что обеспечивает высокие динамические характеристики сервопривода.

Интерфейсы сервопривода СПС 25: технологический интерфейс *USB*, с помощью которого можно выполнять настройку параметров привода, анализировать его работу и управлять им в ручном режиме; *CAN*-интерфейс, предназначенный для управления в режиме реального времени; современный интерфейс *EtherCAT*, который обязателен при создании высокотехнологичного оборудования; интерфейс *Step/Dir* для задания позиции вала двигателя; аналоговый интерфейс  $\pm 10\text{V}$ ; квадратурные выходы датчика позиции с интерфейсом *RS-422*; интерфейс цифрового входа/выхода с оптической развязкой, дополнительный аналоговый вход общего назначения.

Надежность и безопасность функционирования обеспечивают комплекс датчиков и аппаратно-программных защит: датчик позиции и скорости; датчики токов и напряжений; датчик температуры; датчик короткого замыкания; обработка концевых и аппаратных датчиков.

Встроенный интерпретатор *G*-кодов [11] позволяет некоторым приводам выполнять контурное движение по сложной траектории без системы управления верхнего уровня. При этом программа хранится в энергонезависимой памяти БУ привода и может запускаться при включении автоматически. Максимальное количество кадров составляет 3000.

### **О компетенциях (знаниях и умениях) инженера, необходимых для эффективного использования функциональных возможностей сервопривода СПС**

В автоматизированных системах управления инженер выступает и как пользователь, и как разработчик. Как разработчик, в частности, он должен определить правила взаимодействия человека с технической системой, обеспечивающие оптимальное использование широких возможностей применяемого интеллектуального оборудования.

На основе анализа структуры и функциональных возможностей сервопривода СПС определены следующие возможные режимы его работы:

- а) управление моментом на валу двигателя;
- б) управление скоростью перемещения нагрузки;
- в) управление позицией объекта или с максимальной динамикой, или с плавным разгоном/торможением;
- г) отработка пользователем прикладных программ движения;
- д) тестовый; с его помощью можно проанализировать качество управления сервоприводом при задании параметров разгона/торможения и стандартных функций задающего воздействия (ступенька, синус);
- е) реализация электронного редуктора;
- ж) синхронизация работы группы приводов (выполнение циклических операций с синхронизацией по шине *CAN*);
- з) управление высокотехнологичным оборудованием с использованием интерфейса *EtherCAT* (доступен в последней генерации СПС 25 [11]).

Учитывая сложность реализации и многообразие представленных выше режимов, актуальной представляется задача определения компетенций, которыми должен обладать инженер, работающий с универсальными комплектными сервоприводами серии СПС.

Пользователь должен обладать знаниями и умениями в следующих областях:

- системы подчиненного управления позиционированием объекта с обеспечением наибольшего быстродействия и точности в условиях заданных ограничений;
- методика настройки цифровых ПИД-регуляторов с использованием графического интерфейса МотоМастер® на заданный режим разгона/торможения, включая технически оптимальные по быстродействию процессы;
- отработка пользователем прикладных программ движения с использованием ПЛК и специального программного обеспечения;

- использование имеющихся интерфейсов для интеграции сервопривода в автоматизированную систему управления технологическим процессом или производством;
- безопасное использование сервопривода, при котором обеспечивается его надежная работа и не происходит повреждений привода и внешнего оборудования.

О системе подчиненного управления и алгоритмах настройки

Системой подчиненного управления (СПУ) называется система автоматического управления, состоящая из нескольких вложенных друг в друга замкнутых контуров, настроенных так, что внутренний контур подчиняется внешнему контуру, который вырабатывает сигнал управления для внутреннего контура и управляет им [12, 13]. Классическая структура СПУ для трех контуров показана на рисунке 2. Каждый из контуров содержит свой собственный регулятор и датчик регулируемой величины.

Первый (внутренний) контур – контур регулирования момента (тока) двигателя. Этот контур содержит регулятор момента двигателя РМ, датчик момента ДМ, объединенные в блок W01 преобразователь частоты (ПЧ) и статорную обмотку двигателя. С помощью датчика ДМ осуществляется жесткая отрицательная обратная связь (ЖОС) по моменту (току). Задающим сигналом для первого контура является сигнал задания момента  $U_{3m}$  с выхода регулятора скорости РС.

Второй контур, которому подчинен первый – контур регулирования угловой скорости двигателя  $\omega$ . Он содержит регулятор скорости РС, первый контур, двигатель (блок  $W_{02}$ ) с его механической характеристикой  $\omega = f(M)$ , датчик скорости ДС для реализации ЖОС по скорости. Задающим сигналом для второго контура является сигнал задания скорости  $U_{3c}$  с выхода регулятора позиции объекта управления РП.

Третий (главный) контур, которому подчинен второй – контур регулирования позиции  $S$  объекта управления. Он содержит регулятор позиции РП, второй контур, кинематическую передачу, соединяющую вал двигателя с объектом управления ( $W_{03}$ ), датчик позиции ДП для реализации ЖОС по позиции. Задающим сигналом для третьего контура является сигнал задания позиции  $U_{3p}$ .

В результате все внутренние контуры работают как подчиненные задаче регулирования выходной величины системы.

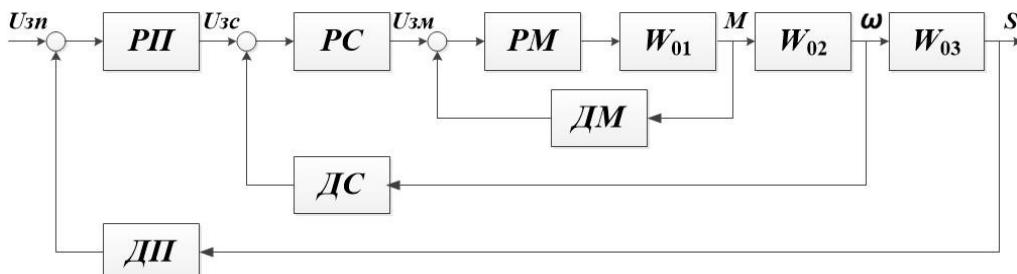


Рисунок 2 – Структура системы подчиненного управления

Достоинства СПУ определяются возможностью реализации следующих процедур:

- раздельная настройка контуров, начиная с первого самого внутреннего;
- коррекция переходных процессов отдельно в каждом контуре, что существенно упрощает практическую настройку системы;
- раздельное регулирование переменных.

Выбор типа регулятора производят в зависимости от структуры и параметров объекта управления, требований к статическим и динамическим свойствам контура. Для сервоприводов СПС 25 в контурах регулирования момента и позиции используются ПИ-регуляторы РМ и РП, а в контуре регулирования скорости в качестве РС используется ПИД-регулятор.

Цифровой ПИД-регулятор [13, 14] описывается следующим математическим выражением (у ПИ – регулятора отсутствует дифференциальная составляющая,  $K_D = 0$ )

$$Y_{i+1} = (K_p \cdot \varepsilon_i + K_D \cdot \Delta \varepsilon_i / \Delta t_{изм} + K_I \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}) \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $Y_{i+1}$  – цифровой код на выходе ПИД-регулятора в течение  $(i+1)$ -го интервала дискретизации;

$K_p$  – коэффициент при пропорциональной составляющей;

$\varepsilon_i$  – ошибка (рассогласование), разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины в момент времени  $t_i$ , дискрет;

$K_D$  – коэффициент при дифференциальной составляющей, с;

$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$  – разность ошибок двух соседних измерений, дискрет;

$\Delta t_{\text{изм}} = t_i - t_{i-1}$  – интервал дискретизации, время между соседними измерениями, с;

$K_I$  – коэффициент при интегральной составляющей, с-1;

$\sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{\text{изм}}$  – накопленная к  $i$ -му шагу сумма ошибок (интегральная сумма рассогласований), дискрет.

Настройка контура включает выбор типа регулятора и определение его параметров.

Определение параметров регулятора выполняется исходя из необходимости получения заданного переходного процесса в каждом контуре. Рассмотрим настройку ПИД-регулятора на технически оптимальный переходный процесс.

Технически оптимальным считается такой переходный процесс [5], при котором время  $t_1$  изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании  $\sigma = [\frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)}] \cdot 100\%$  не превышающим 4-10% (рисунок 3).

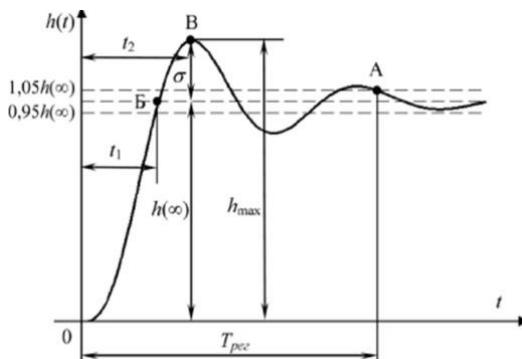


Рисунок 3 – К настройке переходного процесса на технический оптимум

Такой переходный процесс при ступенчатом входном воздействии  $x(t) = 1(t)$  является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Параметрами, характеризующими качество управления, являются (рисунок 3):

– время переходного процесса  $T_{\text{пер}}$ , с.; характеризует быстродействие системы и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее установившегося значения становится не более  $\pm 5\%$ ;

– максимальное перерегулирование  $\sigma$  определяет наибольший «выбег» выходной величины от установившегося значения в переходном процессе, вычисляется относительно установившегося значения в %

$$\sigma = [\frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)}] \cdot 100\%;$$

– статическая ошибка  $\varepsilon_{\text{уст}}(t)$ ; определяет точность регулирования выходной величины

$$\varepsilon_{\text{уст}}(t) = h(t) - h(\infty) \text{ при } t \geq T_{\text{пер}}$$

– время  $t_1$  нарастания регулируемой величины до установившегося значения  $h(\infty)$ ,

для ПИД – регулятора скорости определяет величину ускорения при разгоне;

– число перерегулирований  $N$  в интервале  $0 \leq t \leq T_{\text{пер}}$ , определяется как число выбросов, при которых кривая  $h(t)$  располагается ниже значения  $h(\infty)$ , при настройке ПИД-регулятора на технический оптимум величина  $N = 1$ .

Если разгон с максимальным ускорением недопустим, то при настройке используем «Режим плавного разгона/торможения» с ограничением ускорения и анализом указанных выше показателей качества регулирования.

О методике настройки цифровых ПИД-регуляторов с использованием графического интерфейса МотоМастер<sup>©</sup>

Графический интерфейс МотоМастер<sup>©</sup> [5] предназначен для отображения на цветном экране дисплея динамически изменяющихся механических и электрических величин в

процессе настройки и эксплуатации сервопривода. При этом используются три вкладки: «Контроль», «Конфигурация», «Осциллограф». Вкладка «Контроль» служит для редактирования и инициализации прикладных программ управления позиционированием сервопривода от ПЛК. Вкладка «Конфигурация» используется для задания параметров при настройке сервопривода. Вкладка «Осциллограф» предназначена для получения изображений динамически изменяющихся параметров в процессе настройки и эксплуатации сервопривода.

Для целей анализа во многие сервоприводы входит программный осциллограф [6], который позволяет пользователю анализировать динамические параметры привода в процессе выполнения рабочих циклов. В качестве анализируемых данных могут выступать: токи, протекающие в обмотках двигателя, напряжение питания, скорость вращения, текущая позиция и т.п. Программный осциллограф сервопривода разделен на две части:

- первая часть, входящая в состав самого привода, который выполняет захват и накопление данных, а также может подавать на привод тестовые воздействия (например, приращение скорости для анализа качества настройки контура скорости и тока);
- вторая часть, расположенная на компьютере, выполняет прием и графическое отображение параметров.

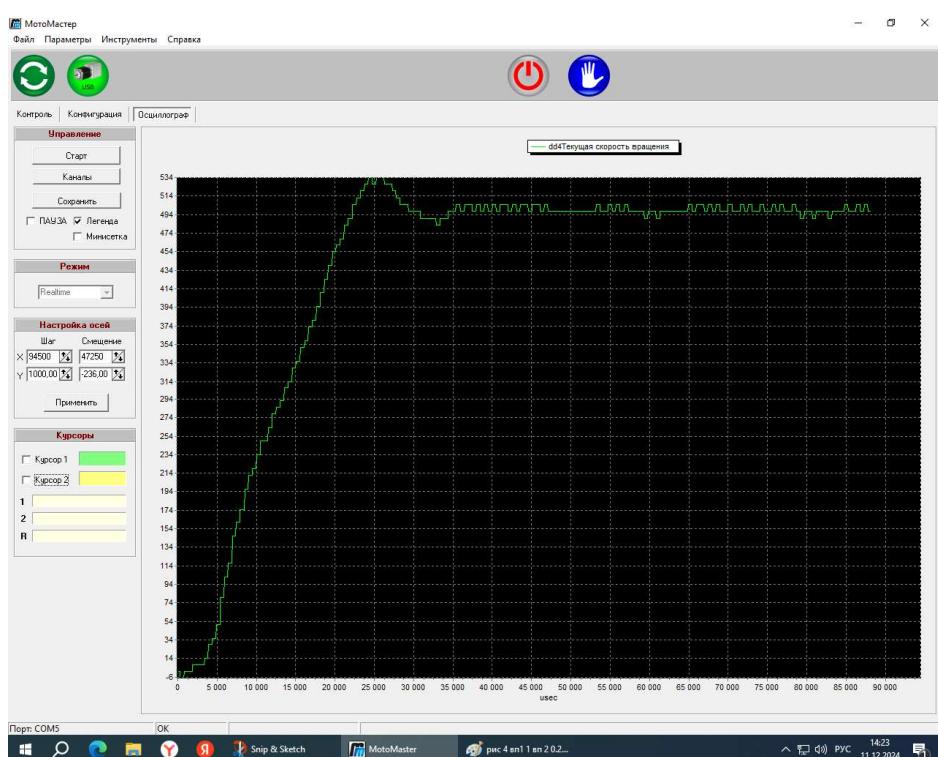


Рисунок 4 – К настройке переходного процесса в контуре скорости сервопривода СПС 25

В режиме «Настройка» с использованием графического интерфейса предоставляется возможность раздельной настройки каждого контура системы подчиненного управления сервоприводом как в режиме с максимальной динамикой (при подаче на вход контура ступеньки), так и в режиме плавного разгона/торможения. При этом контур может быть настроен как на технический оптимум, так и на обеспечение заданных пользователем показателей качества управления.

В соответствии с выражением (1) настройке подлежат четыре параметра ПИД-регулятора контура скорости в следующей последовательности: частота дискретизации  $f_{\text{диск}} = 1/\Delta t_{\text{изм}}$ ; коэффициенты  $K_p$ ,  $K_d$ , КИ.

Методика настройки цифрового ПИД-регулятора с использованием графического интерфейса представляет собой определенную последовательность действий, которая подробно изложена в литературе [13]. Чаще всего достаточно добиться такого вида переходного процесса, который устроит пользователя в условиях текущей задачи.

На рисунке 4 представлен результат настройки цифрового ПИД-регулятора контура скорости сервопривода СПС 25 при заданных значениях частоты вращения  $n = 500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$  и

максимальном ускорении, равном 100 об/с<sup>2</sup>. Обеспечено перерегулирование  $\sigma = (34/500) \cdot 100\% = 6.8\%$ .

При этом время переходного процесса  $t_{\text{пп}} < 30$  мс, статическая ошибка  $\varepsilon_{\text{уст}} \leq 2\%$  (неплавный характер кривой переходного процесса объясняется дискретным считыванием данных при построении графика), число перерегулирований  $N=1$ .

Отработка прикладных программ движения с использованием ПЛК и специального программного обеспечения

В блок управления сервоприводом встроен программируемый логический контроллер (ПЛК) [9]. ПЛК предназначен для исполнения прикладных программ, созданных пользователем. Его основная задача – предоставить возможность автономно выполнять вспомогательные операции самим приводом без использования контроллера верхнего уровня.

Разработка программ для внутреннего ПЛК выполняется на языке SML (Servo Motor Language), разработанного компанией ЗАО «Сервотехника» специально для сервоприводов [9]. Разработка и отладка программ выполняется в программе МотоМастер<sup>©</sup>, для этого в нее включен текстовый редактор (рисунок 5).

После выбора вкладки «Контроль» открывается «Окно программирования контроллера».

При записи программы в привод компилятор, встроенный в МотоМастер<sup>©</sup>, проверяет синтаксис программы и в случае корректного написания выполняет компиляцию и запись программы в энергонезависимую память сервоприводика (рисунок 5). В энергонезависимой памяти контроллера размещено 8 банков программ, в которых пользователь сохраняет разработанные программы движения. При необходимости ПЛК может переходить от выполнения одной программы к другой.

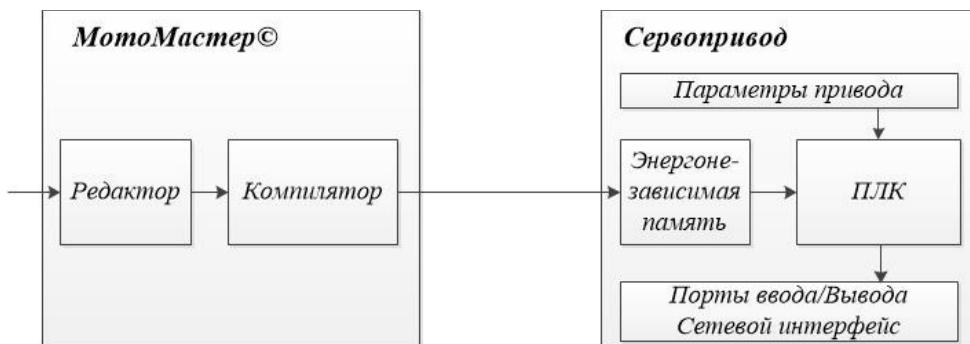


Рисунок 5 – Взаимодействие программы МотоМастер<sup>©</sup> и привода при программировании ПЛК

ПЛК работает в фоновом режиме и прерывается такими задачами реального времени как расчет контуров момента, скорости, позиции, прием данных по интерфейсам и прочие. Поэтому частота обработки программы зависит от загруженности процессора.

При стандартных настройках привода время выполнения одной команды программы в ПЛК составляет в среднем 50 мкс. Временные характеристики ПЛК в конкретном приложении привода можно проанализировать с помощью параметров dd15 (время выполнения одной команды интерпретатором), dd16 (время выполнения программы интерпретатором). Параметры можно анализировать как в режиме реального времени, для оценки средних величин, так и в виде графиков, используя для этого осциллограф.

К наиболее часто используемым задачам, решаемым с помощью встроенного ПЛК, относятся:

- выход в нулевую позицию по позиционному выключателю;
- аварийный останов привода в случае выхода из рабочей зоны действия;
- управление режимом работы привода (направлением движения, величинами ускорения, скорости, позиции и т.д.);
- включение/выключение внешнего оборудования по определенным событиям;
- автономная работа нескольких приводов, объединенных в локальную сеть с помощью шины CAN, с целью совместного позиционирования.

О назначении интерфейсов сервопривода серии СПС

Функциональные возможности сервопривода в составе автоматизированной системы управления оборудованием в значительной мере определяются заложенными в его конструкции интерфейсами.

Заслуженную популярность приобрели цифровые линии связи [6], которые в рамках одной шины могут предоставить возможность объединять множество устройств и передавать не только данные управления, но и сигналы обратной связи датчиков, расположенных в приводах, передавать диагностическую информацию о состоянии привода, позволяют создавать полноценную распределенную систему. Преимущества такого подхода очевидны: увеличение надежности, простота монтажа, улучшение качества управления, увеличение расстояния между узлами. На сегодняшний день в мире существует множество стандартных интерфейсов, такие как CANOpen, ProfiBUS, EtherCAT, Sercos, PowerLink и другие. При выборе приводов с данными стандартами системный интегратор может быть уверен, что устройства даже разных производителей в состоянии взаимодействовать между собой без промежуточных шлюзов, поскольку и транспортный уровень данных протоколов, и прикладной строго унифицирован.

CAN-интерфейс предоставляет полный доступ ко всем ресурсам привода и позволяет управлять любым из параметров. Предназначен для реализации протокола управления удаленными сервоприводами по шине CAN в режиме реального времени, обеспечения скорости передачи данных от 20 кб/с до 1 Мб/с, синхронизации работы большой группы СПС (до 128 приводов).

Встроенный интерпретатор G-кодов [11] позволяет некоторым приводам выполнять контурное движение по сложной траектории без системы управления верхнего уровня. При этом программа хранится в энергонезависимой памяти АСУ привода и может запускаться при включении автоматически. Пульт ручного управления со штурвалом может подключаться и управлять непосредственно системой приводов по шине CAN.

Для приводов СПС разработана специальная система управления движением [11], которая позволяет обойтись без применения дорогостоящего устройства ЧПУ. Для использования этой системы пользователю необходимо спроектировать свое изделие в CAD-системе, затем загрузить программу в CAM-систему, далее в «Мотомастер». После этого программа может быть выполнена приводами, обрабатывающими G и M – коды.

Преимуществами данной системы управления являются: экономичность, высокая производительность, экономия времени на монтаж, цифровое управление приводами по шине CAN (1 Мбит/с), возможность управления рассогласованием между математической моделью изделия и траекторией обрабатывающего инструмента.

Последняя генерация сервопривода СПС-25 может оснащаться современным интерфейсом EtherCAT [11], который обязателен при создании высокотехнологичного оборудования. Использование технологии EtherCAT даёт возможность добиться производительности недостижимой для устройств, использующих классические шинные системы. Преимущества EtherCAT это высокая пропускная способность - процесс обмена данными с 1000 распределенных цифровых входов / выходов занимает около 30 мкс. Данные для и от 1000 сервосетей могут обновляться со скоростью до 10 кГц. Типичная скорость обновления сети 1-30 кГц, но EtherCAT может быть использован так же с медленным временем цикла, если нагрузка слишком высока на вашем компьютере.

Технологический интерфейс USB позволяет выполнить настройку параметров привода, анализировать его работу и управлять им в ручном режиме.

Интерфейс Step/Dir и квадратурные выходы датчика позиции с интерфейсом RS-422 предназначены для управления текущей позицией объекта. При использовании данных интерфейсов контуры скорости и позиции должны быть замкнуты.

Интерфейс цифрового входа/выхода с оптической развязкой обеспечивает 2 цифровых выхода для управления внешним оборудованием и 4 цифровых входа для подключения концевых датчиков и другого внешнего оборудования.

Обеспечение безопасности и надежности функционирования сервоприводов серии СПС

Инженер, работающий с интеллектуальным оборудованием, должен обладать набором знаний и умений, обеспечивающих безопасное и надежное функционирование оборудования.

Надежное и безопасное функционирование сервоприводов серии СПС обеспечивается рядом технических решений, примененных в их конструкции.

В состав СПС входит целый комплекс датчиков и аппаратно-программных защит (датчик позиции и скорости, датчики токов и напряжений, датчик температуры, быстродействующий датчик короткого замыкания, датчик напряжения питания двигателя обработка концевых программных и аппаратных датчиков).

Так с помощью датчика напряжения питания двигателя обеспечивается безопасное функционирование оборудования, особенно при резком торможении большой инерционной нагрузки. При торможении двигатель переходит в генераторный режим, что вызывает повышение напряжения питающего его источника питания. Это может привести к выходу из строя, как самого привода, так и внешнего оборудования, использующего ту же сеть питания. Поэтому современный привод отслеживает текущее напряжение питания и в случае превышения заданного значения переходит в режим стабилизации напряжения. Для этого, как правило, используется тормозные резисторы со схемой управления, которые гасят на себе лишнюю выработанную двигателем энергию.

Кроме того, пользователю необходимо соблюдать предельно допустимые механические нагрузки на модуль линейных перемещений.

Например, для модуля линейных перемещений на базе шарико-винтовой пары (ШВП) [15] суммарная величина нагрузки не должна превышать значений, приведенных в выражениях (2) и (3):

$$\frac{F_y}{F_{y,max}} + \frac{F_z}{F_{z,max}} + \frac{M_x}{M_{x,max}} + \frac{M_y}{M_{y,max}} + \frac{M_z}{M_{z,max}} \leq 1 \quad (2)$$

где  $F_y, F_z$  – реальные значения усилий по осям  $y, z$  соответственно, Н;

$y$  – поперечная ось в горизонтальной плоскости;

$z$  – вертикальная к горизонтальной плоскости ось;

$M_x, M_y, M_z$  – реальные значения динамических моментов по осям  $x, y, z$  соответственно, Нм;

$x$  – продольная ось в горизонтальной плоскости;

$F_{y,max}, F_{z,max}$  – наибольшие допустимые значения усилий по осям  $y, z$  соответственно, Н;

$M_{x,max}, M_{y,max}, M_{z,max}$  – наибольшие допустимые значения динамических моментов по осям  $x, y, z$  соответственно, Нм;

$$\frac{F_x}{F_{x,швп}} \leq 1 \quad (3)$$

где  $F_x$  – реальное значение усилия по оси  $x$ , Н;

$F_{x,швп}$  – наибольшее значение усилия по оси  $x$  на шарико-винтовую пару модуля линейных перемещений, Н.

Обеспечение кибербезопасности сервоприводов при сетевом взаимодействии

Исторически, сетевые взаимодействия в промышленных управляющих системах были организованы с использованием последовательных сетей полевого уровня RS-485 и RS-422. Протоколы на основе этих интерфейсов, такие как Modbus, Profibus и другие, были разработаны без учета безопасности, поскольку использовались для развертывания в средах с ограниченным доступом. При большой протяженности коммуникационной сети с распределенным оборудованием всегда может возникнуть вероятность появления отдельных неконтролируемых участков физически доступных для злоумышленников. В этом случае приходится решать задачу контроля доступа методом усложнения программ, например, используя решения, основанные на стандарте IEC 60839-11-5. Данное решение не всегда реализуемо с учетом корпоративного программного обеспечения для промышленного оборудования.

В статье [16] предлагается исследование разработанного встраиваемого аппаратного устройства на платформе программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) для уменьшения киберугроз. Основная идея заключается в замене специально выделенных сегментов сети, имеющих неконтролируемый доступ (открытый для злоумышленника), на сегменты, защищенные аппаратными средствами. Использование в составе аппаратных модулей безопасности (АМБ) элементов на платформе ПЛИС дает широкие функциональные возможности: использование сторонних IP-ядер с адаптацией к решаемой задаче, разработка собственных алгоритмов кодирования передаваемых данных [17], изменение алгоритма "на лету", меняя конфигурацию ПЛИС, и подстраиваясь к изменяющимся условиям работы системы. Кроме того, применение в разработанном АМБ DS-кодирования на сигнальном уровне, обладающим свойством самосинхронизации, дает возможность произвольно менять

скорость передачи, даже в пределах одного сообщения. Использование АМБ может быть эффективно при сетевом взаимодействии промышленного оборудования и защите неконтролируемых участков коммуникационной сети в системах контроля доступа.

Организация подготовки в ВУЗе инженеров для работы с современным интеллектуальным универсальным оборудованием

В результате проведенного выше анализа определен достаточно широкий спектр теоретических знаний и практических навыков, необходимых инженеру для работы с интеллектуальным универсальным оборудованием (например, сервоприводами с векторным управлением). Процесс подготовки инженеров для работы с таким оборудованием включает в себя две составляющих:

- тесное взаимодействие ВУЗа с высоко технологичными предприятиями (в дальнейшем – работодателями);
- выполнение ряда необходимых мероприятий внутри ВУЗа.

В результате взаимодействия ВУЗа с работодателем заключается совместный договор о сотрудничестве в области высшего образования, предполагающий совместную разработку учебного плана для данного направления подготовки, обязательства сторон, гарантирующие качественную подготовку инженеров (участие специалистов от работодателей в процессе обучения студентов, в государственных экзаменационных (аттестационных) комиссиях, участие студентов в научно-исследовательской деятельности предприятия, организацию всех видов практик студентов на предприятии, содействие предприятия в трудоустройстве студентов-выпускников и т.д.).

Совместно с основными работодателями определяется перечень дисциплин, при освоении которых студент приобретает необходимые знания и умения. Например, для направления подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств» к таким дисциплинам относятся: управление в автоматизированном производстве, программное обеспечение систем управления, теория автоматического управления, автоматизированный электропривод, моделирование систем и процессов, автоматизация технологических процессов, автоматизированное оборудование машиностроительного производства и другие.

Для достижения поставленной цели внутри ВУЗа проведены следующие мероприятия:

- ежегодная адаптация материалов лекций и семинаров в полученном перечне дисциплин к требованиям, предъявляемым к инженерам, работающим с интеллектуальным оборудованием;
- создание лабораторий, оснащенных соответствующим оборудованием и программными средствами для обеспечения непосредственно в ВУЗе систематической, практической подготовки студентов (приобретения требуемых навыков);
- сочетание процессов моделирования и реального эксперимента, при котором компьютерная модель изучаемого процесса несет вспомогательную функцию подготовки студентов к управлению реальным объектом;
- участие студентов в научно-исследовательских работах с использованием современного автоматизированного (автоматического) оборудования;
- разработка программ практик с учетом использования автоматизированного (автоматического) оборудования, распределение студентов для прохождения практик на предприятия, обладающие указанным выше оборудованием;
- назначение двух руководителей практики: от выпускающей кафедры и от предприятия, на котором студент проходит практику; защита студентом выполненной работы на предприятии.

Для рассматриваемого направления подготовки студентов в филиале «Протвино» государственного университета «Дубна» кроме компьютерных классов используются следующие лаборатории: физики; электротехники и электроники; автоматизации; мехатроники.

В лаборатории мехатроники созданы три лабораторных стенда на базе отечественных комплектных сервоприводов СПС и СПШ с векторным управлением.

В программных пакетах MicroWin\_STEP7 и TIA Portal студенты готовят управляющие программы, а затем отрабатывают их с исполнительными устройствами. При этом формируются законченные управляющие технологические цепочки, в составе которых могут быть: ПЛК-программа-робот-манипулятор, ПЛК-программа-пневмопривод, ПЛК-программа-цикловая автоматика.

В лаборатории автоматизации студенты используют в своих проектах ПЛК наиболее популярных S7-200, S7-1200, S7-1500 семейств фирмы Siemens. Для создания управляющих программ на ПЛК студенты осваивают несколько языков промышленной автоматизации.

В филиале приобретено несколько современных ПЛК отечественной фирмы ОВЕН, на которых студенты, с использованием среды CoDeSys, разрабатывают управляющие программы на языках промышленной автоматизации.

Для создания новых и модернизации используемых стендов были приобретены наборы на ПЛИС, в состав которых входят микросхемы семейства Cyclone 10, разработанные фирмой INTEL.

Проекты на ПЛИС можно создавать на языках описания аппаратуры (объектно-ориентированных языках высокого уровня) таких как SystemVerilog или SystemC. Благодаря этому студенты могут работать в привычной программной среде.

Для проведения лабораторных работ приобретены наборы DEO\_NANO фирмы Terasic на ПЛИС семейства Cyclone IV (фирма ALTERA), которые включают как аппаратную, так и программную части.

С помощью пакета Quartus Prime Lite Edition фирмы INTEL студенты выполняют моделирование и верификацию проектов, а затем с помощью набора современных измерительных приборов (генераторов, мультиметров, осциллографов и блоков питания) проверяют работу цифровой схемы.

Для изучения микроконтроллеров приобретены наборы на современных ARM-процессорах, имеющих в составе быстрые коммуникационные интерфейсы (Gigabit Ethernet, 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN) и контакты ввода/вывода для подключения исполнительных устройств.

### Заключение

На основе анализа структуры и функциональных возможностей сервоприводов серии СПС определен необходимый набор компетенций пользователя в следующих областях знаний:

- системы починенного управления и их настройка, включая настройку цифровых ПИД-регуляторов на технический оптимум с использованием графического интерфейса;
- разработка прикладных программ движения с использованием встроенного ПЛК и специального программного обеспечения;
- использование интерфейсов универсального оборудования в системах автоматизации технологических процессов и производств;
- обеспечение надежного и безопасного использования сервоприводов не только за счет встроенных программно-аппаратных защит, но и за счет обеспечения механических нагрузок на модули линейных перемещений, не превышающих допустимые, корректного выбора режима торможения трехфазного синхронного двигателя.

Для приобретения компетенций в указанных областях знаний (на примере обучения студентов направления «Автоматизация технологических процессов и производств») в статье предложены мероприятия, обеспечивающие подготовку инженеров для работы с современным универсальным комплектным оборудованием при тесном взаимодействии с работодателями. Эти мероприятия включают не только изменение рабочих программ соответствующих дисциплин, но и создание лабораторий в ВУЗе, сочетание процессов моделирования и реального эксперимента, участие студентов в научно-исследовательских работах как в ВУЗе, так и на высокотехнологичных предприятиях, организацию всех видов практик на этих предприятиях.

Таким образом, в статье продемонстрирован системный подход к достижению поставленной цели – обеспечению эффективного использования широких функциональных возможностей интеллектуального, комплектного оборудования в автоматизированных системах управления технологическими процессами и производствами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схиртладзе А.Г. Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие / А.Г. Схиртладзе, А.В. Федотов, В.Г. Хомченко. – Москва: Высшая школа, Абрис, 2012. – 565 с.
2. Яровой Е.А. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) / Е.А. Яровой // Перспективы науки, 2021, №3. – С. 170-172.

3. Дементьев Ю.Н. Электрический привод: учебное пособие для вузов / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. — 2-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 223 с. — (Высшее образование).

4. Онищенко Г.Б. Проблемы и перспективы развития электропривода / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей XXXIII региональной научно-технической конференции. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2014. — С. 6-13.

5. Евсиков А.А. Автоматизированный электропривод с частотным управлением: учебное пособие / А.А. Евсиков, В.А. Коковин, А.П. Леонов. — Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2020. — 121 [1] с.

6. Тихонов А.О. Функциональные возможности современного сервопривода / А.О. Тихонов // Control Ingeneering Россия. — Июнь 2008.

7. Сервопривод СПС 25. Руководство пользователя, версия 4.8. — ЗАО «Сервотехника», 2016 г. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1049.pdf> (дата обращения: 30.01.2025).

8. Фираго Б.И. Векторные системы управления электроприводами: учебное пособие / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев. — Минск: Вышэйшая школа, 2016. — 159 с.

9. Интегрированный сервопривод СПШ10. Язык программирования, версия 4.2. — ЗАО «Сервотехника», 2012 г. Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf> (дата обращения: 30.01.2025).

10. Интегрированный сервопривод серии СПШ и СПС. Описание параметров, версия 5.1. — ЗАО «Сервотехника», 2013 г. Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1169.pdf> (дата обращения: 30.01.2025).

11. Федотов П.А. Новый сервопривод СПС – новые возможности / П.А. Федотов // Промышленный вестник, 2009, №11. С. 92-93.

12. Туркин И.И. Совершенствование систем управления электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации / И.И. Туркин, Мин Хеин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2016, №3. — С. 86-92.

13. Евсиков А.А. Об особенностях структуры и настройки отечественных сервоприводов с векторным управлением / А.А. Евсиков, В.А. Коковин, А.П. Леонов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий, №3 (341), 2020. С. 122-130.

14. Панкратов Л.В. Моделирование и оптимизация ПИД-регулятора / Л.В. Панкратов // Наука и техника транспорта, 2017, №2. — С. 73-78.

15. MB80 / MBV80 – Усиленные модули с ШВП. ЗАО «Сервотехника». Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/serie/index.pl?id=247> (дата обращения: 30.01.2025).

16. V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), pp. 1-5, 2024. Электрон. дан. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10741050> (дата обращения: 30.01.2025).

17. V. A. Kokovin, A. N. Sytin and V. V. Skvortsov, "Hardware Cybersecurity on the FPGA Platform During Network Interaction of Distributed Industrial Equipment", 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), pp. 568-573, 2024. Электрон. дан. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10515711> (дата обращения: 30.01.2025).

**Евсиков Александр Александрович**  
Филиал «Протвино»  
государственного  
университета «Дубна», г. Протвино  
Кандидат технических наук,  
доцент,  
директор филиала  
142281 г. Протвино Московской  
области,  
Северный проезд, 9.  
Телефон: 8-(4967)-31-01-91  
E-mail: [eaa@uni-protvino.ru](mailto:eaa@uni-protvino.ru)

**Коковин Валерий Аркадьевич**  
Филиал «Протвино»  
государственного  
университета «Дубна», г.  
Протвино  
Кандидат технических наук,  
доцент,  
заведующий лабораторией  
142281 г. Протвино Московской  
области,  
Северный проезд, 9.  
Телефон: 8-(4967)-31-01-91  
E-mail: [kokovin@uni-protvino.ru](mailto:kokovin@uni-protvino.ru)

**Леонов Анатолий Петрович**  
Филиал «Протвино»  
государственного  
университета «Дубна», г. Протвино  
Кандидат технических наук,  
доцент,  
доцент кафедры «Автоматизация  
технологических процессов и  
производств»  
142281 г. Протвино Московской  
области,  
Северный проезд, 9.  
Телефон: 8-(4967)-31-01-91  
E-mail: [anatoli.leonov@gmail.com](mailto:anatoli.leonov@gmail.com)

EVSIKOV A.A., KOKOVIN V.A., LEONOV A.P.

## ON THE USE OF THE FUNCTIONAL CAPABILITIES VECTOR CONTROL SERVO DRIVES

**Abstract.** *AC servo drives with vector control have wide functionality and are a basic part of modern precision automated equipment. They are widely used in automated control systems for technological processes and production. In this article, using the example of industrial servo drives of the SPS series, the conditions are defined, the observance of which ensures the effective use of the capabilities of complex technical equipment. In this case, three components are*

*analyzed: the structure and functional capabilities of the SPS series servo drives; the set of knowledge and skills of the engineer necessary for the implementation of the wide functional capabilities of the servo drives; the organization of training engineers to work with complex technical systems.*

**Keywords:** servo drive, vector control, intelligent equipment, engineer knowledge and skills, engineer training.

## BIBLIOGRAPHY

1. Skhirtladze A.G. Automation of technological processes and production: textbook / A.G. Skhirtladze, A.V. Fedotov, V.G. Khomchenko. – Moscow: Higher School, Abris, 2012. – 565 p.
2. Yarovoy E.A. Automation and management of technological processes and production (by industry) / E.A. Yarovoy // Perspectives of Science, 2021, No. 3. – pp. 170-172.
3. Dementiev Yu.N. Electric drive: textbook for universities / Yu. N. Dementyev, A. Yu. Chernyshev, I. A. Chernyshev. — 2nd ed. - Moscow: Yurayt Publishing House, 2024. - 223 p. — (Higher education).
4. Onishchenko G.B. Problems and prospects for the development of electric drives / G.B. Onishchenko, M.G. Yunkov // Current problems of electric power industry. Collection of scientific and technical articles of the XXXIII regional scientific and technical conference. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva, 2014. – P. 6-13.
5. Evsikov A.A. Automated electric drive with frequency control: textbook / A.A. Evsikov, V.A. Kokovin, A.P. Leonov. – Dubna: State. Dubna University, 2020. – 121 [1] p.
6. Tikhonov A.O. Functional capabilities of a modern servo drive / A.O. Tikhonov // Control Engineering Russia. – 2008, June.
7. Servo drive SPS 25. User manual, version 4.8. – JSC "Servotekhnika", 2016 – Electron. Dan. – Access mode: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1049.pdf> (access date: 01/30/2025).
8. Firago B.I. Vector control systems for electric drives: textbook / B.I. Firago, D.S. Vasiliev. – Minsk: Higher School, 2016. – 159 p.
9. Integrated servo drive SPSH10. Programming language, version 4.2. – JSC "Servotekhnika", 2012. Electronic. Dan. – Access mode: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf> (access date: 01/30/2025).
10. Integrated servo drive of the SPSH and SPS series. Description of parameters, version 5.1. – JSC "Servotekhnika", 2013. Electronic. Dan. – Access mode: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1169.pdf> (access date: 01/30/2025).
11. Fedotov P.A. New SPS servo drive – new opportunities / P.A. Fedotov // Industrial Bulletin, 2009, No. 11. pp. 92-93.
12. Turkin I.I. Improvement of electric drive control systems based on the principles of subordinate regulation and self-organization / I.I. Turkin, Min Hein // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology, 2016, No. 3. – pp. 86-92.
13. Evsikov A.A. On the features of the structure and configuration of domestic servos with vector control / A.A. Evsikov, V.A. Kokovin, A.P. Leonov // Fundamental and applied problems of engineering and technology, No. 3 (341), 2020. pp. 122-130.
14. Pankratov L.V. Modeling and optimization of the PID controller / L.V. Pankratov // Science and technology of transport, 2017, No. 2. – pp. 73-78.
15. MV80 / MVU80 – Reinforced modules with ball screws. JSC "Servotekhnika" Electron. Dan. – Access mode: <https://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/serie/index.pl?id=247> (date of access: 01/30/2025).
16. V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), pp. 1-5, 2024. Электрон. дан. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10741050> (дата обращения: 30.01.2025).
17. V. A. Kokovin, A. N. Sytin and V. V. Skvortsov, "Hardware Cybersecurity on the FPGA Platform During Network Interaction of Distributed Industrial Equipment", 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), pp. 568-573, 2024. Электрон. дан. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10515711> (дата обращения: 30.01.2025).

**Evsikov Aleksandr Aleksandrovich**  
Protvino branch Dubna State University, candidate of technical sciences, Associate Professor Director of Protvino branch, 142281 Protvino, Moscow region, Severny proezd, 9 Telefon: 8-(4967)-31-01-91 E-mail: eaa@uni-protvino.ru

**Kokovin Valery Arkadievich**  
Protvinobranch Dubna State University, candidate of technical sciences, Associate Professor Head of Laboratory 142281 Protvino, Moscow region, Severny proezd, 9 Telefon: 8-(4967)-31-01-91 E-mail: kokovin@uni-protvino.ru

**Leonov Anatoli Petrovich**  
Protvino branch Dubna State University, Protvino, candidate of technical sciences, Associate Professor Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes and Production 142281 Protvino, Moscow region, Severny proezd, 9 Telefon: 8-(4967)-31-01-91 E-mail: anatoli.leonov@gmail.com

# **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 629.7.05

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-109-121

БУЛАТНИКОВ Д.В., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., МИШИН В.В.

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К БОРТОВОМУ НАПРЯЖЕНИЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Аннотация:** Рассмотрены современные тенденции построения систем электроснабжения летательных аппаратов гражданского назначения и их особенности. Проведен анализ ГОСТ Р 54073-2017 и Международных квалификационных требований КТ-160G, по результатам которого выявлены качественные несоответствия требований к некоторым параметрам бортовой аппаратуры и методов контроля, что является важным аспектом, влияющим на качество процессов проектирования воздушных судов, их жизненный цикл и может сказаться на надежности летательного аппарата и безопасности полета воздушного судна.

**Ключевые слова:** бортовое оборудование, безопасность полетов, эксплуатация воздушных судов, системы электроснабжения, переходные процессы, бортовое напряжение, постоянный ток, гражданская авиация, режимы работы СЭС, классификация СЭС.

### **Введение**

Идея применения электроснабжения на летательных аппаратах (ЛА) была предложена русским ученым А.И. Лодыгиным в 1869 году. Дальнейшее развитие авиации начало приводить к увеличению потребителей электроэнергии на борту. В 1923 году считалось стандартным бортовым напряжением 12 В, но уже к 1930 году для снижения массы кабельных сетей уровень напряжения подняли до 24 В. В 1926 году осуществился переход на генераторы от редуктора авиадвигателя, а в послевоенный период в 1954-1960 годах произошел переход на современный стандарт электропитания, который составляет три фазы переменного тока частотой 400 Гц напряжением 115 В и постоянного напряжения 27 В. Как правило, потребителями переменного напряжения 115 В являются элементы высокомощного оборудования, а вся бортовая аппаратура запитывается от постоянного напряжения 27 В. Так уже на самолете ТУ-16 мощность четырех установленных генераторов постоянного тока составила 72 кВт и напряжение питания бортового оборудования стало равным 28 В [1].

При проектировании ЛА важно соблюдать баланс между надежностью и весом устройств, это условие необходимо для обеспечения безопасного полета. Для соблюдения данного принципа авиаконструкторы начиная с XX века применяют резервирование авиационных систем методом разделения борта ЛА на левый и правый борт, в которых происходит дублирование блоков и систем, необходимых для завершения безопасного полета.

На сегодняшний день существует много типов бортовых систем электроснабжения (СЭС), их выбор при проектировании нового ЛА зависит от ряда факторов, среди которых вес ЛА, назначение, мощность двигателей и генераторов, бортовое оборудование и т.д. Под СЭС ЛА принято считать совокупность источников и преобразователей электроэнергии с регулирующей, защитной и контрольной аппаратурой вместе с системой передачи и распределения электроэнергии [2]. При этом существует ряд нормативных документов, в которых формулируются определенные нормы и правила проектирования воздушных судов, в частности требования и нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения летательных аппаратов, а также методы испытаний [3 - 7].

Целью настоящей работы является проведение анализа и определение тенденций в области проектирования современных систем распределения электропитания в гражданском сегменте авиастроения, что необходимо для выявления потенциально опасных режимов работы, которые согласно действующим нормам и правилам проектирования воздушных

судов не учитываются, но могут привести к снижению надежности систем, отвечающих за безопасное окончание полета, для разработки необходимых методов контроля, которые позволяют с помощью методик диагностики и прогностики выявлять потенциально опасные режимы работы, не описанные в современных авиационных стандартах. Также появится возможность определения блоков для систем первой категории, в которые будет необходимо внедрить реализующие методы диагностирования алгоритмы для обеспечения защиты систем энергоснабжения летательных аппаратов, что позволит повысить безопасность полетов.

### **Анализ современных систем электроснабжения летательных аппаратов гражданского назначения**

Бортовые СЭС классифицируются по ряду признаков. Для понимания дальнейшего анализа с использованием принятой терминологии рассмотрим кратко эти классификации, наиболее подробно представленные в ряде, работ, в частности в [8].

По назначению СЭС подразделяются на:

- основные источники электроэнергии (обеспечивают электропитание всех приёмников в течение всего времени полёта);

- вспомогательные (необходимы для питания ограниченного количества приёмников в наземных условиях при неработающей силовой установке, а, следовательно, и основной системе электропитания или выполняют функции аварийного электроснабжения в полете при полной или частичной потере питания от основной СЭС);

- аварийные (обеспечивают электропитание в полете ограниченного количества жизненно важных приёмников при полной потере электроснабжения от основной или вспомогательной систем);

- специальные (обеспечивают электроэнергией только один определенный объект - могут работать автономно от основной и совместно с ней).

По составу СЭС подразделяются на:

- простые (применяют только на один род тока, например, основные первичные СЭС с генераторами только постоянного тока или с генераторами только переменного тока, вторичные системы, выполненные только на переменном токе одного напряжения и частоты или выполненные только на постоянном токе одного напряжения);

- смешанные (применяют на два рода тока, например, основные первичные СЭС с генераторами постоянного тока и генераторами переменного тока постоянной или переменной частоты, смешанная первичная аварийная СЭС образованная аккумуляторной батареей, обеспечивающей электроснабжение постоянным током, и генератором переменного тока, приводимым во вращение выдвигаемой в воздушный поток турбиной).

По виду генерируемой энергии СЭС подразделяются на:

- переменного тока постоянной частоты;

- переменного тока переменной частоты;

- постоянного тока;

По уровню напряжения СЭС подразделяются на:

- постоянный ток 27В;

- переменный однофазный ток 115 В 400 ГЦ;

- переменный трехфазный ток 115 В 400 ГЦ;

- переменный трехфазный ток 36 В 400 ГЦ;

- переменный трехфазный ток повышенного напряжения 208 В 400 ГЦ.

По типу преобразования энергии СЭС подразделяются на:

- первичные (осуществляют преобразование первичной механической, химической, тепловой, гидравлической, солнечной энергии в электрическую: первичная аварийная СЭС включает в свой состав аккумуляторную батарею с соответствующей аппаратурой и сетью или генератор, приводимый во вращение ветряной турбиной, выдвигаемой в набегающий поток воздуха; первичная авиационная вспомогательная (резервная) СЭС состоит из генератора вспомогательной силовой установки (ВСУ) со своей аппаратурой и сетью);

- вторичные (преобразует электроэнергию первичной СЭС в электроэнергию другого рода тока, напряжения или частоты, применяются не только в основных, но и вспомогательных и аварийных СЭС);

- третичные (преобразует электроэнергию вторичной СЭС в электроэнергию другого рода тока).

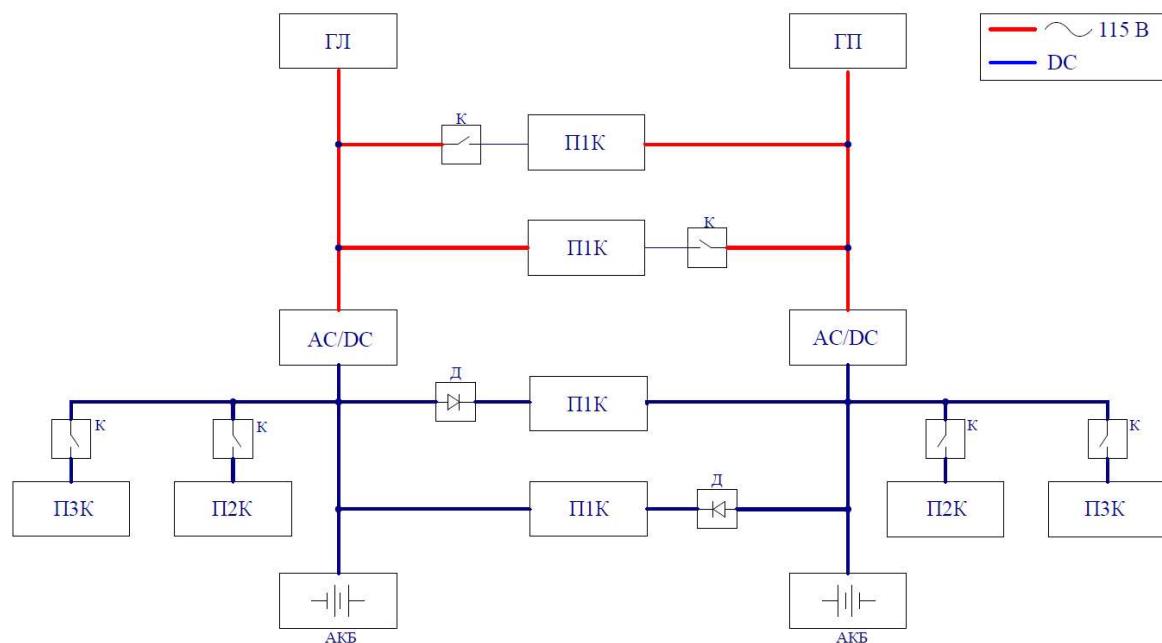
По числу проводов системы распределения энергии СЭС подразделяются на:

- однопроводные;
- двухпроводные;
- трехпроводные.

Согласно [3] оборудование или приемники электроэнергии делятся на 3 категории:

- первой категории (обеспечивающие завершение полета и безопасную посадку);
- второй категории (обеспечивающие безопасное продолжение полета и посадку);
- третьей категории (не влияют на безопасность полета).

На рисунках 1, 2 приведены типовые варианты построения структуры СЭС, применяемых в современных ЛА. Данные схемы могут изменяться в зависимости от класса ЛА. Чем тяжелее воздушное судно, тем больше оборудования необходимо для его функционирования, соответственно происходит усложнение СЭС, и некоторые узлы и системы могут быть добавлены для обеспечения надежности и достижения заданных тактико-технических характеристик воздушного судна.



**Рисунок 1- Типовая структурная схема СЭСЛА:**

ГЛ - генератор переменного тока левого борта; ГП- генератор переменного тока правого борта; К - ключ коммутационный; П1К - потребители 1 первой категории; АС/ДС - преобразователь переменного напряжения в постоянное: Д - диод; П2К - потребители второй категории; П3К - потребители третьей категории; АКБ - аккумуляторная батарея

Генераторы вспомогательной силовой установки (рисунок 2) могут быть встроены в авиационный двигатель или быть самостоятельными изделиями, в этом случае устанавливается один генератор ВСУ на борту. Аварийный генератор в таких системах проектируется как небольшой ветрогенератор, выезжающий из-под крыла или снизу фюзеляжа при наступлении аварийной ситуации. Так же можно отметить, что данная структурная схема может быть применена только на среднемагистральных и дальнемагистральных авиалайнерах, так как на самолеты данного класса почти все системы имеют резервирования. Под среднемагистральными ЛА принято считать воздушные суда, у

которых дальность полета составляет не менее 3500 км, а дальнемагистральная авиация начинается от 6000 км.

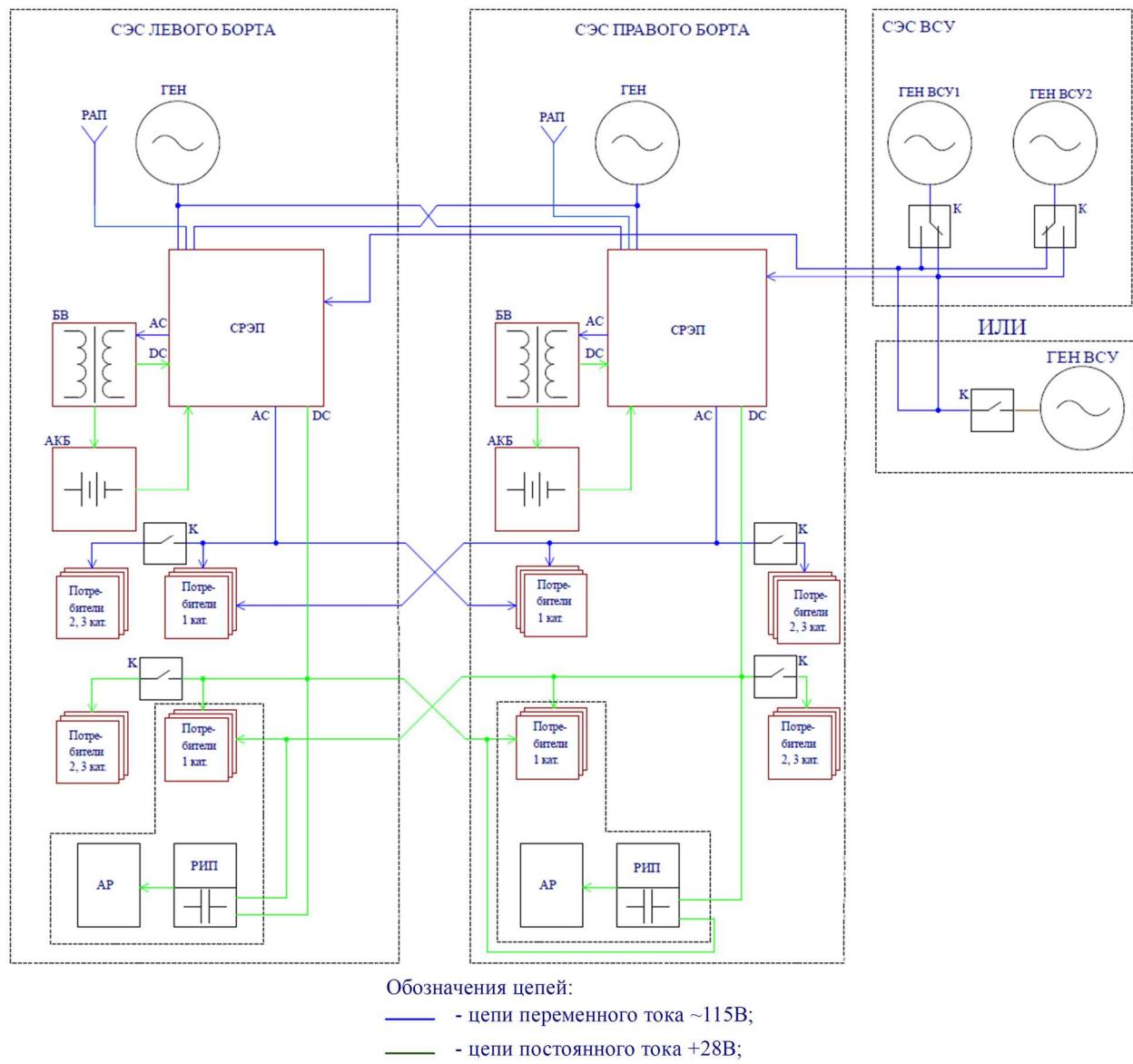


Рисунок 2 - Типовая структурная схема СЭС дальнемагистрального борта:

ГЕН - генератор переменного тока; РАП - разъем аэродромного питания;

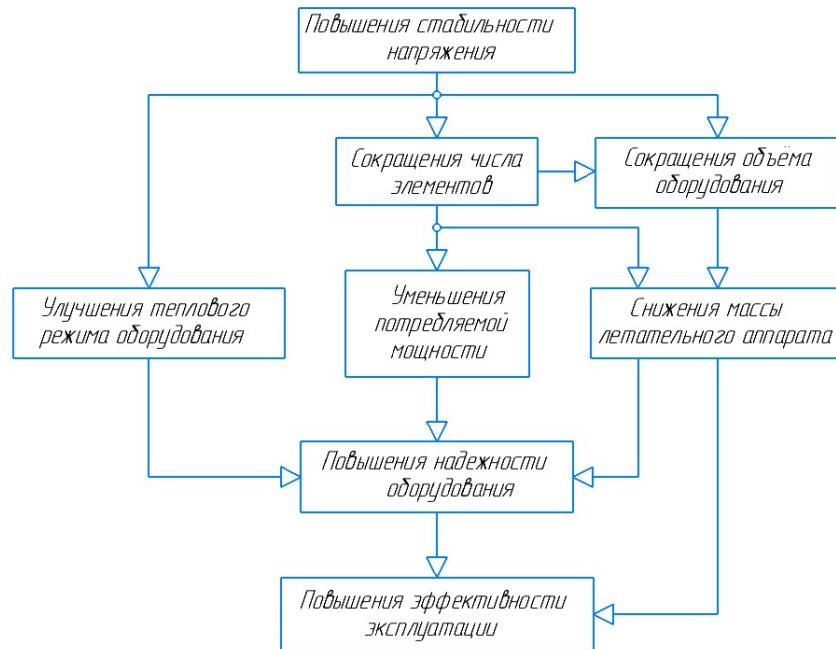
БВ - блок выпрямительный; АКБ - аккумуляторная батарея; СЭС - система электроснабжения; AC - переменный ток; DC - постоянный ток; ГЕН ВСУ - генераторы вспомогательной силовой установки; ВСУ - вспомогательная силовая установка; К - ключ силовой; СРЭП - система распределения электропитания; АР - аварийный регистратор; РИП - резервный источник питания

### Общие требования и нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения летательных аппаратов

Основным документом в Российской Федерации, который регламентирует требования к качеству бортового электропитания для современных ЛА, являются: ГОСТ Р 54073-2017 [3], где сформулированы основные требования к СЭС ЛА самолетного и вертолетного типа, а также нормы качества электроэнергии для источников вторичного электропитания, которые входят в состав бортового оборудования. Также необходимо отметить международные стандарты, которые регламентируют требования к бортовому электропитанию: Arinc-609, КТ-160G/14 разделы 16,17.

Качество бортовой электроэнергии оказывает большое влияние не только на условия функционирования всех источников вторичного электропитания радиотехнической аппаратуры, то есть на их надежность, но и на тактико-технические характеристики

воздушного судна, например, на массу объекта, что, в свою очередь, сильно влияет на экономическую эффективность ЛА (рисунок. 3)



**Рисунок 3- Влияние качества электроэнергии на тактико-технические и экономические показатели авиационного оборудования [4]**

Согласно ГОСТ Р 54073-2017 [3] существует 3 основных режима работы СЭС: нормальный, ненормальный, аварийный и специальный режим (запуск двигателя). Нормальный режим работы – это режим, при котором приемники электроэнергии всех категорий обеспечивают свою работу. Ненормальный режим работы характеризуется внезапной потерей или возникновением ошибок в управлении СЭС. Аварийный режим работы – это режим работы в полете при отказавших или отключенных первичных источниках электроэнергии, установленных на маршевых двигателях, и вспомогательной силовой установки, когда происходит переход на электропитание от аварийных источников.

Для питания приемников электроэнергии первой категории должны устанавливаться аварийные (альтернативные) источники электропитания, которые обособлены и не зависят от основной системы генерирования. Такие источники должны обеспечивать в течении всего оставшегося времени полёта электропитанием приемники первой категории [5].

При ненормальном режиме работы приемники первой и второй категории должны оставаться работоспособными. Примером этого режима являются включения и выключения приемников электроэнергии, изменения оборотов двигателя, переключения и синхронизация шин, включения генераторов на параллельную работу. Такие операции могут выполняться в любое время при подготовке ЛА к полету, при взлете, в полете, при посадке и рулежке без ограничений количества операций. При аварийной работе СЭС, должны сохранить свою работоспособность приемники только первой категории. Исключением является режим запуска двигателя или ВСУ, при котором приемники электроэнергии, предназначенные для питания блоков управления двигателем, должны оставаться работоспособными, и это является специальным видом нормальной работы СЭС.

Установившийся режим работы СЭС – это режим, при котором нормальные характеристики электроэнергии не выходят за пределы допустимых отклонений в течение произвольного периода времени. В этом режиме система СЭС, находится при постоянной нагрузке или при плавных, ступенчатых и импульсно-периодических нагрузках, амплитудное значение тока которых в импульсе составляет не более 7 % номинального амплитудного значения тока источника, в изменениях частоты вращения генераторов не более 1 % в 1 с или

в колебаниях этой частоты не более чем 0,2 % номинального значения с периодом более 0,33 с [3].

Согласно КТ-160G/14G [6] любое оборудование, имеющее модуляцию нагрузки, способствует возникновению флюктуаций напряжения постоянного тока и пульсаций. Нормальными переходными напряжениями считают отклонения напряжения от установленвшегося уровня, вызванные коммутациями нагрузки и восстанавливающими действиями регулятора при нормальном режиме работы. А циклическое отклонение напряжения постоянного тока относительно его среднего значения во время установившейся работы СЭС называется пульсациями.

На рисунках 4, 5 показаны огибающие спектров допустимых пульсаций постоянного напряжения при нормальном режиме работы СЭС первичных и вторичных приемников электропитания. В верхнем пределе пульсаций напряжения в пике при нормальных переходных процессах для первичных приемников могут достигать значения 65 В, а по нижнему пределу достигают 12 В. Для вторичных приемников значения по верхнему пределу при питании от сетей переменной частоты составляет 50 В, а для приемников, запитанных от постоянного напряжения, составляет 40 В. Аналогичным образом происходит распределение электропитания по нижнему пределу и находится в диапазоне от 12 до 18 В. В нижних пределах, разница в этих показателях составляет 4 В и лежит в диапазоне для первичных приемников от 12 до 24 В, для вторичных приемников этот показатель составляет от 10 до 18 В.

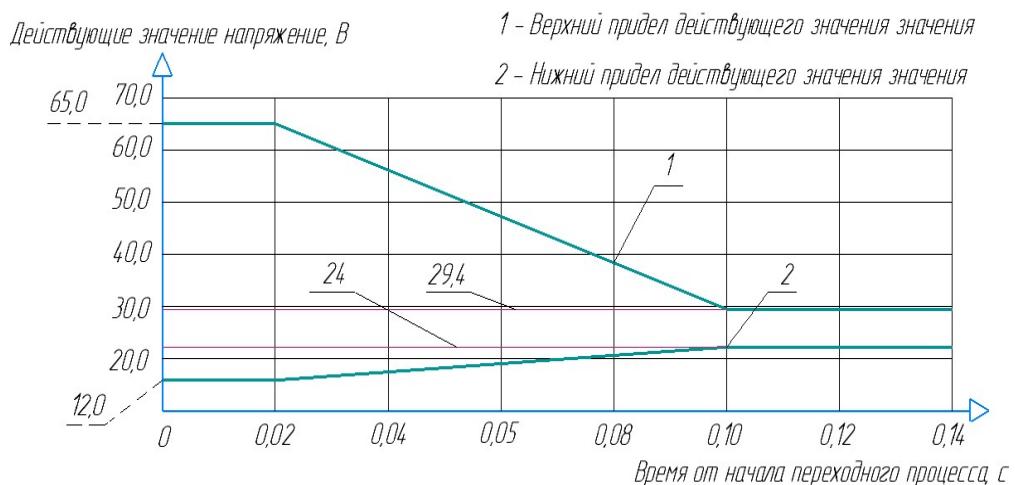


Рисунок 4- Огибающая приведённых значений нормальных переходных напряжений первичных систем постоянного тока 27 В [3]

На рисунке 6 приведены типичные формы напряжений из расшифровки осциллографической записи с борта ЛА [3]. Как видно из приведенного графика, временные характеристики и амплитуды кривых коррелируют с огибающими, приведёнными на рисунке 5. Данный характер осциллограмм, хоть и являются типичным для переходных процессов, но форма и амплитуда могут меняться в зависимости от типа ЛА, структуры СЭС, типа полезной нагрузки и т.д.

При ненормальных переходных процессах (рисунки 7, 8) требования к значениям амплитуды напряжения по верхним пределам качественно схожи с нормальными переходными процессами, при этом нижние пределы отличаются существенно, и допускаются пропадания электропитания до 10 с.

На рисунке 9 приведены допустимые спектры максимальных флюктуаций постоянного напряжения при нормальной работе СЭС. Спектр частот можно разделить на три диапазона от 10 до 200 Гц, от 200 Гц до 1 кГц и от 1 до 10 кГц, при этом, максимальная амплитуда в каждом из диапазонов будет иметь свои максимальные значения. В первом диапазоне амплитуда флюктуаций может достигать 200 мВ, во втором 560 мВ и в третьем 1,4 В.

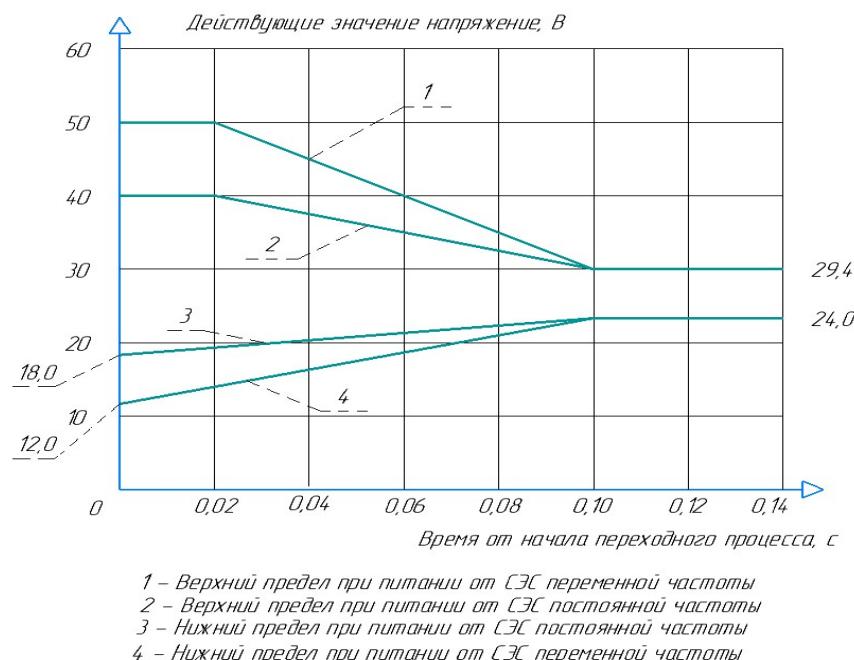


Рисунок 5- Огибающая приведённых значений нормальных переходных напряжений вторичных систем постоянного тока 27 В [3]

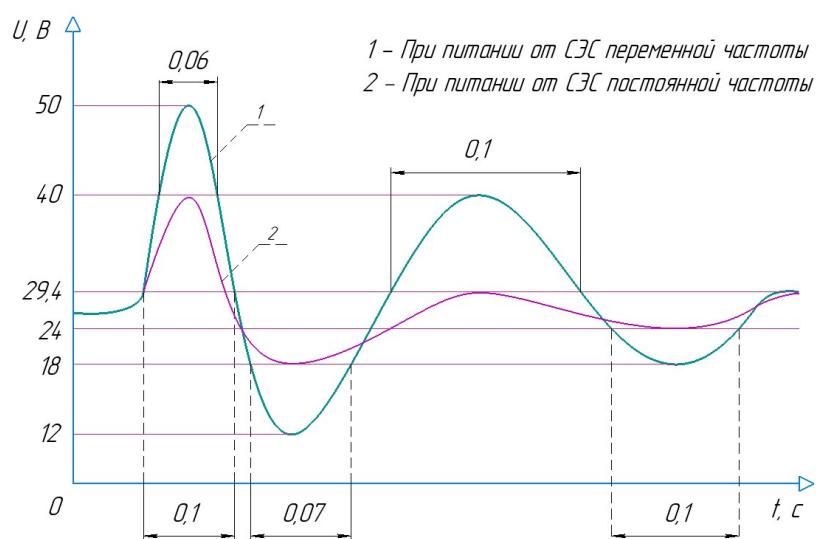


Рисунок 6 - Диаграмма изменения напряжения постоянного тока при нормальных переходных режимах питания от переменных и постоянных источников тока [3]

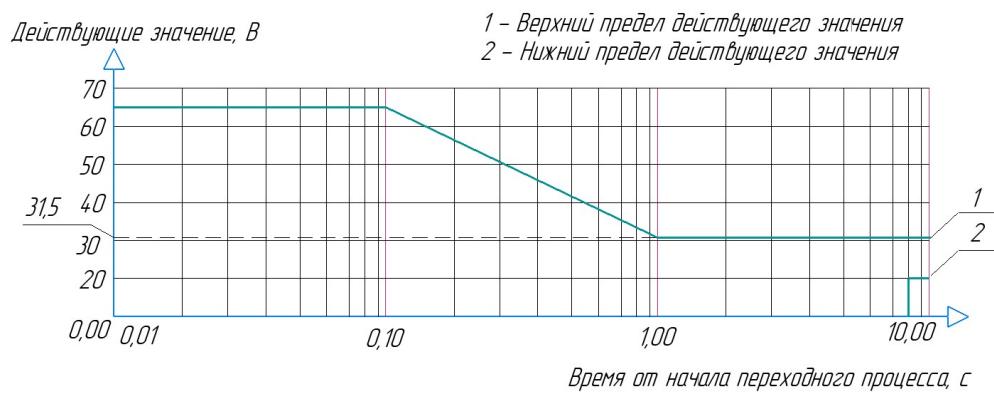
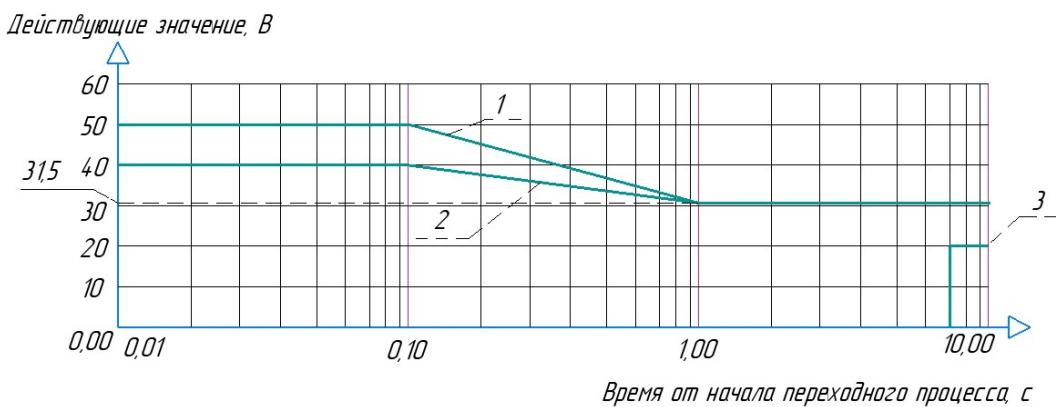


Рисунок 7 - Пределы приведенных значений ненормальных повышенных и пониженных напряжений первичных систем постоянного тока 27 В [3]



1 - Верхний предел при питании от СЭС переменной частоты  
2 - Верхний предел при питании от СЭС постоянной частоты  
3 - Нижний предел при питании от СЭС переменной и постоянной частот

Рисунок 8- Пределы приведенных значений ненормальных повышенных и пониженных напряжений вторичных систем постоянного тока 27 В [3]

Важной особенностью согласно пункту 5.2.2.1 [3] является тот факт, что данные флуктуации могут возникать только при нормальной работе СЭС. Из графика видно, что нормы ГОСТ и КТ, хоть и совпадают качественно, но имеют разную величину как напряжений, так и частот. В сети постоянного тока с напряжением 27 В удвоенная амплитуда напряжения пульсаций должна быть менее 4 В если напряжения на выходах оборудования равно или превышает 22 В. Если оно имеет меньшую величину, то напряжение пульсаций должно быть менее 2 В [6].

При работе СЭС во время размыкания цепей на контактах коммутационных аппаратов со стороны выключаемых приемников электроэнергии или приходящего по цепям электропитания приемников электроэнергии переменного и постоянного тока не должны выходить за пределы, показанные на рисунке 10, а внутреннее сопротивление приемника, генерирующего импульсы, должно быть не менее 50 Ом. При этом форма импульса, показанная на рисунке 11, является типичной, и требования к такой форме выполняются, если время нарастания импульса не превышает 2 мкс, а общая длительность импульса равна, по крайне мере, 10 мкс [6].

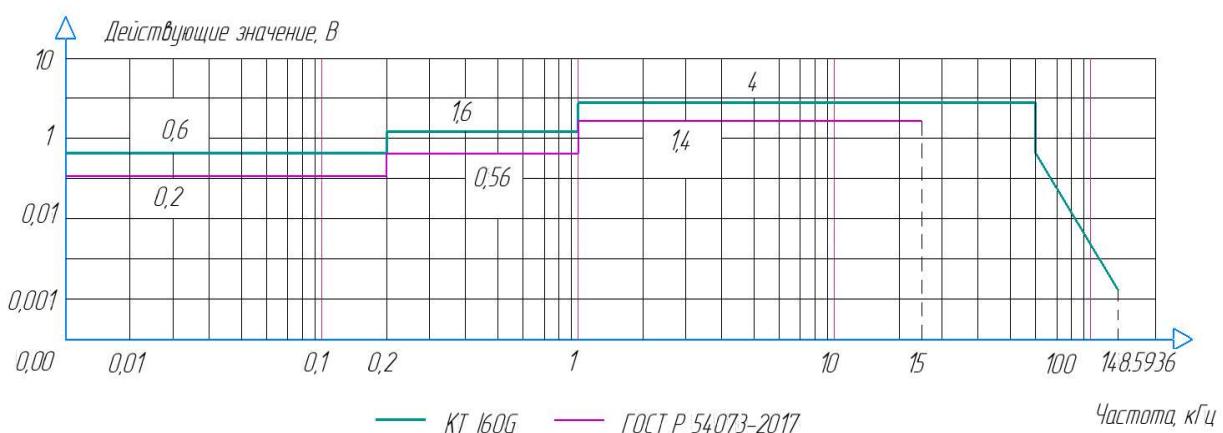


Рисунок 9 - Спектры максимальных допустимых пульсаций напряжения системы постоянного тока [3, 6]

Необходимо обратить внимание, что в 2010 г. международным авиационным стандартом Arinc 777-2 [7] было введено новое требование, согласно которому в СЭС на летательных аппаратах гражданского назначения должен появится новый блок, который обеспечивал бы питанием аварийный регистратор в течении 10 мин при наступлении аварийной ситуации и/или отключении основного электропитания на борту.

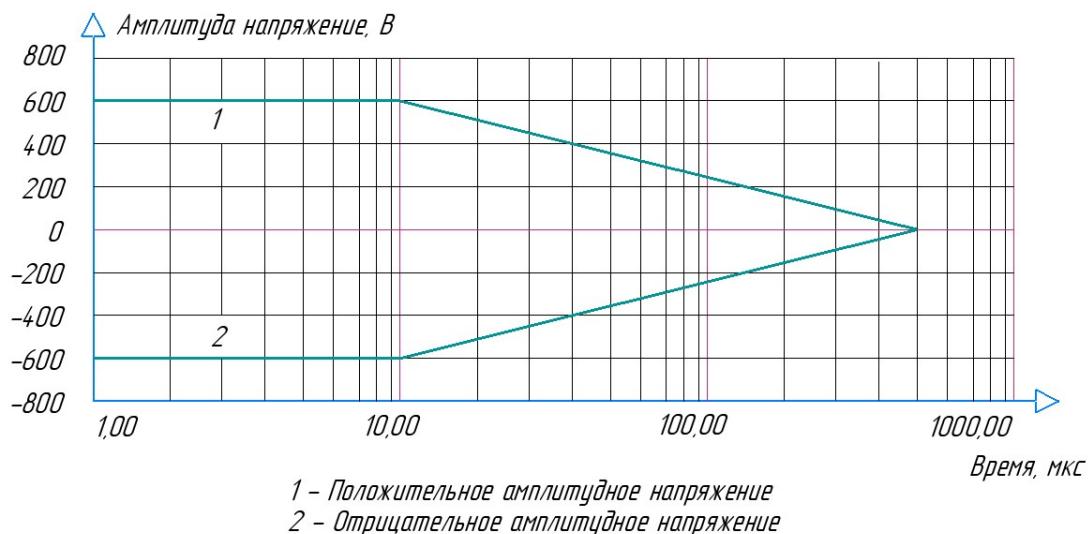


Рисунок 10 - Огибающие импульсов напряжения для приемников постоянного и переменного токов [3]

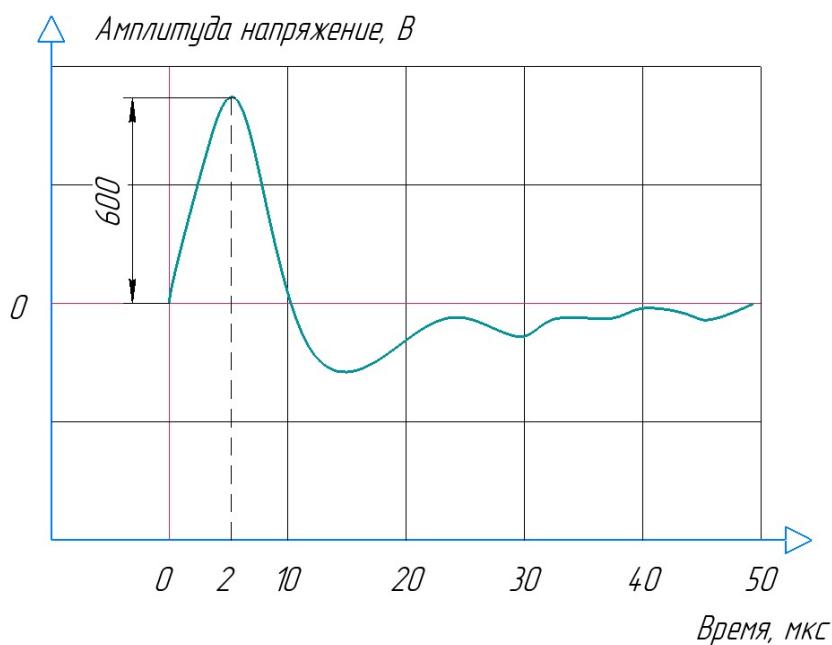


Рисунок 11 - Форма импульса напряжения для приемников постоянного и переменного токов [6]

Такой блок получил название Recorder independent power supply RIPS или РИП (резервный источник питания). Данное требование обусловлено необходимостью повышения вероятности считывания полетной информации с аварийного накопителя при возникновении нештатной ситуации для установления причин аварийных ситуаций и проведения анализа техническими службами. Это требование направлено на повышение безопасности полетов, так как позволяет при повторении подобной проблемы предпринять правильные действия.

#### Состояние и проблемы диагностирования электрооборудования летательных аппаратов

На этапе полного импортозамещения авиационного оборудования важно оперативно решать проблему достоверной оценки состояния СЭС и увеличения ресурса оборудования. Это обусловлено также требованием к повышению отказоустойчивости элементов в системах распределения электроснабжения для дальнейшей безопасной эксплуатации ВС [9]. Характерно, что, правительство Российской Федерации начиная с 2022 взяло курс на активные меры поддержки отечественной авиастроительной отрасли [10].

Анализируя зарубежный опыт диагностирования электрооборудования, можно убедится, что выявление причин неработоспособности того или иного компонента в исследуемом контуре является в некоторой мере изученной задачей. Так, например, Джексон Дж. описывает логическую процедуру поиска неисправностей аппаратуры электрообеспечения, которая включает следующие этапы: выявление признаков неисправности; оценку состояния и перечня возможных неисправных функциональных узлов; локализацию неисправного функционального узла; локализацию неисправности в схеме; анализ отказов компонентов [11]. Зарубежные производители воздушных судов, такие как Boeing и Airbus, ставят задачи разработчикам блоков и систем (Honeywell, Collins, Rockwell) обеспечить оборудование встроенными системами контроля и диагностики, которые взаимодействуют с цифровыми системами и выдают результат контроля на бортовой компьютер в режиме реального времени [12].

Отечественные авторы также отмечают важность и необходимость применения методов диагностирования в авиационном оборудовании с точки зрения сохранения должного уровня отказоустойчивости авиационной техники. Наиболее подробный анализ состояния данного вопроса представлен в работе Пвловой В.И. [13], где отмечает важность современного подхода к внедрению в разрабатываемое новое оборудование систем самоконтроля и диагностики состояния блоков для уменьшения рисков возникновения отказных состояний. Ергалиев Д.С предлагает рассматривать объекты контроля и диагностики, как элементы сложной системы с учетом их физических свойств, назначения и происходящих в них переходных процессов, а также в виде модулей, которые являются конструктивными или функциональными компонентами объекта [14, 15]. Авторы Майская Е.Р., Гончарова А.В. и Логвина А.И. основной упор делают на обоснование необходимости создания централизованной системы сбора и обработки данных для поддержания заданного уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования и приводят примеры в части влияния условий эксплуатации и методов анализа технического состояния [16, 17]. Харитонов А.С. отмечает о необходимости введения новых подходов в проектировании систем управления генераторами в части разработки систем контроля для повышения стабильности работы СЭС [8].

Не вызывает сомнения, что системы диагностики должны быть минимальным стандартом, который необходим на воздушных судах, для обеспечения повышения безопасности полетов. Следует отметить, что исследования в данном направлении зарубежными и отечественными учеными и инженерами не являются завершенными, и задача разработки методов и средств диагностирования СЭС при различных режимах работы, включая нормальный, являются весьма актуальными в настоящее время.

Необходимо учитывать также, что с развитием авиастроения происходит внедрение новых технологий, современной элементной базы радиокомпонентов, а также изменяются задачи и требования, которые отражаются в современных авиационных стандартах, соответственно могут появляться принципиально новые технические задачи, которые раньше перед разработчиками авиационной техники не стояли.

### **Заключение**

Проведенный выше анализ требований авиационных стандартов показывает, что в ГОСТ Р 54073-2017 и КТ-160G/14G существуют расхождения не только в части нормальных переходных процессов, их уровня и пределов допустимых пульсаций, а также и в значениях постоянного напряжений. Также необходимо отметить, что КТ-160G/14G не содержит методику испытания оборудования на нормальные переходные процессы с наложением на них модулированного сигнала спектра допустимых пульсаций согласно п. 16.6.1.2 ГОСТ Р 54073-2017. Данный факт свидетельствует, что при проектировании авиационных приемников электропитания для всех категорий авиационного оборудования как у отечественных, так и у зарубежных авиаконструкторов отсутствует обязательное требование к проверке на смешанные воздействия. А это означает, что на сегодняшний день не существует методов контроля или диагностики, которые позволили бы выявлять неучтенные режимы работы, которые могут потенциально приводить к снижению ресурса оборудования.

Для решения этой задачи авторы данной статьи предлагают разработать и внедрить в РИП программное обеспечение на базе алгоритма, построенного на новом методе контроля и обработки диагностической информации, с помощью которого будет производится поиск и контроль потенциально опасных флюктуации напряжения, приводящих к снижению расчетного ресурса приемников электроэнергии для бортового оборудования первой категории. Данный метод должен учитывать влияние наложения сложных форм сигналов при переходных процессах на входные цепи приемников, построенных на широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Такой подход должен будет обеспечить не допущение работы элементов на предельных расчетных значениях за счет прогностики выявления указанных выше режимов работы, что, в свою очередь, повысит ресурс преобразователей напряжения и снизит риски возникновения отказов в авиационном оборудовании, необходимом для завершения полета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин, С.В. Системы электроснабжения воздушных судов [Текст]: учебник / С.В. Мишин. – Москва : Руслайнс, 2024. – 198 с.
2. Грузков, С.А., Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов [Текст] / С.А. Грузков, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев, С.Ю. Останин, М.Ю. Румянцев, А.Н. Соломин, В.Н. Тарасов, П.А. Тыричев. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 568с.
3. ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии [Текст].– М.: Стандартинформ, 2018. – с.39.
4. Системы электроснабжения летательных аппаратов [Текст] / Под редакцией Халютина С.П. М.: Издание ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010. – 69 с.
5. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летательной годности самолетов транспортной категории. – СПб.: ООО «СЗ РЦАИ», 2018г. – 304 с.
6. Квалификационные требования КТ-160G/14G. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Раздел 16 входное электропитание. [Текст] / Подготовлен: РГ-ВВФ, М.: НИИАО, 2015– 328 с.
7. Arinc characteristic 777-2. Recorder independent power supply (RIPS). Published: October 11, [Электронный ресурс] 2010.– с.54 – URL: [https://www.yumpu.com/en/document/read/31411056/rips-recorder-independent-power-supply-arinc-configuration\\_](https://www.yumpu.com/en/document/read/31411056/rips-recorder-independent-power-supply-arinc-configuration_)
8. Харитонов А.С. Анализ системы электроснабжения постоянного тока летательных аппаратов [Текст]. / А.С. Харитонов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021.– С. 56-57.
9. Васенин, А.Б. Особенности применения методов мониторинга электрооборудования энергетических объектов [Текст] / А.Б. Васенин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – М.: ООО «Издательский дом «АВИТ-ТЭК», 2018.- № 8(109). – С. 12-19.
10. Распоряжение правительства РФ от 25 июня 2022 года N 1693-р. [Электронный ресурс], 2022 – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206270017>.
11. Джейкокс, Дж. Руководство по поиску неисправностей в электронной аппаратуре [Текст] / Дж. Джейкокс. Перевод с английского – М.: Мир. 1989.– 176 с.
12. Avionics Technology: Diagnostic Tools for Next Generation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.aviationpros.com /toolsequipment/inspection-testing/article/10357826/avionics-technology-diagnostic-toolsfor-the-next-generation>.
13. Павлова, В.И. Метод диагностирования технического состояния входных цепей питания потребителей электроэнергии в интеллектуальных системах электроснабжения воздушных судов на основе цифровых двойников [Текст]. / В.И. Павлова //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГТУ ГА., 2023 – 18с.
14. Ергалиев, Д.С. Аналитические основы контроля диагностирования систем воздушных судов гражданской авиации [Текст]. / Д.С. Ергалиев // Сборник научных трудов Международного симпозиума «Надежность и качество», 1 том. – Пенза: ИПО ПГУ, 2008. – С. 444-446.
15. Ергалиев, Д.С Интеллектуальные системы оценки состояния бортовых компонентов летательных аппаратов [Текст] /Д.С. Ергалиев, А.Н. Коптев, К.Ж. Саханов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий №1. М.: МИЭМ, 2010.– С. 231-234.
16. Логвин, А.И. Поддержание заданного уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования [Текст]. / А.И. Логвин, А.В. Гончаров // Научный вестник МГТУ ГА, №189. М.: Московский государственный технический университет ГА, 2012. – С. 48-50.
17. Майская, Е.Р. Мониторинг текущего уровня эксплуатационной надежности авиационного электрооборудования [Текст] / Е.Р. Майская, А.В. Гончаров // Научный вестник МГТУ ГА, № 185. М.: Московский государственный технический университет ГА, 2012. – С. 48-55.

**Булатников Денис Владимирович**  
АО «Авиавтоматика» им. В.В. Тарасова»  
Главный конструктор по  
силовой электронике и СЭС  
305040, г. Курск, ул. Запольная, д. 47.  
Email: BulatnikovD@aviaavtomatika.ru

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
доктор технических наук, профессор,  
директор института приборостроения, автоматизации  
и информационных технологий  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Мишин Владислав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электроники, радиотехники  
и систем связи  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 40.

---

BULATNIKOV D.V., PODMASTERYEV K.V., MISHIN V.V.

## ANALYSIS OF MODERN POWER SUPPLY SYSTEMS AND BASIC REQUIREMENTS TO ON-BOARD DC VOLTAGE FOR CIVIL AIRCRAFT

**Abstract:** The article considers modern trends in the construction of power supply systems for civil aircraft and their features. An analysis of GOST R 54073-2017 and International Qualification Requirements KT-160G was conducted, which revealed qualitative discrepancies in the requirements for some parameters of on-board equipment and control methods, which is an important aspect affecting the quality of aircraft design processes, their life cycle and may affect the reliability of the aircraft and the safety of the aircraft flight.

**Keywords:** on-board equipment, flight safety, aircraft operation, power supply systems, transient processes, on-board voltage, direct current, civil aviation, power supply systems operating modes, power supply systems classification.

### BIBLIOGRAPHY

1. Mishin, S.V. Sistemy elektrosnabzheniya vozдушных судов [Tekst]: учебник / S.V. Mishin. – M.: Rusajns, 2024. – 195 s.
2. Gruzkov, S.A., Elektrooborudovanie letatelnyh apparatov. T. 1. Sistemy elektrosnabzheniya letatelnyh apparatov [Tekst] / S.A. Gruzkov, V.A. Morozov, V.I. Nagajcev, S.YU. Ostanin, M.YU. Rumyancev, A.N. Solomin, V.N. Tarasov, P.A. Tyrichev. – M.: Izdatelstvo MEI, 2005. – 568 s.
3. GOST R 54073-2017. Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii [Tekst]. – M.: Standartinform, 2018. – s.39.
4. Sistemy elektrosnabzheniya letatelnyh apparatov [Tekst] / Pod redakcijej Halyutina S.P. M.: Izdanie VUNC VVS «VVVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i YU.A. Gagarina», 2010. – 69 s.
5. Aviacionnye pravila. CHast 25. Normy letatelnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii. – SPb.: OOO «SZ RCAI», 2018g. – 304 s.
6. Kvalifikacionnye trebovaniya KT-160G/14G. Usloviya ekspluatacii i okruzhayushchej sredy dlya bortovogo aviacionnogo oborudovaniya. Razdel 16 vhodnoe elektropitanie. [Tekst] / Podgotovlen: RG-VVF, M.: NIIAO, 2015–328 s.
7. Arinc characteristic 777-2. Recorder independent power supply (RIPS). Published: October 11, [Elektronnyj resurs] 2010.– s.54 – URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/31411056/rips-recorder-independent-power-supply-arinc-configuration>.
8. Haritonov A.S. Analiz sistemy elektrosnabzheniya postoyannogo toka letatelnyh apparatov [Tekst]. / A.S. Haritonov // Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021.– S. 56-57.
9. Vasenin, A.B. Osobennosti primeneniya metodov monitoringa elektrooborudovaniya energeticheskikh ob"ektov [Tekst] / A.B. Vasenin // Avtomatizaciya i IT v energetike. – M.: OOO «Izdatelskij dom «AVIT-TEK», 2018.- № 8(109). – S. 12-19.
10. Rasporyazhenie pravitelstva RF ot 25 iyunya 2022 goda N 1693-r. [Elektronnyj resurs], 2022 – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206270017>.
11. Dzhejkoks, Dzh. Rukovodstvo po poisku neispravnostej v elektronnoj apparature [Tekst] / Dzh. Dzhejkos. Perevod s anglijskogo – M.: Mir. 1989.– 176 s.
12. Avionics Technology: Diagnostic Tools for Next Generation. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: <https://www.aviationpros.com/toolsequipment/inspection-testing/article/10357826/avionics-technology-diagnostic-tools-for-the-next-generation>.

13. Pavlova, V.I. Metod diagnostirovaniya tekhnicheskogo stoyaniya vhodnyh cerej pitaniya potrebitelej elektroenergii v intellektualnyh sistemah elektrosnabzheniya vozдушnyh sudov na osnove cifrovyh dvojnikov [Tekst]. / V.I. Pavlova // Avtoreferat dissertation na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – M.: MGTU GA, 2023 – 18s.

14. Ergaliev, D.S. Analiticheskie osnovy kontrolya diagnostirovaniya sistem vozдушnyh sudov grazhdanskoy aviacii [Tekst]. / D.S. Ergaliev // Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo», 1 tom. – Penza: IPO PGU, 2008. – S. 444-446.

15. Ergaliev, D.S. Intellektualnye sistemy ocenki sostoyaniya bortovyh komponentov letatelnyh apparatov [Tekst] / D.S. Ergaliev, A.N. Koptev, K.ZH. Sahanov // Innovacii na osnove informacionnyh i kommunikacionnyh tekhnologij №1. M.: MIEM, 2010. – S. 231-234.

16. Logvin, A.I. Podderzhanie zadannogo urovnya ekspluatacionnoj nadezhnosti aviacionnogo elektrooborudovaniya [Tekst]. / A.I. Logvin, A.V. Goncharov // Nauchnyj vestnik MGTU GA, №189. M.: Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet GA, 2012 – S. 48-50.

17. Majskaya, E.R. Monitoring tekushchego urovnya ekspluatacionnoj nadezhnosti aviacionnogo elektrooborudovaniya [Tekst] / E.R. Majskaya, A.V. Goncharov // Nauchnyj vestnik MGTU GA, № 185. M.: Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet GA, 2012 – S. 48-55.

**Bulatnikov Denis Vladimirovich**

Joint stock company “Aviaavtomatika” named after V. Tarasov”,  
Chief designer for power electronics and power  
305040, Kursk, Zapolnaya str., 47.  
Email: BulatnikovD@aviaavtomatika.ru

**Podmasteryev Konstantin Valentinovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev», Doctor of Technical Sciences, Professor, director of the Institute of Instrument Engineering, Automation and Information Technologies  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of Department of Electronics, Radio Engineering and Communication Systems  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 40

© Булатников Д.В., Подмастерьев К.В., Мишин В.В., 2025

КОТОВ Г.А., ВЕСЕЛОВ О.В.

## КОНТРОЛЬ ФАЗ ДВИЖЕНИЯ СТОПЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

**Аннотация.** В статье рассматривается контрольно-измерительная система экзоскелета нижних конечностей для осуществления контроля над точками контакта с опорной поверхностью. Целью работы является исследование поведения реакции опоры при ходьбе человека и вывод полезного сигнала на управление приводами экзоскелета нижних конечностей.

Предложена и охарактеризована конструкция интеллектуальной системы управления активного экзоскелета нижних конечностей. В современных реалиях данная концепция позволяет в комбинации с гироскопом и акселерометром создать единую систему стабилизации при движении человека по любой поверхности.

**Ключевые слова:** экзоскелет нижних конечностей, привод, система управления, диагностирование, тензодатчики.

### Введение

Современный мир диктует свои тренды в развитии человечества. Одно из перспективных направлений является исследования экзоскелетов и их интеграция в жизнь человека.

Доказано, что экзоскелеты не только снижают расход энергии при локомоции человека, но и при отдельных случаях повышают силовые качества и выносливость.

Многие научные коллективы занимаются вопросом разработки активных экзоскелетов. Но до сих пор не существует внедренных и удачных активных или полуактивных экзоскелетов, прошедших все виды испытаний. Одной из основных причин этого, является сложность управления и сохранение безопасности человека в конструкции экзоскелета [1-3].

### Основная часть

Активные экзоскелеты можно подразделить по типу локализации на экзоскелеты верхних конечностей и нижних конечностей.

В дальнейшем рассматривается конструкция и методы управления для экзоскелета нижних конечностей.

Основной задачей экзоскелета нижних конечностей является синхронное повторение закономерностей движения человека, при этом движение должно быть максимально комфортным. При этом наиболее часто повторимой локомоцией является шаг.

Реализация шага требует сложной системы управления, при которых шарнирные узлы выполняют переменные движения. В связи с этим к исполняющим механизмам предъявляются особые требования по обеспечению устойчивости, скорости, плавности движений, развиваемым моментам и безопасности. Такие требования позволяет выдержать интеллектуальную систему управления, при помощи которой появляется возможность внедрения в процесс обработки сигналов нечеткой логики и элементов искусственного интеллекта с целью сокращения процесса вычислений и загрузки центрального процессорного устройства.

При выполнении шага происходит циклическая попеременная смена опорной ноги. Рассматривая нормальные условия без патологических изменений при опорной ноге основной контакт с опорой происходит в пятонной и носочной зоне стопы (рисунок 1). По нормативным данным шаг начинается с контакта пятонной части и в дальнейшем происходит перекат с пятонной на носочную часть [4-6].

Сила, действующая на опору при ходьбе человека, можно выразить следующим образом:

$$F = m * (g \pm a)$$

где  $F$  – сила, действующая на опору;

$g$  – ускорение свободного падения;

$a$  – собственное ускорение человека, как правило одностороннее или противоположное  $g$ .

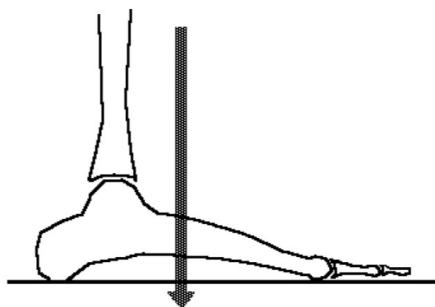


Рисунок 1 – Проекция контактной поверхности ноги

В таком случае при проектировании системы управления экзоскелетом необходимо реализовать контрольно-измерительную систему определения наличия опоры под стопой человека. В последующем измеренный сигнал после обработки направить на мехатронные модули конечностей экзоскелета в виде управляющего импульса.

Известно, что для исследования реакции опоры используются различные датчики, которые можно разделить на неэлектрические (пневмодатчики, механические, оптические) и электрические (угольные, конденсаторные, пьезоэлектрические, тензоэлектрические). В электромеханических системах в качестве измерительных приборов известно использование тензоэлектрических датчиков [7-10].

Предлагается использовать в качестве системы управления следующую модель, где в качестве чувствительных элементов выступают тензоэлектрические датчики (рисунок 2).

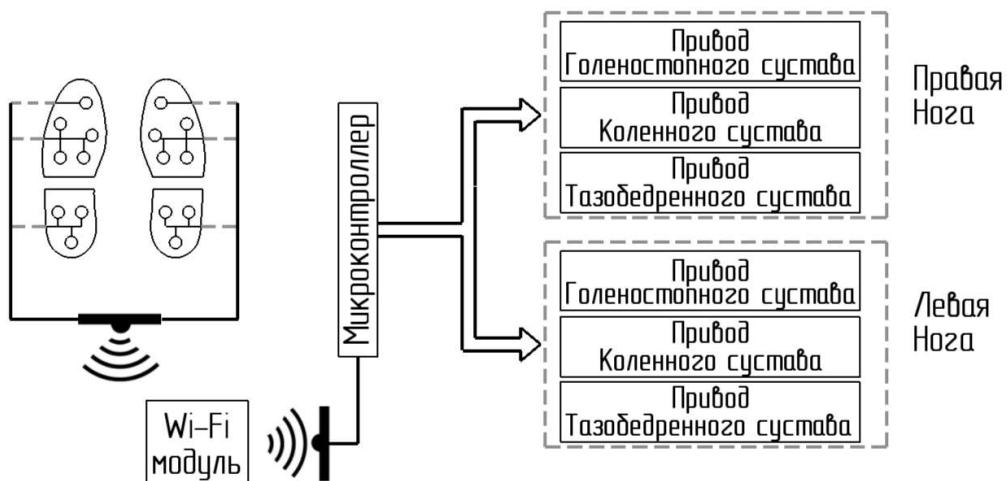


Рисунок 2 – Модель управления нижними конечностями экзоскелета

Модель относится к системе внешнего контроля траектории движения нижней конечности экзоскелета, основанной на распознавании положения ног, которая включает в себя модуль сбора информации и встроенный модуль управления.

Привод суставов экзоскелета представляет собой моментный двигатель с обратной связью по углу и скорости вращения.

В качестве датчиков применимы тонкопленочные тензорезисторы типа fsr402 в местах наибольшего контакта с поверхностью. Выбор пленочных датчиков обусловлен удобством средств регистрации сигналов и возможностью внедрения в стельку ботинка. Тонкопленочный тензорезистор преобразует собранный сигнал напряжения в цифровую величину и передает его в микроконтроллерное устройство для дальнейшего распознавание положения ног.

Связь модуля сбора информации с модулем управления осуществляется по протоколу TSP/IP через Wi-Fi устройство.

#### Результаты исследования

В ходе исследования были изучены точки опорных поверхностей при движении конечностей человека. За основу взяты данные среднестатистического мужчины массой 83 кг.

В ходе различных комбинаций расположения датчиков выявлены наиболее информативные точки расположения пленочных датчиков (рисунок 3).

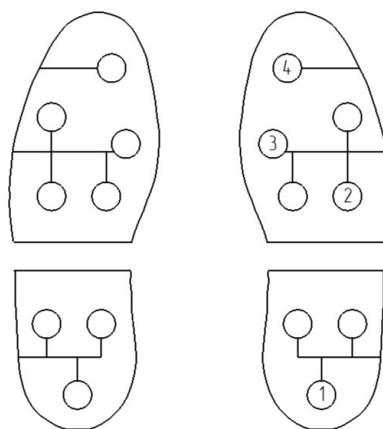


Рисунок 3 – Расположение датчиков на стопе

В разрезе конструкция представляет собой подошву в виде «пирога», в который входят пленочные тензорезисторы, установленные на подложке и отделенные воздушным зазором на высоту  $h$  от материала стельки и проставочной прокладки (рисунок 4). Регулируя воздушный зазор возможно регулировать чувствительность определения полезного сигнала для управления.

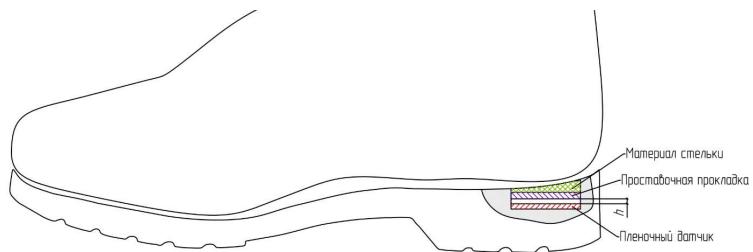


Рисунок 4 – Вид сбоку модуля сбора информации

В качестве материала стельки используется полиуретановый листовой материал твёрдостью = 94-98 ШорА; плотностью: 1.14 г/куб.см; условное напряжение при 100% удлинении: 10 Мпа; прочность при растяжении: 38 Мпа; относительное удлинение при разрыве: 380%.

Проставочной прокладкой служит резиновый материал толщиной от 1-2 мм.

Определены зависимости силы от времени при перекате стопы от пяткиной части к носочной во время ходьбы по твердой, горизонтальной поверхности (рисунок 5). Полученные данные позволяют использовать сигналы в алгоритме управления экзоскелетом нижних конечностей.

Записанный сигнал во многом свидетельствует схожему характеру изменения опорной реакции во время ходьбы (по Н.Д. Eberhart, V. Inman, 1951; Н.Д. Eberhartetal, 1954). Первый максимум имеет место в начале периода одиночной опоры на интервале 10-14% цикла шага. Последующий максимум соответствует концу одиночной опоры и переходу в двойную опору. При этом стопа имеет контакт только в носочной части и сгибание голеностопного сустава в этот момент времени является максимальным. Минимум вертикальной составляющей реакции опоры («абсолютный минимум» по Н.А. Бернштейну) имеет место в период одиночной опоры точно между фазами подъема и падения, что соответствует 27-30% ЦШ.

### Заключение

Таким образом, на основе полученных данных в ходе исследования предложен метод контроля фаз шага человека с целью управления приводами экзоскелета нижних конечностей. Определены подходящие точки расположения пленочных датчиков в конструкции ботинка.

Предложена концепция реализации закрепления пленочных датчиков в виде послойного набора различных упругих материалов.

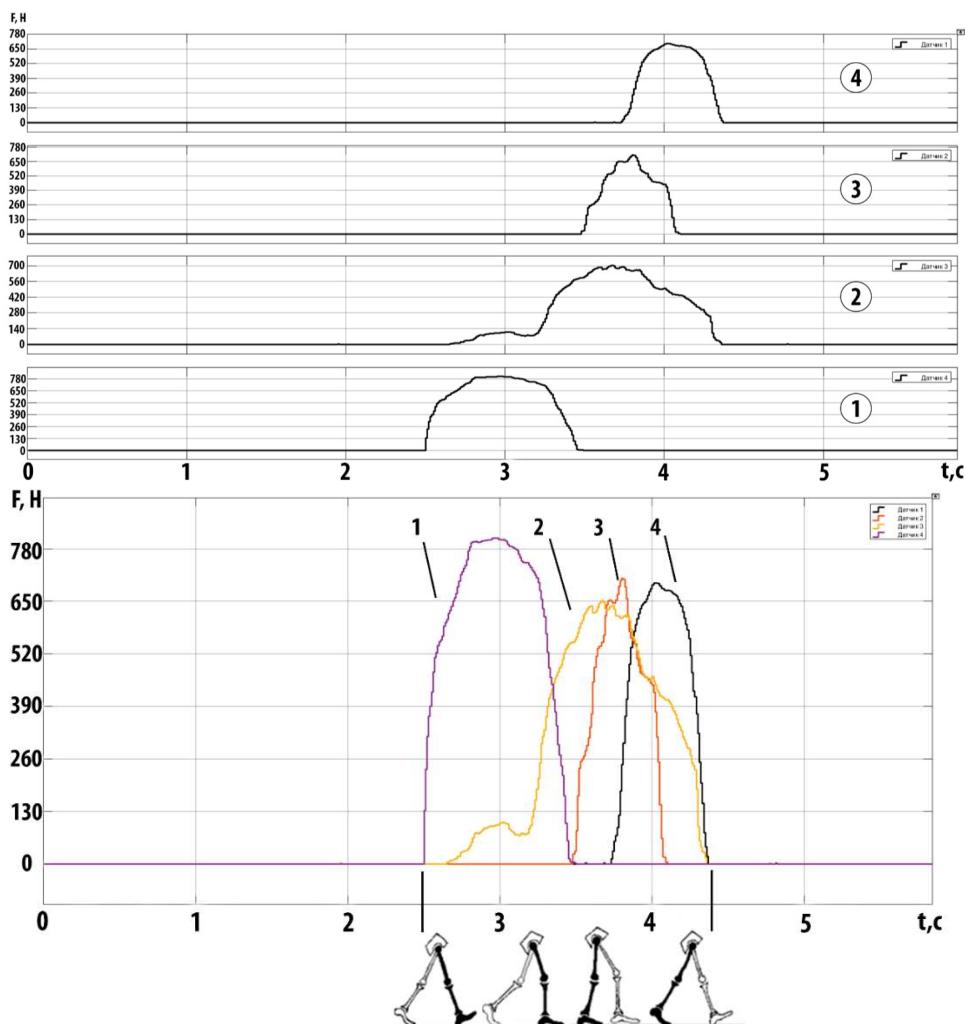


Рисунок 5 – Запись сигналов с датчиков:

1 – сигнал с датчика «1» под пяткочной костью; 2 – сигнал с датчика «2» под плюсневой кости; 3 – сигнал с датчика «3» под плюсне-фаланговым суставом; 4 – сигнал с датчика «4» под фалангой пальца

На основе полученных зависимостей появляется возможность разработки алгоритмов управления приводами при различных условиях проявления опоры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутор Л.В. Применение экзоскелетов в складской логистике / Л.В. Бутор, Б.О. Ковалев // Организатор производства. 2023. – Т.31. – №3. – С.29-38.
2. Воробьев А.А. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) / А.А. Воробьев, А.В. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоноожкина, А.М. Поздняков // Современные технологии в медицине. 2015. – Т.7. – №2. – С. 185-197.
3. Щербина К.К., Головин М.А., Золотухина М.В. Исследование направления развития экзоскелетов опорно-двигательного аппарата // Физическая и реабилитационная медицина. 2019. – №4. – С. 6-14.
4. Лавровский Э.К. О задаче организации ходьбы экзоскелетона нижних конечностей при помощи управления в коленных шарнирах / Э.К. Лавровский, Е.В. Письменная, П.А. Комаров // Российский журнал биомеханики. 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 158–176.
5. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки: Издательство НПЦ - “Стимул”, Иваново, 1996. – 344 с.
6. Дубровский В.И., Федорова В.Н. Биомеханика: Учеб. для сред, и высш. учеб, заведений. — М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. — 672 с.
7. Котов Е.А., Друк А.Д. Клыпин Д.Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. – № 4. – С. 91-97.
8. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. Алгоритмы управления экзоскелетоном нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 1. – С. 44–51.

9. Блинов А.О. Моделирование движения активного экзоскелета с пятью управляемыми электроприводами звенями / А.О. Блинов, А.В. Борисов, Л.В. Кончина, М.Г. Куликова, К.С. Маслова // Российский журнал биомеханики. 2023. – № 4. – С. 186-199.

10. Exoskeletons for Industrial Application and Their Potential Effects on Physical Work Load / M. P. De Looze, T. Bosch, F. Krause [et al.] // Ergonomics. — 2015. — Vol. 59. — P. 671–681.

**Котов Георгий Александрович**

ФГБОУ ВО «ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»  
Аспирант кафедры «Автоматизация, мехатроника и  
робототехника»  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: kotov1999gosha@mail.ru

**Веселов Олег Вениаминович**

ФГБОУ ВО «ВлГУ имени А.Г. и Н.Г.  
Столетовых»  
Профессор кафедры «Автоматизация,  
мехатроника и робототехника»  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: 010848\_j@mail.ru

VESELOV O.V., KOTOV G.A.

## A METHOD FOR DIAGNOSING HUMAN GAIT IN AN EXOSKELETON OF THE LOWER EXTREMITIES

**Abstract.** The article discusses the control and measuring system of the exoskeleton of the lower extremities to control the points of contact with the support surface. The aim of the work is to study the behavior of the support reaction when walking a person and to output a useful signal to control the drives of the exoskeleton of the lower extremities.

The design of an intelligent control system for an active exoskeleton of the lower extremities is proposed and characterized. In modern realities, this concept allows, in combination with a gyroscope and an accelerometer, to create a single stabilization system for human movement on any surface.

**Keywords:** lower limb exoskeleton, drive, control system, diagnostics, load cells.

## BIBLIOGRAPHY

1. Butor L.V. The use of exoskeletons in warehouse logistics / L.V. Butor, B.O. Kovalev // Production organizer. 2023. Vol.31. No. 3. pp.29-38.
2. Vorobyov A.A. Exoskeleton as a new tool in habilitation and rehabilitation of the disabled (review) / A.A. Vorobyov, A.V. Petrukhin, O.A. Zasypkina, P.S. Krivonozhkina, A.M. Pozdnyakov // Modern technologies in medicine. 2015. Vol. 7. No. 2. pp. 185-197.
3. Shcherbina K.K., Golovin M.A., Zolotukhina M.V. Research into the development of exoskeletons of the musculoskeletal system // Physical and rehabilitation medicine. 2019. No. 4. pp. 6-14.
4. Lavrovsky E.K. On the task of organizing the walking of the exoskeleton of the lower extremities using knee joint control / E.K. Lavrovsky, E.V. Pisennaya, P.A. Komarov // Russian Journal of Biomechanics. 2015. Vol. 19. No. 2. pp. 158-176.
5. Skvortsov D.V. Clinical analysis of movements. Gait analysis: NPC - Stimul Publishing House, Ivanovo, 1996. 344 p.
6. Dubrovsky V.I., Fedorova V.N. Biomechanics: Textbook for secondary and higher education. educational institutions. — M.: Publishing house VLADOS-PRESS, 2003. — 672 p.
7. Kotov E.A., Druk A.D. Klypin D.N. Development of an exoskeleton of human lower extremities for medical rehabilitation // Omsk Scientific Bulletin. 2021. No. 4. pp. 91-97.
8. Lavrovsky E.K., Pisennaya E.V. Algorithms for controlling the exoskeleton of the lower extremities in the single-support walking mode on flat and stepped surfaces. // Mechatronics, automation, control. – 2014. – № 1. – С. 44–51.
9. Blinov A.O. Modeling the movement of an active exoskeleton with five electrically operated links / A.O. Blinov, A.V. Borisov, L.V. Konchina, M.G. Kulikova, K.S. Maslova // Russian Journal of Biomechanics. 2023. – № 4. – pp. 186-199.
10. Exoskeletons for Industrial Application and Their Potential Effects on Physical Work Load / M. P. De Looze, T. Bosch, F. Krause [et al.] // Ergonomics. — 2015. — Vol. 59. — P. 671–681.

**Kotov Georgy Alexandrovich**

Vladimir State University,  
Postgraduate student of the Department of Automation,  
Mechatronics and Robotics  
600000, Vladimir, Gorky Street, 87  
E-mail: kotov1999gosha@mail.ru

**Veselov Oleg Veniaminovich**

Vladimir State University,  
Professor of the Department of Automation,  
Mechatronics and Robotics,  
600000, Vladimir, Gorky Street, 87  
E-mail: 010848\_j@mail.ru

© Котов Г.А., Веселов О.В., 2025

ГРИГОРЬЯН Л.Р., БОГАТОВ Н.М., ГРИГОРЬЯН Р.Л., САХНО М.А.

## СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМОТЕХНИКИ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

**Аннотация.** В работе рассмотрены методы повышения точности фазоизмерительной аппаратуры, как в низкочастотном, так и высокочастотном диапазонах измерения фазовых параметров исследуемых сигналов. В диапазоне частот до 1 МГц, в котором доминирует амплитудно-фазовая погрешность, наиболее эффективные решения ее уменьшения заключаются в применении управляемых резисторов, реализованных с использованием цифровых потенциометров и кварцевой линии задержки с известным значением  $\tau_0$  и микропроцессорным управлением. В высокочастотном диапазоне частот до 40 МГц наиболее эффективно применение двухканального гетеродинного преобразования частот, для сигналов выше 40 МГц целесообразно применение одноканальной схемы преобразования с коммутационным преобразованием входных исследуемых сигналов, что позволяет исключить межканальные связи через общий гетеродин.

**Ключевые слова:** измерение, фазовые методы, частота, погрешность, помехоустойчивость.

### Введение

Одним из направлений развития средств измерения, где востребованы предельные значения метрологических их характеристик, является фазоизмерительная техника. Данное обстоятельство обусловлено уникальными свойствами фазовых измерений, использование которых в различных физико-технических приложениях наиболее предпочтительно [1-8]. Относительные точностные параметры в практике фазовых измерений различают погрешности при равных и неравных уровнях исследуемых сигналов.

Рассмотрим далее структурные методы коррекции данных погрешностей. Анализ целесообразно начать с наиболее максимальной погрешности – амплитудно-фазовой, возникающей при неравенстве уровней исследуемых входных сигналов.

Следовательно, общее направление решения этой проблемы заключается в разработке способов выравнивания уровней входных сигналов.

### Основная часть

1. Один из способов решения этой задачи был предложен в работе [9] и заключался в применении управляемых резисторов для выравнивания выходных сопротивлений обоих каналов фазометра. Однако в этой работе было намечено только направление решения этой задачи, и только с развитием электронной базы стало возможным корректное решение обозначенной проблемы.

На рисунке 1 приведена структурная схема фазометра с использованием современной элементной базы: цифровых потенциометров и микропроцессоров.

Принцип действия фазометра заключается в следующем. Входной сигнал  $U_1$  с большей амплитудой подается через согласующее устройство СУ<sub>1</sub> на вход первого канала, а сигнал с меньшей амплитудой  $U_2$  – на вход второго канала. Управляющие входы цифровых потенциометров 1 – 4 подключены к управляющим выходам микропроцессора МП.

Микропроцессор МП сравнивает амплитуды входных сигналов и при их неравенстве вырабатывает сигнал рассогласования, который подается на управляющие входы цифровых потенциометров 1 и 2 так, чтобы их коэффициент передачи был равен  $K_1 = \frac{U_2}{U_1}$ . Одновременно микропроцессор изменяет сопротивление цифровых потенциометров 3 и 4 таким образом, чтобы выходное сопротивление  $R_{\text{вых1}} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$  было равно выходному сопротивлению  $R_{\text{вых2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Очевидно, что это возможно при программно-управляемом изменении значений сопротивления  $R_3$  и  $R_4$ .

Равенство выходных сопротивлений  $R_{\text{вых1}}$  и  $R_{\text{вых2}}$  означает равенство вносимых ими фазовых сдвигов, что является необходимым условием возможности компенсации фазовой погрешности цифровых потенциометров.

Выравненные по амплитуде сигналы подаются далее на коммутационный фазовый преобразователь КФП. Учитывая, что при равных уровнях входных сигналов КФП не вносит амплитудно-фазовой погрешности [10], можно констатировать, что поставленная задача

коррекции амплитудно-фазовой погрешности решена.

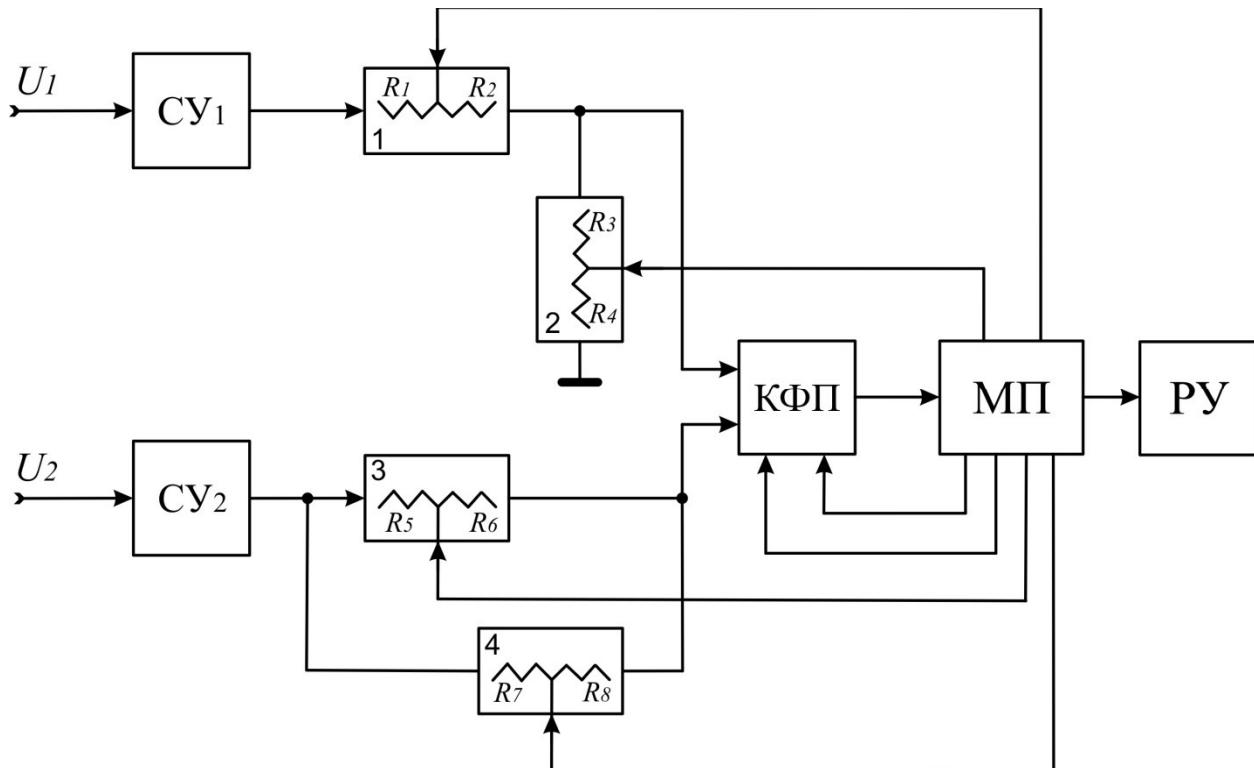


Рисунок 1 – Структурная схема фазометра

Для оценки возможности практической реализации предложенного способа в таблице 1 приведены параметры наиболее распространенных цифровых потенциометров ф. Analog Device [11]. Основными значимыми параметрами, в контексте проведенного анализа, являются количество позиций и температурная стабильность цифровых потенциометров.

Таблица 1 – Параметры цифровых потенциометров

Название	Число каналов	Количество позиций	Температурная стабильность (ppm/°C)	Интерфейс	Сопротивление, кОм	Напряжение питания (В)
AD5220	1	128	800	Up/Down	10, 50, 100	+5
AD7376	1	128	300	SPI	10, 50, 100, 1М	+28, ±15
AD8400	1	256	500	SPI	1, 10, 50, 100	+5
AD5222	2	128	35	Up/Down	10, 50, 100, 1М	+5, ±3
AD8402	2	256	500	SPI	1, 10, 50, 100	+5
AD5203	4	64	700	SPI	10, 100	+5
AD5246	1	128	35	I2C	5, 10, 50, 100	+5
AD5204	4	256	700	SPI	10, 50, 100	+5, ±3
AD8403	4	256	500	SPI	1, 10, 50, 100	+5
AD5280	1	256	35	I2C	20, 50, 200	±5, +15
AD5206	6	256	700	SPI	10, 50, 100	+5, ±3
AD5235	2	1024	35	SPI	25, 250	+5, ±3
AD5273	1	64	500	I2C	1, 10, 50, 100	+5

2 Второй способ решения рассматриваемой проблемы заключается в применении двухтактного метода с изменяемой частотой испытательного сигнала в первом и втором тахах. Практическая реализация данного метода осуществляется с использованием кварцевой линии задержки с известным значением  $\tau_0$  [12]. Структурная схема фазометра, реализующего данный способ, приведена на рисунке 2. Принцип действия фазометра следующий.

Если изначально задана частота входного сигнала  $\omega_1$ , то устанавливаемый фазовый сдвиг определяется выражением  $\varphi'_1 = \omega_1 \tau_1$ . С учетом погрешностей калибратора и

аттенюатора, измеряемый фазовый сдвиг будет равен

$$\varphi''_1 = \omega_1[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1], \quad (1)$$

где  $\xi_1$  – относительная погрешность калибратора задержки;

$\Delta\tau_1$  – значение задержки аттенюатора.

При этом значение задержки калибратора  $\tau_1$  должно соответствовать первой начальной отметки шкалы фазометра  $\varphi_1$ .

С учетом выражения (1) оно будет равно

$$\varphi_1 = \{\omega_1[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1] + \delta_1\}(1 + \gamma_1), \quad (2)$$

где  $\delta_1$  – абсолютная аддитивная погрешность фазометра (погрешность нуля от неравенства амплитуд);

$\gamma_1$  – относительная мультипликативная погрешность (погрешность чувствительности) фазометра.

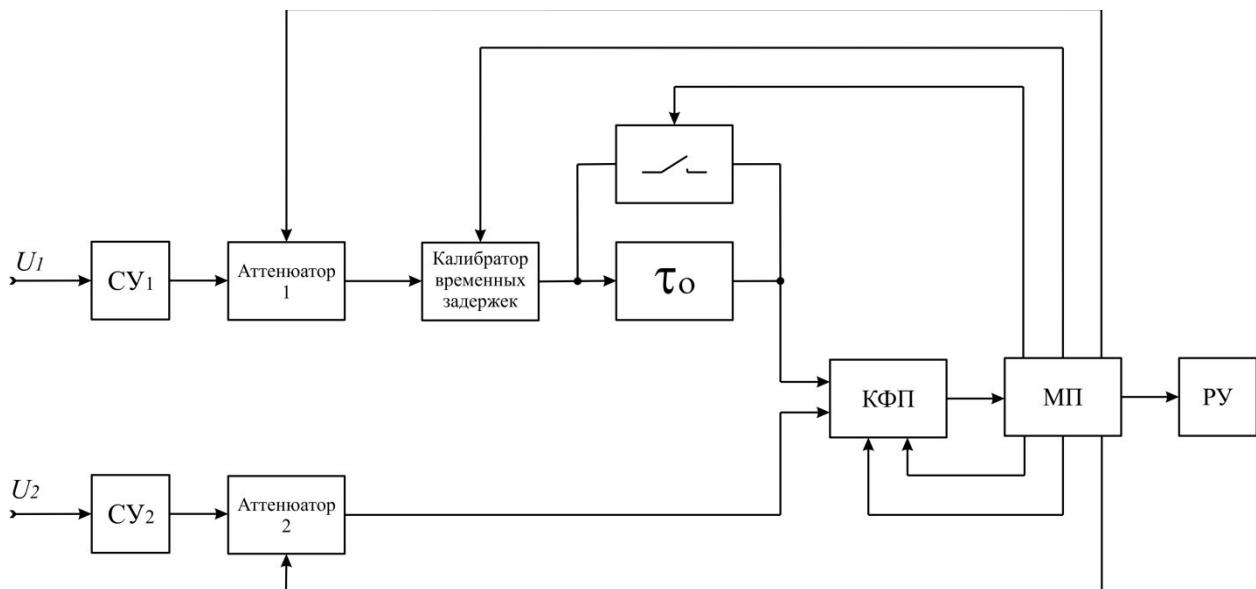


Рисунок 2 – Структурная схема двухтактного фазометра с калибратором временной задержки

Для оценки погрешности фазометра на отметке  $\varphi_1$  используют дополнительную кварцевую линию задержки  $\tau_0$ , подключаемую через ключ микропроцессором. Очевидно, что показания фазометра несколько увеличиваются. Поэтому далее уменьшают частоту входного сигнала до значения  $\omega_2$ , при котором восстанавливается первоначальное показание фазометра

$$\varphi_1 = \{\omega_2[\tau_1(1 + \xi'_1) + \Delta\tau'_1 + \tau_0] + \delta'_1\}(1 + \gamma'_1). \quad (3)$$

Если время задержки  $\tau_0$  выбрать значительно меньше, чем  $\tau_1$  ( $\tau_0 \ll \tau_1$ ), то частота  $\omega_2$  будет мало отличаться от значения  $\omega_1$ . Поэтому можно считать, что  $\xi'_1 = \xi_1$ ,  $\Delta\tau'_1 = \Delta\tau_1$ . При малом затухании калиброванной линии задержки незначительно изменится отношение амплитуд сигналов на выходе фазометра, что позволяет принять  $\delta'_1 = \delta_1$ ,  $\gamma'_1 = \gamma_1$ .

Тогда

$$\varphi_1 = \{\omega_2[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1 + \tau_0] + \delta_1\}(1 + \gamma_1). \quad (4)$$

Сравнивая (2) и (4) получим

$$\omega_1[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1] + \delta_1 = \omega_2[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1 + \tau_0] + \delta_1, \quad (5)$$

откуда

$$\tau(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \tau_0. \quad (6)$$

Из выражений (1) и (6) можно определить действительное значение измеренного фазового угла

$$\varphi''_1 = \omega_1[\tau_1(1 + \xi_1) + \Delta\tau_1] = \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \tau_0. \quad (7)$$

Разность показаний фазометра и действительного значения угла  $\varphi''_1$  соответствует значению погрешности:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \tau_0 = \varphi_1 - 2\pi\tau_0 \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 - f_2}, \quad (8)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  значения частоты калибратора временной задержки при первом и втором тактах

измерения.

Таким образом, выполнив процедуры первого и второго такта измерения и определив погрешности калибратора задержки и аттенюатора, возможно по известной задержке  $\tau_0$  определить в целом погрешность фазометра на каждой отметке его шкалы.

При этом точность данного метода практически не зависит от погрешности калибратора задержки и аттенюатора, а определяется точностью временной задержки  $\tau_0$ , которая в зависимости от диапазона рабочих частот составляет  $0,05 - 0,15^\circ$  [12].

3 Предложенная схемотехника фазоизмерительной аппаратуры применима в низкочастотном диапазоне частот, поскольку на частотах свыше 10 МГц значительно возрастают фазо-частотные и фазо-амплитудные погрешности [13]. Поэтому проблему измерения фазовых сдвигов в высокочастотном диапазоне решают на основе преобразования частоты исследуемых сигналов с последующим измерением фазового сдвига на фиксированной частоте килогерцового диапазона.

Наиболее перспективной схемой с учетом коммутационного преобразования сигналов является структура фазоизмерителя с автоматической коррекцией амплитудно-фазовой погрешности [14].

Это возможно, если перестроить частоту гетеродинного сигнала таким образом, чтобы в первом такте коммутации она была равной  $\omega_{r_1} = \omega_c + \omega_p$ , а во втором  $\omega_{r_2} = \omega_c - \omega_p$  [14]. Здесь  $\omega_c$  и  $\omega_p$  – частоты сигналов исследуемого и разностно-промежуточного, соответственно. При этом знак амплитудно-фазовой погрешности не меняется, так как при перестройки частоты гетеродина амплитуды сигналов в каналах фазоизмерителя сохраняют свои первоначальные значения.

Структурная схема фазометра, реализующая данный алгоритм, представлена на рисунке 3.

Принцип действия фазометра следующий. Входные сигналы  $U_1(t) = U_{m_1} \sin(\omega_c t + \varphi_1)$  и  $U_2(t) = U_{m_2} \sin(\omega_c t + \varphi_2)$  через согласующие устройства СУ<sub>1</sub> и СУ<sub>2</sub> поступают на сигнальные входы преобразователей частоты ПЧ<sub>1</sub> и ПЧ<sub>2</sub>, на гетеродинные входы которых подается напряжение  $U_r(t) = U_r \sin(\omega_r t + \varphi_r)$ . Это напряжение является результатом гетеродинного преобразования преобразователем ПЧ<sub>3</sub> выходных сигналов генераторов УГ<sub>1</sub> и УГ<sub>2</sub>, синхронизированных опорным сигналом кварцевого генератора КГ. В цепь автоподстройки частоты генераторов УГ<sub>1</sub> и УГ<sub>2</sub> включена пересчетная схема ПС<sub>1</sub> и делитель с переменным коэффициентом деления ДПКД. Синхронную перестройку частоты гетеродинного напряжения осуществляют по методу цифрового синтеза частоты путем изменения коэффициента передачи делителя с переменным коэффициентом деления ДПКД [14]. Данное схемотехническое решение позволяет по сигналам с микроконтроллера изменять частоту гетеродинного сигнала от  $\omega_c + \omega_{\text{пр}}$  до  $\omega_c - \omega_{\text{пр}}$ .

В результате гетеродинного преобразования частоты на выходе избирательных усилителей ИУ<sub>1</sub> и ИУ<sub>2</sub> получают два низкочастотных сигнала, разность фаз между которыми соответствует измеряемому фазовому сдвигу. Выходные сигналы избирательных усилителей поступают далее на входы коммутационного времяимпульсного преобразователя, содержащего микроконтроллер, выходной импульс с которого синхронизирует работу делителя с переменным коэффициентом деления ДПКД.

При этом в один такт коммутации времяимпульсного преобразователя фиксируется количество импульсов

$$n' = S(\varphi - \Delta\varphi_a) \pi / \Omega, \quad (9)$$

где  $S$  – крутизна преобразования фазового сдвига;

$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  – измеряемый фазовый сдвиг;

$\Delta\varphi_a$  – амплитудно-фазовая погрешность;

а в следующий такт коммутации при изменении частоты гетеродинного сигнала фиксируется количество импульсов

$$n'' = S(-\varphi - \Delta\varphi_a) \pi / \Omega. \quad (10)$$

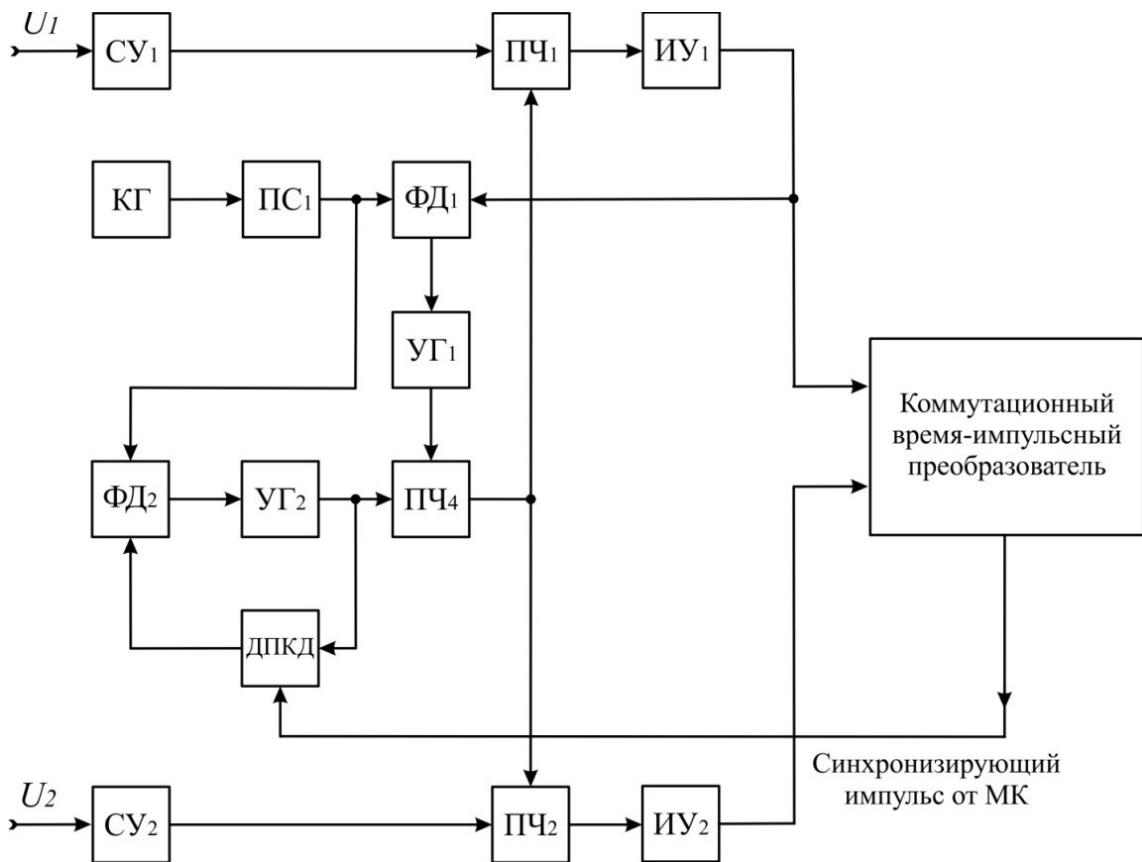


Рисунок 3 – Структурная схема фазометра с двухканальным преобразователем частоты

Остаток, накопленный в микроконтроллере времяимпульсного преобразователя после обработки двух тактов,

$$N = n' - n'' = S^{2\pi\varphi}/\Omega \quad (11)$$

соответствует значению фазового сдвига независимо от неравенства амплитуд входных сигналов.

Однако применение рассматриваемой схемы фазометра из-за наличия межканальных паразитных связей ограничено частотным диапазоном до 30~40 МГц.

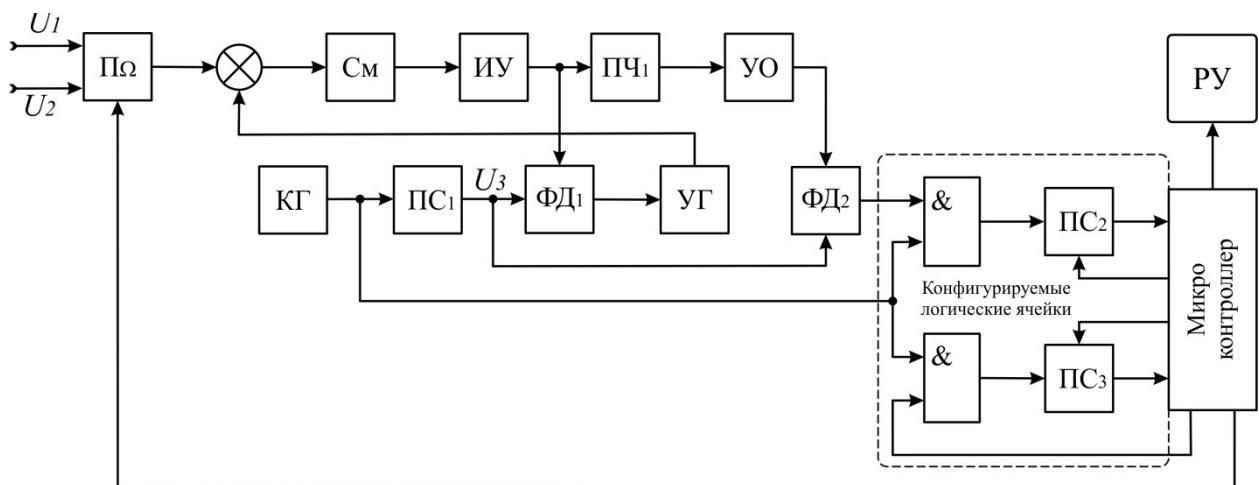


Рисунок 4 – Структурная схема модернизированного варианта одноканального фазометра на микроконтроллере с конфигурируемыми логическими ячейками

Устранить этот недостаток возможно, если перейти на одноканальные схемы поочередного преобразования частоты исследуемых сигналов. Впервые эта идея была реализована в одноканальном фазометре [15], а последующее ее развитие – в одноканальном

фазовом анализаторе с фазовой автоподстройкой частоты [16].

В настоящей работе, на рисунке 4 приведена структурная схема микропроцессорного варианта фазометра, являющегося дальнейшим развитием одноканальных фазометров с фазовой автоподстройкой частоты. При этом использование микроконтроллера с конфигурируемыми логическими ячейками (Configurable Logic Cell [17]) позволяет не только значительно упростить схемотехнику всего устройства, но и за счет использования высокоскоростной обработки цифровых сигналов значительно уменьшить инструментальную погрешность.

Непосредственно процесс измерения в данном фазометре осуществляется в течении двух тактов коммутации переключателя  $\Pi_\Omega$ . В первом такте на вход смесителя См поступают входной сигнала  $U_1$  и сигнал перестраиваемого генератора УГ. Сигнал разностной частоты  $f_p$ , выделяемый избирательным усилителем ИУ, поступает на один из входов фазового детектора  $\Phi D_1$ . На другой вход  $\Phi D_1$  через пересчетную схему  $\Pi C_1$  поступает с кварцевого генератора КГ сигнал  $U_3$ . Выходной сигнал  $\Phi D_1$  воздействует на генератор УГ таким образом, что частота выходного сигнала смесителя устанавливается равной частоте выходного сигнала пересчетной схемы  $\Pi C_1$ . Далее выходные сигналы смесителя и пересчетной схемы  $\Pi C_1$  поступают на входы  $\Phi D_2$ , который преобразует фазовый сдвиг во временной интервал, в течение которого в пересчетную схему  $\Pi C_2$  поступают импульсы с кварцевого генератора КГ.

Учитывая, что фазовые отношения при преобразовании частоты в отсутствии амплитудно-фазовых искажений сохраняются, количество импульсов, накопленных микроконтроллером в течение первого такта коммутации, пропорционально фазовому сдвигу когерентного напряжения  $U_3$  пересчетной схемы  $\Pi C_1$ , т.е:

$$n' = \frac{k f_p}{2 F_k} \left( \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2\pi} \right), \quad (12)$$

где  $\varphi_3$  – фаза выходного напряжения  $\Pi C_1$ ;

$k$  – коэффициент пересчета  $\Pi C_1$ .

Преобразовательные процессы второго такта аналогичны первому. При этом количество импульсов поступающих в микроконтроллер соответствует фазовому сдвигу входного напряжения  $U_2$  по отношению к когерентному напряжению  $U_3$ :

$$n'' = \frac{k f_p}{2 F_k} \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2\pi} \right). \quad (13)$$

Следовательно, остаток импульсов накопленных в микроконтроллере равен разности фаз напряжений  $U_1$  и  $U_2$  и не зависит от фазы когерентного напряжения  $U_3$ :

$$N = n' - n'' = \frac{k f_p}{2 F_k} \left( \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi} \right). \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что фазовые сдвиги, вносимые преобразователем частоты, не влияют на результаты измерения.

Отметим также несколько положительных качеств предлагаемой одноканальной схемы фазометра:

- отсутствие связей через общий гетеродин уменьшает уровень фазовых искажений;
- снижение относительного уровня комбинационных составляющих в тракте промежуточной частоты;
- уменьшение уровня сравниваемых сигналов не влияет на точность измерения разности фаз при воздействии шумов общего гетеродина.

### Заключение

Рассмотренные в работе методы оптимизации структуры фазоизмерительной аппаратуры позволяют в целом решить проблему повышения ее точностных характеристик.

Так, наиболее универсальным методом в низкочастотном диапазоне следует признать применение цифровых потенциометров для коррекции амплитудно-фазовой погрешности фазометров. Особенно эффективен этот метод в диапазоне частот до 200 кГц, в котором частотными погрешностями цифровых потенциометров можно пренебречь.

Применение калиброванной линии задержки эффективно не только для коррекции амплитудно-фазовой погрешности фазоизмерительной аппаратуры, но позволяет расширить ее применение, например для оценки фазовой погрешности аттенюаторов [18].

В высокочастотном диапазоне предложены структуры, позволяющие значительно уменьшить фазо-частотные и фазо-амплитудные погрешности фазоизмерительной

аппаратуры.

При этом в диапазоне частот до 40 МГц целесообразно применение фазометров с двухканальным гетеродинным преобразованием частоты, а для сигналов выше 40 МГц предложена одноканальная схема с коммутационным преобразованием входных сигналов, которая позволяет решить доминирующую проблему межканальных связей через общий гетеродин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фазовый метод определения координат / И.Е. Кинкулькин, В.Д. Рубцов, М.А. Фабрик; Под ред. И.Е. Кинкулькина. – М.: Советское радио, 1979. – 280 с.
2. Картов Г.В., Стюф А.С. Быстродействующий фазовый измеритель разности фаз сигнала пучка ионов и ускоряющего напряжения. АВТОМЕТРИЯ. – 2015. Т. 51, № 1, – С. 87-91.
3. Баженов Н.Р., Мыльников А.В., Малай И.М. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов. «Альманах современной метрологии» № 2 (18), – 2019, – С. 23–36.
4. Оппенгейм А.В., Лим Дж.С. Важность фазы при обработке сигналов. ТНИЭР (пер. с англ.) Т69. №5, – 1981. – С. 39-54.
5. Агаджанов П.А., Дулевич В.Е., Коростелев А.А. Космические траекторные измерения. – М.: Советское радио, 1969. – 498 с.
6. Van Trees, H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory / H.L. Van Trees. – USA: John Wiley Sons, 2002. – 716 р.
7. Шахтарин, Б.И. Оценка фазы псевдослучайной последовательности в системах передачи информации с расширенным спектром / Б.И. Шахтарин, Ю.А. Сидоркина, А.А. Никифоров // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2015. – № 3 (102). – С. 92-103.
8. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 544 с.
9. Григорьян Р.Л. и другие. Двухканальный фазометр. АС СССР №596891. Зарегистрировано: 15.11.1977.
10. Григорьян Л.Р., Богатов Н.М., Григорьян Р.Л. Применение микроконтроллеров в программно-конфигурируемом измерительном тракте коммутационно-тактовой фазоизмерительной аппаратуре. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1 (43). С. 45-55.
11. <https://www.analog.com/en/index.html>
12. Григорьян Р.Л., Маслов Н.В., Скрипник Ю.А. Способ определения погрешности электронных фазометров. АС СССР №736020. Зарегистрировано: 29.01.1980.
13. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О. Проектирование электронных измерительных приборов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 240 с.
14. Баженов Н.Р., Мыльников А.В., Малай И.М. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов. «Альманах современной метрологии» № 2 (18), – 2019, – С. 23–36.
15. Скрипник Ю.А. Одноканальный цифровой фазометр. АС СССР №356586. Зарегистрировано: 4.01.1973.
16. Григорьян Р.Л., Скрипник Ю.А., Шалдыкин О.К. Анализаторы характеристик радиоэлектронных устройств. – Киев: Техніка, 1981. – 248 с.
17. Конфигурируемые логические ячейки в PIC микроконтроллерах. <https://habr.com/ru/articles/372509/>.
18. Григорьян Л.Р., Богатов Н.М. Заявка на изобретение №2024133651, от 11.11.2024.

**Григорьян Леонтий Рустемович**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
г. Краснодар  
доцент кафедры физики и информационных систем  
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149  
E-mail: leonmezon@mail.ru

**Богатов Николай Маркович**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
г. Краснодар  
университет», г. Краснодар  
заведующий кафедрой физики и информационных  
систем  
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149  
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

**Григорьян Рустем Леонтьевич**

ООО Научно-производственная фирма «Мезон», г.  
Краснодар  
исполнительный директор  
350072, г. Краснодар, ул. Московская 81/1  
E-mail: mezon\_kub@mail.ru

**Сахно Мария Александровна**

ООО «С3 РЦАИ» (ООО «Северо-Западный  
Региональный Центр Аэронавигационной  
Информации»), г. Санкт-Петербург  
ведущий проектный менеджер  
190121, г. Санкт-Петербург, наб. реки Пряжка, д. 18-  
20, лит. А  
E-mail: maria\_210492@mail.ru

## STRUCTURAL METHODS OF OPTIMIZATION OF CIRCUIT TECHNIQUE OF PHASE-MEASURING EQUIPMENT

**Abstract.** The paper considers methods for increasing the accuracy of phase-measuring equipment in both low- and high-frequency ranges of measuring the phase parameters of the signals under study. In the frequency range up to 1 MHz, in which the amplitude-phase error dominates, the most effective solutions for reducing it are to use controlled resistors implemented using digital potentiometers and a quartz delay line with a known value of  $\tau_0$  and microprocessor control. In the high-frequency range of frequencies up to 40 MHz, the most effective is the use of a two-channel heterodyne frequency conversion, for signals above 40 MHz, it is advisable to use a single-channel conversion circuit with switching conversion of the input signals under study, which allows eliminating interchannel communications through a common heterodyne.

**Keywords:** measurement, phase methods, frequency, error, noise immunity.

## BIBLIOGRAPHY

1. Phase method for determining coordinates / I.E. Kinkulkin, V.D. Rubtsov, M.A. Fabric; Ed. by I.E. Kinkulkin. - M.: Sovetskoe Radio, 1979. - 280 p.
2. Kartov G.V., Styuf A.S. High-speed phase meter of the phase difference between an ion beam signal and accelerating voltage. AVTOMETRIA. - 2015. Vol. 51, No. 1, - P. 87-91.
3. Bazhenov N.R., Mylnikov A.V., Malay I.M. New tasks of metrological support for measurements of radio engineering signal parameters. "Almanac of Modern Metrology" No. 2 (18), - 2019, - P. 23-36.
4. Oppenheim A.V., Lim J.S. The Importance of Phase in Signal Processing. TNIER (translated from English) T69. No. 5, - 1981. - P. 39-54.
5. Agadzhanyan P.A., Dulevich V.E., Korostelev A.A. Space Trajectory Measurements. - Moscow: Sovetskoye Radio, 1969. - 498 p.
6. Van Trees, H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory / H.L. Van Trees. - USA: John Wiley Sons, 2002. - 716 p.
7. Shakhtar, B.I. Estimation of the Phase of a Pseudo-Random Sequence in Spread-Spectrum Information Transmission Systems / B.I. Shakhtar, Yu.A. Sidorkina, A.A. Nikiforov // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series Instrument-making. - 2015. - No. 3 (102). - P. 92-103.
8. Afonskiy A.A., Dyakonov V.P. Measuring instruments and mass electronic measurements. - M.: Solon-Press, 2007. - 544 p.
9. Grigoryan R.L. et al. Two-channel phase meter. AS USSR No. 596891. Registered: 15.11.1977.
10. Grigoryan L.R., Bogatov N.M., Grigoryan R.L. Application of microcontrollers in the software-configurable measuring path of switching-clock phase-measuring equipment. Measurement. Monitoring. Control. Control. 2023. No. 1 (43). P. 45-55.
11. <https://www.analog.com/en/index.html>
12. Grigoryan R.L., Maslov N.V., Skripnik Yu.A. Method for Determining the Error of Electronic Phase Meters. USSR AS No. 736020. Registered: 29.01.1980.
13. Bondar O.G., Brezhneva E.O. Design of Electronic Measuring Instruments. - Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023. - 240 p.
14. Bazhenov N.R., Mylnikov A.V., Malay I.M. New Tasks of Metrological Support for Measurements of Radio Engineering Signal Parameters. "Almanac of Modern Metrology" No. 2 (18), - 2019, - P. 23-36.
15. Skripnik Yu.A. Single-channel digital phase meter. AS USSR No. 356586. Registered: 4.01.1973.
16. Grigoryan R.L., Skripnik Yu.A., Shalykin O.K. Analyzers of characteristics of radio-electronic devices. - Kyiv: Tekhnika, 1981. - 248 p.
17. Configurable logic cells in PIC microcontrollers. <https://habr.com/ru/articles/372509/>.
18. Grigoryan L.R., Bogatov N.M. Application for invention No. 2024133651, dated 11.11.2024.

### Grigoryan Leonty Rustemovich

"Kuban State University", Associate Professor of the Department of Physics and Information Systems, St. Krasnodar  
associate Professor of the Department of Physics and Information Systems  
350040, Krasnodar, Stavropolskaya St., 149  
E-mail: leonmezon@mail.ru

### Григорьян Рустем Леонтьевич

Scientific and Production Company "Mezon" LLC, St. Krasnodar  
Executive Director  
350072, Krasnodar, Moskovskaya St. 81/1  
E-mail: mezon\_kub@mail.ru

### Bogatov Nikolay Markovich

"Kuban State University", Associate Professor of the Department of Physics and Information Systems, St. Krasnodar  
head of the Department of Physics and Information Systems  
350040, Krasnodar, Stavropolskaya St., 149  
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

### Sakhno Maria Aleksandrovna

OOO SZ RCAI (OOO North-West Regional Center of Aeronautical Information), St. Petersburg  
leading project manager  
190121, St. Petersburg, Pryazhka River Embankment, 18-20, lit. A  
E-mail: maria\_210492@mail.ru

КУЗЬМЕНКО В.П.

## МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ Р-Н-ПЕРЕХОДА В БЫТОВЫХ СВЕТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛИЯ

**Аннотация.** В работе предложена модель на основе спектрального анализа излучения света для определения температуры р-н-перехода светодиода. Модель учитывает термические эффекты, нелинейности в активной зоне светодиода и влияние повышенной токовой нагрузки, что обеспечивает её применимость для диапазонов температуры 300К – 400К. В работе использован метод оптического определения температуры р-н-перехода и экспериментальная верификация модели в диапазоне рабочих токов 100 мА – 250 мА для светодиодов типа SMD2835 с кристаллом на основе нитрида галлия (GaN), покрытых люминофорным слоем. Оценка точности модели показала среднее абсолютное отклонение в районе 5%, что подтверждает надёжность предложенного подхода. Сравнительный анализ с аналогичными методами определения температуры р-н перехода показал более высокую точность разработанной модели в условиях повышенных токовых нагрузок (200 - 250 мА на исследуемых образцах). Разработанная модель представляет собой новый инструмент управления качеством светодиодных источников света в области контроля параметров рабочей температуры р-н-перехода.

**Ключевые слова:** управление качеством светодиодов, температура р-н-перехода, спектральный анализ, эффективность светодиодов, модель спектрального анализа, оптический метод определения температуры

### Введение

Долговечность, качество и эффективность работы светодиодных источников света (светодиодов) в значительной мере зависят от температуры р-н-перехода. Повышение температуры р-н-перехода приводит к снижению внутренней квантовой эффективности генерации света, что выражается в преобразовании большей части энергии электрического тока в тепло, а не в световое излучение в видимом или инфракрасном диапазонах. Высокая плотность тока способна вызывать необратимые структурные изменения в активной зоне светодиода, которые приводят к дефектам кристаллической решетки полупроводника, межслойным напряжениям и разрушению структуры активной зоны кристалла светодиода. Одновременно с этим возрастаёт вероятность ускоренной деградации полимерных материалов, применяемых для защиты активной зоны светодиода и оптической стабилизации излучения, что негативно сказывается долговечности и на качестве света светодиода [1].

Верхние допустимые пределы температуры р-н-перехода светодиода, обычно составляют от 125 °С до 135 °С. Превышение этих значений приводит к быстрому ухудшению характеристик светового излучения и что указывает на необходимость контроля температуры р-н-перехода для управления качеством светодиодных осветительных приборов (СОП). Особенno это важно для мощных СОП, которые имеют более высокие значения прямого тока, поэтому точное управление температурным режимом таких устройств способствует увеличению их срока службы и поддержанию стабильных характеристик излучения света [2].

При этом, прямое измерение температуры р-н-перехода с использованием контактных методов затруднено из-за малых размеров кристалла светодиода в силу того, что такие измерения могут искажать показатели тепловых свойств изделия, что приводит к недооценке реальной температуры р-н-перехода устройства [3, 4]. В качестве альтернативы контактным методам контроля температуры светодиодов может использоваться оптический метод, основанный на анализе спектральной формы излучения. Этот метод особенно полезен для встроенных светодиодов, у которых электрические контакты недоступны для измерений.

Оптический метод определения температуры р-н-перехода базируется на анализе изменений спектра излучения света, генерируемого в активной зоне светодиода в результате рекомбинации электронов и дырок. Это излучение напрямую связано с физическими характеристиками полупроводникового кристалла – шириной запрещенной зоны, распределением и плотностью состояний носителей заряда в зоне проводимости и валентной зоне кристалла светодиода. Физически влияние температуры р-н-перехода на процессы генерации света светодиодом проявляется в виде сдвига длины волны максимальной интенсивности и расширения спектральных линий света.

На смотря на то, что оптический метод определения температуры *p-n*-перехода широко используется в промышленности, он имеет ряд существенных ограничений, которые делают актуальным разработку новых подходов к более точному определению энергии или плотности состояний носителей в рамках метода. Это связано с тем, что существующие модели спектрального анализа основаны на распределении плотности состояний носителей и законе Стефана Больцмана [5, 6], что вызывает необходимость использования заранее известных параметров конкретного исследуемого светодиода, что таким образом снижает универсальность моделей, особенно в условиях массового производства светодиодов с разными структурами и исполнением полупроводниковых кристаллов.

Помимо сложности в достижении универсальности моделей для разных светодиодов, эффекты деградации, связанные с тепловым старением активной зоны светодиода, изменением межслойных напряжений в материале и накопительными процессами дефектов в кристаллической решётке не учитываются в большинстве современных моделей, что снижает их точность при долговременной эксплуатации светодиодов. При этом при высоких плотностях тока локальный перегрев активной зоны светодиода вызывает значительные изменения спектра света, которые сложно учесть с помощью существующих методов. Как уже говорилось выше, это особенно критично для мощных светодиодов, используемых в промышленном освещении.

Таким образом актуальность текущего исследования обусловлена необходимостью преодоления указанных ограничений. Существующие модели, несмотря на их теоретическую обоснованность, недостаточно универсальны и точны для мониторинга характеристик светодиодов и прогноза их работы в реальных условиях эксплуатации. Для повышения точности и универсальности методов спектрального анализа требуется разработка подходов, которые учитывают конструктивные и эксплуатационные факторы, включая влияние времени и высоких токовых нагрузок на процессы генерации света.

Исходя из описанных ограничений целью исследования является разработка физически обоснованной модели спектрального анализа, которая позволит более точно определять температуру *p-n*-перехода светодиодов на основе изменений спектральных характеристик излучения. Особенностью предлагаемого подхода должен являться учёт термических эффектов, деградации активной зоны и влияния высокой плотности токов, для обеспечения применимости подхода для светодиодов, работающих в диапазоне температур 300К – 400 К и токовых нагрузок 100mA – 400mA.

Объектом исследования выступают белые светодиоды, состоящие из активной зоны на основе нитрида галлия (*GaN*) и люминофорного слоя, преобразующего часть синего излучения в жёлтую часть спектра. Спектр излучения таких светодиодов формируется как сумма двух основных компонент: узкополосного излучения активной зоны и широкополосного излучения люминофора. Суммарное излучение светодиодов характеризуется широкой полосой спектра, формирующей восприятие белого света.

Исходя из поставленной цели основными задачами является разработка физически обоснованной модели спектрального анализа, которая связывает спектральные параметры излучения светодиода, включая длину волны максимальной интенсивности, ширину спектральной линии и общую интенсивность излучения, с температурой *p-n*-перехода, учитывая временные и конструктивные изменения, а также валидация разработанной модели.

### **Основные теоретические положения, допущения, материалы и методы модели спектрального анализа**

Основной принцип оптического метода заключается в том, что температура *p-n*-перехода влияет на ширину запрещенной зоны ( $E_3$ ) полупроводника. При увеличении ширина запрещенной зоны  $E_3$  уменьшается, что вызывает сдвиг максимума спектральной интенсивности света в длинноволновую область. Этот эффект описывается уравнением Варани:

$$E_3(T) = E_{3,0} - \alpha T,$$

где  $E_{3,0}$  – ширина запрещенной зоны материала активной зоны светодиода при номинальной температуре, эВ;

$\alpha$  – температурный коэффициент ширины запрещенной зоны для данного полупроводникового материала, эВ/К;

$T$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, которая характеризует термодинамическое состояние активной зоны, К.

Физический смысл параметра  $\alpha$  заключается в измерении влияния тепловой энергии на энергетическую структуру полупроводника. Экспериментальные значения  $\alpha$  для  $GaN$  находится в пределах 4 – 5 мэВ/К, что подтверждено спектроскопическими исследованиями [7].

Уменьшение ширины запрещённой зоны при повышении температуры приводит к сдвигу длины волны максимальной интенсивности ( $\lambda_{\max}$ ) в длинноволновую область. Этот сдвиг связан с энергетической разницей между уровнями носителей заряда и подчиняется выражению:

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{hc}{E_3(T)},$$

где  $\lambda_{\max}$  – длина волны максимальной интенсивности света, нм;

$h$  – постоянная Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$c$  – скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

Спектр излучения светодиода складывается из двух основных компонентов: узкополосного излучения активной зоны светодиода, возникающего в результате рекомбинации носителей заряда, и широкополосного излучения люминофора, который преобразует часть синего излучения в жёлтую область спектра.

Термическое взаимодействие носителей заряда с фононами вызывает расширение спектра активной зоны светодиода, которое описывается гауссовой функцией, где амплитуда интенсивности излучения света и ширина спектральной линии излучения зависят от температуры:

$$I_{\text{ак}}(\lambda, T) = I_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{(\lambda - \lambda_{\max}(T))^2}{2\sigma_{\text{ак}}^2}\right)},$$

где  $I_{\text{ак}}(\lambda, T)$  – спектральная интенсивность излучения света активной зоны при длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$ , Вт/м<sup>2</sup>·нм;

$I_{\max}$  – амплитуда интенсивности света активной зоны, соответствующая максимальному значению интенсивности, Вт/м<sup>2</sup>·нм;

$\lambda$  – длина волны света, испускаемого активной зоной  $p$ - $n$ -перехода в процессе рекомбинации носителей заряда, нм;

$\lambda_{\max}(T)$  – длина волны максимальной интенсивности света, зависящая от температуры через ширину запрещённой зоны, нм;

$\sigma_{\text{ак}}$  – ширина спектральной линии излучения света активной зоны, характеризующая диапазон длин волн, в которых интенсивность остаётся значительной, нм;

$T$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, К.

Люминофорный слой преобразует часть синего излучения активной зоны в широкий жёлтый диапазон. Однако эффективность этого преобразования ( $\eta_{\text{л}}(T)$ ) уменьшается с ростом температуры из-за процессов теплового старения и снижения вероятности радиационной рекомбинации:

$$\eta_{\text{л}}(T) = \eta_{\max} \cdot e^{-\beta T},$$

где  $\eta_{\text{л}}(T)$  – относительная эффективность преобразования синего света в жёлтый при температуре  $T$ , выраженная в долях единицы;

$\eta_{\max}$  – максимальная эффективность преобразования при температуре  $T=0$  К, определяемая экспериментально для данного состава люминофора;

$\beta$  – температурный коэффициент деградации эффективности преобразования, К<sup>-1</sup>, который зависит от состава люминофора и технологии его нанесения;

$T$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, К.

Коэффициент  $\beta$  отражает чувствительность эффективности люминофора к изменению температуры. Для большинства составов люминофоров, используемых в белых светодиодах,  $\beta$  имеет значения в диапазоне  $10^{-3} – 10^{-2}$  К<sup>-1</sup>, что указывает на экспоненциальное снижение эффективности с ростом температуры [8, 9].

Чем выше  $\beta$ , тем быстрее эффективность преобразования снижается с повышением температуры.

Температура  $p$ - $n$ -перехода рассчитывается с учётом электрической мощности, выделяемой на светодиоде:

$$T = T_{\text{окр}} + R_{\text{т}} \cdot P_{\text{эл}},$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, К;

$R_{\text{т}}$  – тепловое сопротивление, К/Вт;

$P_{\text{эл}}$  – электрическая мощность, выделяемая на светодиоде, Вт.

### Разработка модели определения температуры $p$ - $n$ -перехода на основе спектрального анализа излучения белого светодиода

Существующие модели определения температуры  $p$ - $n$ -перехода полупроводниковых кристаллов светодиода на основе спектрального анализа излучения при формировании математического описания плотности состояний (ПС) часто основаны на приведенных степенных функциях, что ограничивает точность при моделировании реальных структур квантовых ям полупроводника. Для повышения точности таких моделей необходимо учитывать многомерную структуру, формирование суб-зон и влияние кристаллических дефектов на ПС.

Основой для предлагаемой модели является включение многоуровневой структуры суб-зон ПС, что позволяет более точно описывать сложность энергетических уровней в квантовых ямах кристалла полупроводника. В дополнение к двум основным суб-зонам, характерным для моделей определения температуры  $p$ - $n$ -перехода на основе спектральных характеристик излучения света, в предлагаемой модели вводятся дополнительные суб-зоны, отражающие влияние дефектов решётки и локализованных состояний. При этом, основное допущение модели, как и в аналогичных методах, заключается в учете влияния на уширение энергетических уровней ПС преимущественно теплоэлектрическими эффектами, что позволяет описывать уширение с использованием экспоненциального подхода.

ПС носителей может быть выражена следующим образом:

$$q(E) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{1 + e^{\left(\frac{E - (E_3 + \Delta E_i)}{\sigma_i}\right)}},$$

где  $E$  – внутренние энергетические уровни активной зоны светодиода, соответствующие зонам проводимости и валентным зонам, эВ;

$q$  – плотность состояний, как функция количества доступных энергетических состояний на единицу энергии, эВ<sup>-1</sup>;

$N$  – число суб-зон;

$A_i$  – амплитуда плотности состояний  $i$ -й суб-зоны, эВ<sup>-1</sup>;

$\Delta E_i$  – энергетическое смещение  $i$ -й суб-зоны относительно  $E_3$ , эВ;

$\sigma_i$  – параметр расширения энергетических уровней плотности состояний электронно-дырочных пар в полупроводнике,  $i$ -й суб-зоны, эВ; данные параметры определяются методом аппроксимации экспериментально измеренных спектров излучения светодиода с использованием модели плотности состояний, минимизирующей суммарную квадратичную погрешность между модельными и измеренными данными.

Температурные изменения оказывают существенное влияние на ПС, что связано с термическими колебаниями атомов и взаимодействиями носителей заряда с фононами.

Для учета этих эффектов принимается допущение, что параметры модели ПС  $\Delta E_i$  и  $\sigma_i$  явно зависят от температуры  $p$ - $n$ -перехода  $T$ , для этого вводятся температурные коэффициенты, описывающие изменение энергетических смещений и параметров уширения с увеличением температуры:

$$\begin{aligned} \Delta E_i(T) &= \Delta E_0 + \beta_i(T - T_0), \\ \sigma_i(T) &= \sigma_0 + \gamma_i(T - T_0), \end{aligned}$$

где  $T$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, К;

$T_0$  – базовая температура, обычно принимаемая равной 300 К;

$\Delta E_0$  – начальное энергетическое смещение  $i$ -й суб-зоны относительно ширины запрещённой зоны  $E_3$  при базовой температуре  $T_0$ , эВ;

$\beta_i$  – температурный коэффициент для энергетических смещений  $i$ -й суб-зоны, эВ/К;

$\gamma_i$  – температурный коэффициент для параметра расширения  $i$ -й суб-зоны, эВ/К.

При высоких токовых нагрузках в светодиодах возникают нелинейные эффекты, такие как усиленная рекомбинация носителей через дефекты и самонагрев, что существенно влияет на спектральные характеристики [10]. Для учета этих эффектов вводится дополнительное

повышение температуры  $p$ - $n$ -перехода  $\Delta T_{\text{наг}}$ , связанное с нелинейными эффектами при высоких токах:

$$T = T_{\text{окр}} + R_{\text{т}} \cdot P_{\text{эл}} + \Delta T_{\text{наг}}.$$

Для моделирования долговременной работы светодиодов необходимо учитывать процессы деградации, возникающие вследствие длительной эксплуатации. Эти процессы включают накопление дефектов и изменение параметров материала под воздействием тепловых и электрических нагрузок.

Вводится временная зависимость параметров модели:

$$\begin{aligned} A_i(t) &= A_0 \cdot e^{-\gamma_i t}, \\ \Delta E_i(t) &= \Delta E_0 + \beta_i(t), \\ \sigma_i(t) &= \sigma_0 + \delta_i t, \end{aligned}$$

$t$  – время эксплуатации светодиода, час;

$\delta_i$  – коэффициент изменения параметра расширения  $i$ -й суб-зоны со временем, эВ/с.

Объединив все вышеперечисленные аспекты, получаем комплексную модель спектрального излучения светодиода, учитывающую многомерную структуру ПС, температурные зависимости и временную динамику деградации:

$$I(\lambda, T, t) = \eta_{\text{л}}(T) \cdot I_{\text{л}}(\lambda) + \sum_{i=1}^N I_{\text{ак},i}(\lambda, T, t),$$

где  $I(\lambda, T, t)$  – спектральная интенсивность излучения светодиода при длине волны  $\lambda$ , температуре  $p$ - $n$ -перехода  $T$  и времени эксплуатации  $t$ , Вт/м<sup>2</sup>·нм;

$\eta_{\text{л}}(T)$  – относительная эффективность люминофора при температуре  $T$ ;

$I_{\text{л}}(\lambda)$  – спектральная интенсивность излучения люминофора при длине волны  $\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>·нм;

$I_{\text{ак},i}(\lambda, T, t)$  – спектральная интенсивность излучения активной зоны  $i$ -й суб-зоны при длине волны  $\lambda$ , температуре  $T$  и времени эксплуатации  $t$ , Вт/м<sup>2</sup>·нм.

Для вычисления спектра излучения активной зоны дополнительно учитывается распределение носителей заряда по энергии, описываемое распределением Стефана Больцмана. Совместное распределение ПС и носителей энергии выражается следующим образом:

$$r(E) = \frac{1}{\tau_p} \cdot q(E) \cdot e^{-\left(\frac{E}{k_B T}\right)},$$

где  $r(E)$  – спектральная интенсивность рекомбинационного излучения активной зоны, Вт/м<sup>2</sup>·нм;

$\tau_p$  – время радиационной рекомбинации носителей заряда, с;

$k_B$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – температура  $p$ - $n$ -перехода, К.

Для применения модели необходимо провести калибровку параметров  $A_0$ ,  $\gamma_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\delta_i$ , а также температурных коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и теплового сопротивления  $R_{\text{т}}$ . Калибровка осуществляется на основе экспериментальных данных, полученных при различных режимах работы светодиодов, включая разные токовые нагрузки и температуры  $p$ - $n$ -перехода.

Валидация модели проводится путем сравнения прогнозируемых спектральных характеристик и температур  $p$ - $n$ -перехода с независимыми измерениями, например, с использованием термопар или других методов температурного мониторинга. Дополнительно, модель проверяется на различных образцах светодиодов для подтверждения её универсальности и точности.

### Результаты моделирования и валидация модели

Для исследования зависимости спектральных характеристик светодиодов от температуры  $p$ - $n$ -перехода была разработана методика, включающая измерение спектрального распределения интенсивности излучения и расчёт температуры перехода на основе электрических характеристик.

Были выбраны пять идентичных белых светодиодов типа SMD2835, каждый из которых содержал активную зону на основе нитрида галлия (GaN) и люминофорный слой, преобразующий часть синего излучения в жёлтую область спектра. Для удобства образцы маркировались как  $LED_1$ ,  $LED_2$ ,  $LED_3$ ,  $LED_4$  и  $LED_5$ .

Для проведения экспериментов использовались светодиоды SMD2835, основные параметры которых представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры исследуемых светодиодов

Параметр	Значение
Материал активной зоны	$GAN$
Цветовая температура	$T_{цв} = 4000$ К
Номинальный ток	$I_n = 150$ мА
Максимальный ток	$I_{макс} = 240$ мА
Прямое напряжение	$U_n \approx 3$ В
Рабочий диапазон температур	от $-40$ °C до $+85$ °C
Ширина запрещённой зоны	$E_3 = 2,7$ эВ
Максимальная длина волны излучения	$\lambda_{макс} = 450$ нм
Тепловое сопротивление	$R_T = 25$ °C/Вт
Эффективность люминофора	$\eta_{л} = 90\%$

Температура  $p$ - $n$ -перехода регулировалась изменением подаваемого на светодиоды тока в диапазоне от 50 мА до 250 мА. Это обеспечивало диапазон температур от 300 К до 370 К. После каждого изменения тока выдерживался интервал времени в 30 секунд для стабилизации тепловых и электрических параметров светодиода. Прямое напряжение измерялось с помощью цифрового мультиметра, подключённого в четырёхпроводной схеме, что позволяло минимизировать погрешности, вызванные сопротивлением соединительных проводников. Для измерения спектра использовался спектрорадиометр «ТКА-Спектр» с разрешением 1 нм, что позволяет фиксировать как узкополосное излучение активной зоны, так и широкополосное излучение люминофора. Для минимизации влияния внешних факторов применялась интегрирующая сфера «ТКА-КК1» с коэффициентом отражения 96%, обеспечивающая равномерное распределение светового потока.

Для каждой величины тока регистрировались спектр излучения с разрешением 1 нм и электрические параметры светодиода:

$$P_{эл} = U_{СИД} \cdot I_{рег},$$

где  $U_{СИД}$  – прямое напряжение на кристалле светодиода, измеренное цифровым мультиметром, В;

$I_{рег}$  – подаваемый на контакты кристалла светодиода ток, мА.

Для минимизации теплового дрейфа и стабилизации характеристик измерения проводились через 30 с после изменения тока.

Эффективность преобразования люминофора  $\eta_{л}(T)$  определялась по отношению интенсивности широкополосного излучения к суммарной интенсивности света:

$$\eta_{л}(T) = \frac{I_{л}}{I_{ак} + I_{л}},$$

где  $I_{л}$  – интегральная интенсивность соответственно люминофорного излучения, Вт/м<sup>2</sup>·нм.

Результаты измерений представлены на рисунке 1. В части (а) приведена зависимость температуры  $p$ - $n$ -перехода от прямого напряжения для одного из исследуемых светодиодов ( $LED_5$ ) при различных токах. На графике отчётливо видна монотонная зависимость, подтверждающая корректность проведённых измерений. Увеличение тока вызывает повышение температуры перехода, что согласуется с теоретическими представлениями.

На графике, представленном в части (б), показана аналогичная зависимость для пяти различных образцов светодиодов при фиксированном токе 150 мА. Несмотря на небольшие различия в значениях прямого напряжения при одинаковых температурах, форма зависимости остаётся практически идентичной для всех исследуемых образцов.

Для измерения спектральных характеристик активной зоны исследуемых светодиодов и сопоставления полученных данных с модельным распределением ПС был использован метод оптической регистрации спектральной формы излучения с преобразованием длин волн в энергетические уровни и последующим построением графиков ПС.

Светодиоды поочередно были установлены в интегрирующую сферу, обеспечивающую равномерное распределение светового потока далее полученные значения усреднялись. Подача тока регулировалась источником питания с точностью до 0,1 мА.

Напряжение на светодиоде измерялось мультиметром, температура окружающей среды поддерживалась на уровне лабораторных условий (+25°C).

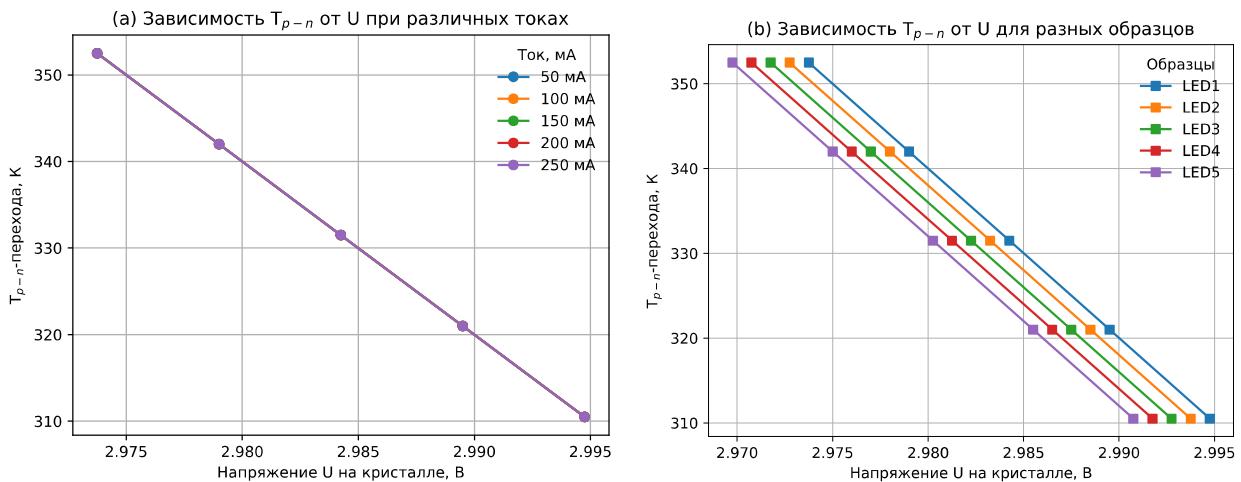


Рисунок 1 – а) измеренная зависимость температуры р-п-перехода от прямого напряжения для одного образца белого светодиода при различных токах в диапазоне 50 – 250 мА; б) измеренная зависимость температуры р-п-перехода от прямого напряжения для пяти образцов белых светодиодов одного типа при фиксированном токе 150 мА

Для каждого заданного значения тока (50 мА, 100 мА, 150 мА, 200 мА, 250 мА) с помощью спектрорадиометра фиксировались спектры излучения. После задания каждого значения тока выдерживался временной интервал 30 с, чтобы параметры *p*-*n*-перехода стабилизировались.

Полученные спектральные данные представляли собой интенсивность излучения как функцию длины волны. Далее данные подвергались преобразованию. Каждая измеренная длина волны ( $\lambda$ ) преобразовывалась в энергию фотона ( $E_\phi$ ) по выражению:

$$E_\phi = \frac{hc}{\lambda e},$$

где  $h$  – постоянная Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$c$  – скорость света, ( $3 \cdot 10^8$  м/с);

$e$  – элементарный заряд ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл);

$\lambda$  – длина волны, измеренная спектрорадиометром, м;

$E_\phi$  – энергия фотона, эВ.

Из-за обратной зависимости  $E_\phi$  от  $\lambda$ , шаги в длине волны ( $\Delta\lambda$ ) не равномерно преобразуются в шаги в энергии ( $\Delta E_\phi$ ) [11, 12]

Это приводит к изменению плотности точек данных, и поэтому для корректного перехода необходимо учесть поправочный множитель – якобиан преобразования:

$$I(E_\phi) = I(\lambda) \cdot \frac{\lambda^2 e}{hc},$$

где  $I(E_\phi)$  – интенсивность излучения, выраженная в зависимости от энергии фотонов, Вт/м<sup>2</sup>/эВ;

$I(\lambda)$  – интенсивность излучения, измеренная спектрорадиометром в зависимости от длины волны (Вт/м<sup>2</sup>/нм);

$\frac{\lambda^2 e}{hc}$  – поправочный множитель, который компенсирует неравномерность распределения данных, вызванную обратной зависимостью  $E_\phi$  от  $\lambda$ , и обеспечивает более точное отображение интенсивности в энергетической шкале.

Для каждого измеренного значения энергии рассчитывалась плотность состояний с использованием модели, описывающей вклад трёх суб-зон

$$q(E) = \frac{A_1}{1 + e^{\left(\frac{E - (E_3 + \Delta E_{0,1})}{\sigma_1}\right)}} + \frac{A_2}{1 + e^{\left(\frac{E - (E_3 + \Delta E_{0,2})}{\sigma_2}\right)}} + \frac{A_3}{1 + e^{\left(\frac{E - (E_3 + \Delta E_{0,3})}{\sigma_3}\right)}}.$$

Параметры  $A_i$ ,  $\Delta E_{0,i}$  и  $\sigma_i$ , подбирались методом минимизации суммарной квадратичной ошибки между экспериментальными данными и модельной кривой. Эта модель учитывает

вклад каждой суб-зоны, возникающий из-за неоднородностей в структуре полупроводника и квантово-размерных эффектов, связанных с ограничением движения носителей заряда в квантовых ямах.

На рисунке 2 красные точки представляют экспериментальные данные, собранные с использованием спектрорадиометра, а чёрная линия – это модельное распределение ПС, учитывающее уширение энергетических уровней из-за температурных и структурных эффектов. Зелёная линия иллюстрирует идеальную ступенчатую функцию ПС, которая отражает вклад каждой суб-зоны в общее распределение.

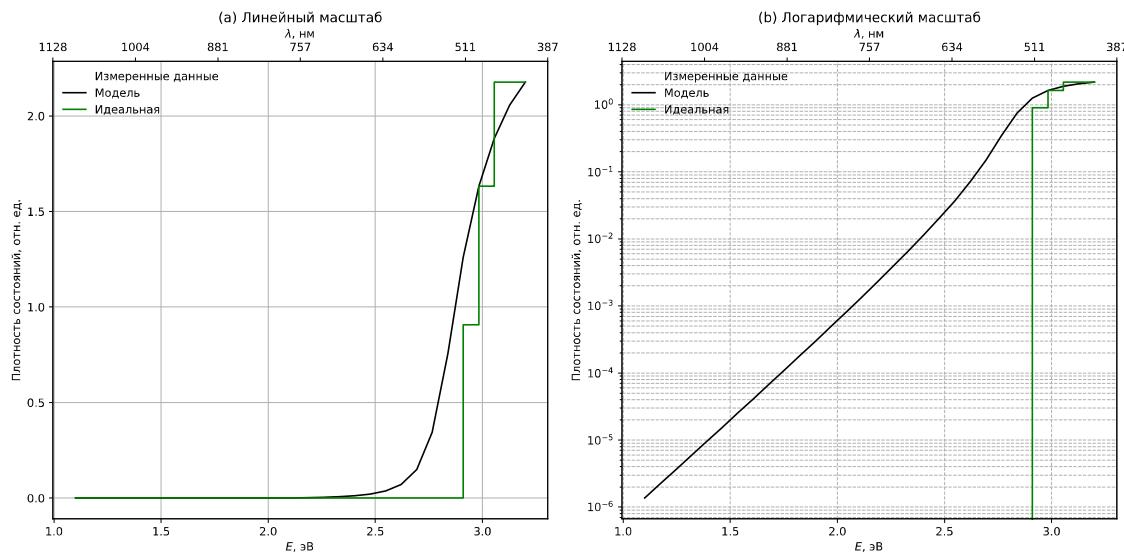


Рисунок 2 – Распределение плотности состояний в активной зоне исследуемых образцов светодиодов: (а) линейная шкала; (б) логарифмическая шкала

Графики, представленные на рисунке 2 демонстрируют сопоставление экспериментальных данных, модельных предсказаний и теоретической ступенчатой функции ПС. Они выполнены в двух масштабах: линейном (рисунок 2(а)) и логарифмическом (Рисунок 2(б)).

В линейной шкале, представленной на рисунке 2(а), отчётливо видны изменения плотности состояний, которые описываются модельной кривой (чёрная линия). Модельная функция учитывает три суб-зоны, каждая из которых описывает вклад различных энергетических состояний в общую ПС. Первая суб-зона, характеризующаяся минимальным энергетическим смещением ( $\Delta E_{0,1} = 0,1$  эВ) и узким уширением ( $\sigma_1 = 0,05$  эВ), отражает низкоэнергетические состояния, вызванные локализованными дефектами её вклад виден в области энергий от  $E_3 = 2,75$  эВ до  $E = 2,85$  эВ.

Вторая суб-зона ( $\Delta E_{0,2} = 0,2$  эВ) представляет состояния, связанные с границами квантовых ям. На графике эта суб-зона заметна в области энергий от  $E = 2,85$  эВ до  $E = 2,95$  эВ.

Третья суб-зона ( $\Delta E_{0,3} = 0,3$  эВ) соответствует высокоэнергетическим состояниям, формирующимся за счёт взаимодействия носителей с фононами и неоднородности состава активной зоны. Этот диапазон охватывает энергию от  $E = 2,95$  эВ до  $E > 3,1$  эВ.

Плавные переходы между этими уровнями отражают температурное уширение энергетических состояний, которое учитывается в модели.

Красные точки на графике показывают экспериментальные данные, полученные в ходе измерений спектров излучения светодиодов. Эти данные практически совпадают с модельной кривой, что подтверждает правильность выбора параметров амплитуды ( $A_1, A_2, A_3$ ) и температурных коэффициентов уширения ( $\sigma_i$ ). Лишь в области высоких энергий ( $E > E_3 + \Delta E_{0,3}$ ) наблюдаются небольшие расхождения между экспериментальными точками и модельной линией. Эти отклонения могут быть связаны с локальными флюктуациями температуры  $p$ - $n$ -перехода или незначительными случайными погрешностями в измерениях.

Идеальная ступенчатая функция (зелёная линия) показывает вклад каждой суб-зоны без учёта температурного уширения. Она иллюстрирует дискретные изменения плотности состояний, которые были бы характерны для системы без термодинамических эффектов.

Сравнение зелёной и чёрной линий подчёркивает значимость учёта температурных эффектов и взаимодействия носителей заряда с фононами для описания реальных процессов в активной зоне.

На логарифмической шкале, представленной на Рисунке 2(b), детализируются низкоэнергетические состояния, которые менее заметны на линейной шкале. Здесь видно, что модельная кривая отражает экспоненциальное снижение плотности состояний вблизи края запрещённой зоны ( $E > E_3 + \Delta E_{0,1}$ ). Этот спад обусловлен локализованными состояниями, возникающими из-за дефектов решётки. Экспериментальные данные также соответствуют этому экспоненциальному спаду, что свидетельствует о корректности учёта низкоэнергетических состояний в предложенной модели.

Результаты анализа показывают, что среднее абсолютное отклонение между экспериментальными данными и модельной кривой составляет менее 6%. Это подтверждает достаточную точность модели в описании плотности состояний для светодиодов типа SMD2835. Отличия в форме кривой для идеальной ступенчатой функции и модельного распределения подчёркивают важность учёта термических и структурных эффектов для анализа реальных систем.

Таким образом, данные, представленные на Рисунке 2, демонстрируют, что предложенная модель адекватно описывает распределение ПС в активной зоне светодиодов. Линейная шкала позволяет выделить вклад каждой суб-зоны, а логарифмическая – акцентировать внимание на низкоэнергетических состояниях.

На рисунке 3 представлены смоделированные и измеренные при температурах  $p$ - $n$ -перехода в диапазоне от 300 К до 370 К характеристики интенсивности излучения  $r(E)$  исследуемых светодиодов. Анализ основан на результатах измерений и моделирования энергетических характеристик активной зоны светодиода.

Спектры интенсивности, представленные на рисунке 3(a), показывают экспериментальные данные (отмечены точками) и модельные предсказания (сплошные линии) для каждой температуры. Модель учитывает температурные зависимости ширины запрещённой зоны  $E_3$ , уширения энергетических уровней ( $\sigma_i$ ) и вклада каждой суб-зоны ( $A_i$ ) в общую плотность состояний. Экспериментальные данные демонстрируют высокую степень согласованности с модельными кривыми.

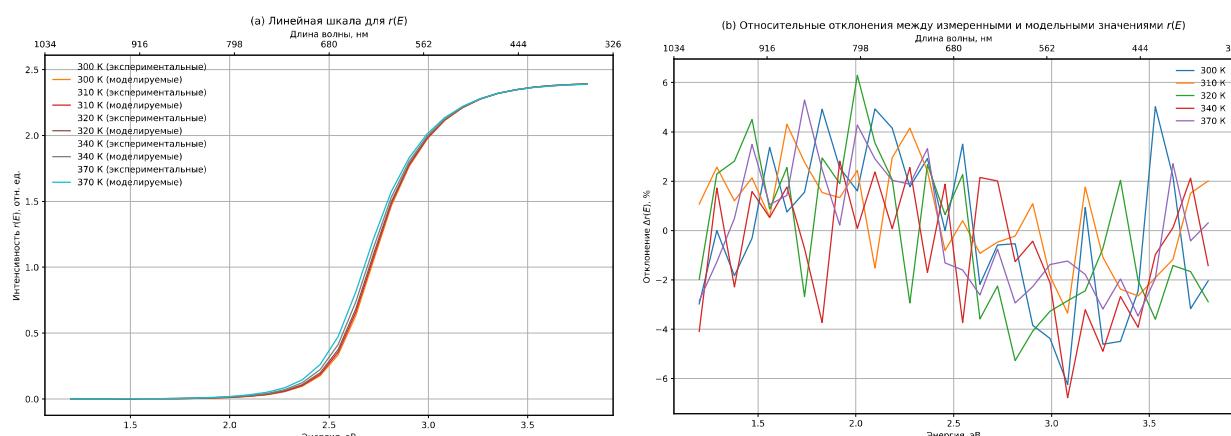


Рисунок 3 – Спектральные характеристики интенсивности излучения и относительные отклонения экспериментальных данных от модельных предсказаний для светодиодов GaN при температурах  $p$ - $n$ -перехода в диапазоне от 300 К до 370 К

На рисунке 3(b) представлены относительные отклонения интенсивности:

$$\Delta r(E_\phi) = \frac{r_{\text{эксп.}}(E_\phi) - r_{\text{мод.}}(E_\phi)}{r_{\text{мод.}}(E_\phi)} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta r(E_\phi)$  – относительное отклонение спектральной интенсивности, выраженное в процентах (%);

$r_{\text{эксп.}}(E_\phi)$  – спектральная интенсивность, измеренная экспериментально, Вт/м<sup>2</sup>/эВ;

$r_{\text{мод.}}(E_\phi)$  – спектральная интенсивность, рассчитанная на основе модельной зависимости, Вт/м<sup>2</sup>/эВ;

$E_\phi$  – энергия фотонов, соответствующая каждому измеренному значению интенсивности, эВ.

Средние отклонения составляют менее 5% во всём энергетическом диапазоне, за исключением областей высоких энергий (ось «энергия»  $> 3,2$  эВ на рисунке 3 а), где отклонения увеличиваются до 7%. Эти расхождения могут быть связаны с нестабильностью температуры  $p$ - $n$ -перехода и локальными неоднородностями материала.

На Рисунке 4 представлены результаты моделирования термически зависимых параметров активной зоны светодиодов типа SMD2835. Данные зависимости были получены на основе температурно-зависимых моделей, описанных выше, и калиброваны по экспериментально измеренным спектрам излучения, представленным на Рисунках 2 и 3. Зависимости включают параметры уширения трёх суб-зон ( $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$ ,  $\Delta r_3$ ), ширины запрещённой зоны ( $E_z$ ) и энергии пика излучения ( $E_{\text{пик}}$ ). Энергия пика излучения в модели определяется как энергия максимальной интенсивности света, испускаемого активной зоной. Физически  $E_{\text{пик}}$  тесно связана с шириной запрещённой зоны и находится немного ниже неё из-за термических эффектов и взаимодействий носителей с фононами.

Для моделирования температурных зависимостей параметров активной зоны светодиодов были использованы линейно-экспоненциальные модели, описанные ранее. Параметры моделей, такие как температурный коэффициент ширины запрещённой зоны ( $\alpha$ ) и температурные коэффициенты уширения суб-зон ( $\beta_i$ ), были определены методом аппроксимации измеренных спектров излучения (рисунки 2 и 3). Аппроксимация проводилась с использованием минимизации квадратичной ошибки между модельными кривыми и измеренными данными, представленными на рисунке 3.

На графике (а) рисунка 4 виден рост всех трёх уширений с повышением температуры, что связано с усилением тепловых эффектов в активной зоне. Различия в уширениях для разных величин токов обусловлены дополнительным локальным нагревом активной зоны светодиода, так как повышение плотности тока усиливает взаимодействие носителей заряда с фононами. График (б) рисунка 4 демонстрирует отличия в величинах уширений для разных светодиодов ( $LED_1$ ,  $LED_3$ ,  $LED_5$ ), несмотря на их принадлежность к одной серии, что можно описать вариациями в распределении дефектов и локальными флюктуациями энергетических характеристик активной зоны светодиода.

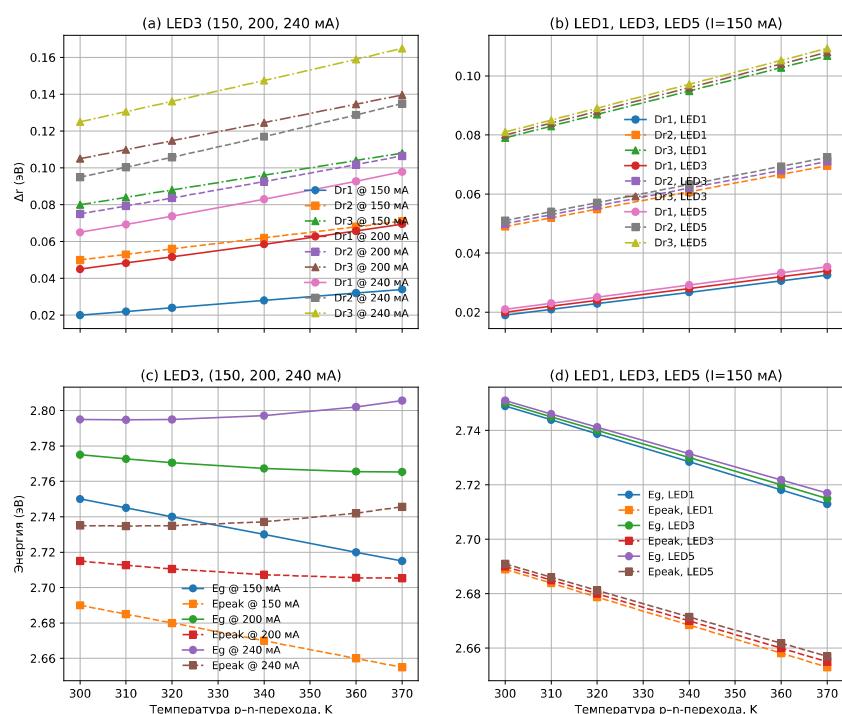


Рисунок 4 – Смоделированные зависимости уширений суб-зон ( $\Delta r_i$ ) и энергии ( $E_z$ ,  $E_{\text{пик}}$ ) от температуры  $p$ - $n$ -перехода для исследуемых светодиодов: (а) Зависимости  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$  и  $\Delta r_3$  от температуры для одного светодиода ( $LED_3$ ) при различных токах; (б) Зависимости  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$  и  $\Delta r_3$  от температуры для разных светодиодов ( $LED_1$ ,  $LED_3$ ,  $LED_5$ ) при фиксированном токе 150 мА; (в) Зависимости  $E_z$  и  $E_{\text{пик}}$  от температуры для одного светодиода ( $LED_3$ ) при различных токах; (г) Зависимости  $E_z$  и  $E_{\text{пик}}$  от температуры для разных светодиодов ( $LED_1$ ,  $LED_3$ ,  $LED_5$ ) при фиксированном токе 150 мА

Значение  $\alpha = 0,00045$  эВ/К для материала активной зоны светодиодов типа SMD2835 (GaN) скорректировано на основе аппроксимации спектров излучения, чтобы учесть особенности конструкции исследуемых образцов [13, 14].

Начальные уширения ( $r_1, r_2, r_3$ ) и температурные коэффициенты ( $\beta_i$ ) для трёх суб-зон ( $i = 1,2,3$ ) подбирались на основе модели, минимизирующей расхождение с экспериментальными данными, представленными на Рисунке 3. Значения полученных параметров:  $r_{0,1} = 0,05$  эВ,  $\beta_1 = 0,0003$  эВ/К;  $r_{0,2} = 0,08$  эВ,  $\beta_2 = 0,0004$  эВ/К;  $r_{0,3} = 0,12$  эВ,  $\beta_3 = 0,0005$  эВ/К.

На рисунке 5 представлены результаты сравнительного анализа предлагаемой модели спектрального анализа температуры  $p$ - $n$ -перехода (обозначенной на графике как «предлагаемая модель») с двумя существующими подходами: методом наклона спектральной зависимости (Slope Method) и методом пиковых энергий (Peak Method). Сравнение выполнено с использованием «эталонных данных» – полученных из измерений температуры  $p$ - $n$ -перехода светодиодов типа SMD2835. Все рассматриваемые методы продемонстрировали тенденцию к увеличению температуры  $p$ - $n$ -перехода с ростом тока, что согласуется с физической природой тепловыделения в светодиодных источниках света.

Левый график на рисунке 5 демонстрирует зависимость температуры  $p$ - $n$ -перехода от тока через кристалл исследуемого светодиода для всех рассматриваемых методов и кривую «эталонные данные».

При низких токах (50 – 100 мА) новая модель показывает заметные отклонения от эталонных значений, что может быть связано с недостаточным учётом особенностей спектральной плотности состояний в этом диапазоне. В диапазоне средних и высоких токов (200 – 250 мА) модель демонстрирует высокую точность, что указывает на её целесообразность применения модели в условиях повышенных тепловых нагрузок.

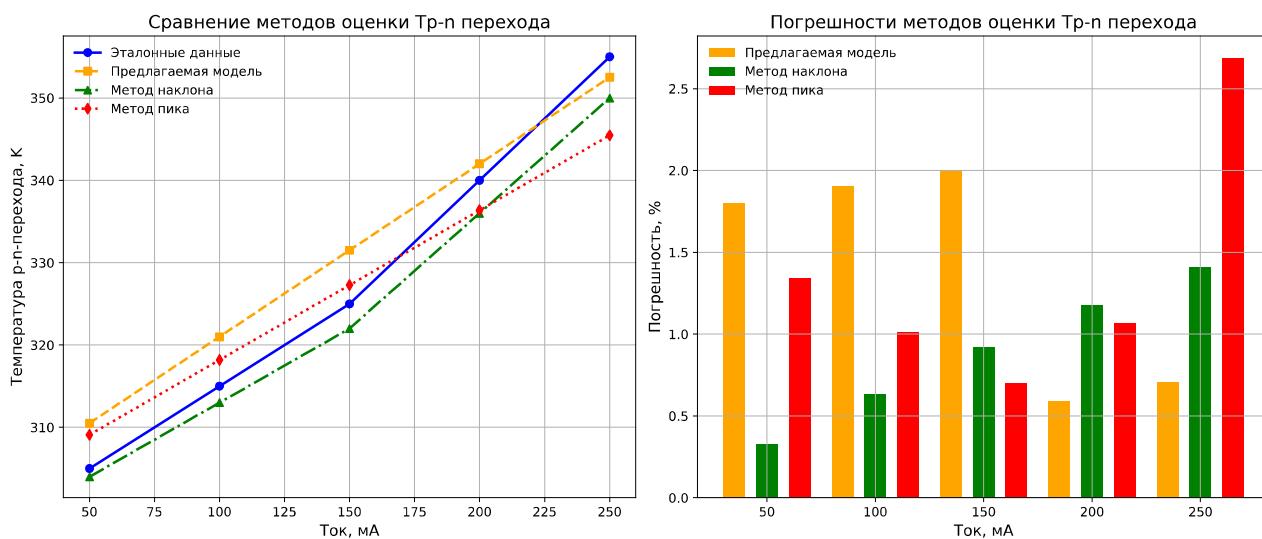


Рисунок 5 – Сравнительная оценка моделей определения температуры  $p$ - $n$ -перехода исследуемых светодиодов

Метод наклона спектра (Slope Method) допустил более значительные отклонения на высоких токах, в то время как метод пиковых энергий (Peak Method) дал сравнительно наибольшие расхождения по всему диапазону, что связано с его ограничениями в описании реальных условий работы светодиодов.

### Заключение

Предложенная модель по сравнению с существующими подходами определения температуры  $p$ - $n$ -перехода на основе спектрального анализа характеристик излучаемого света светодиодов обладает рядом преимуществ. Во-первых, предложенная в модели многоуровневая структура плотности состояний позволяет более точно описывать сложность энергетических уровней в квантовых ямах, учитывая при этом влияние кристаллических

дефектов и локализованных состояний энергетических уровней. Во-вторых, явное включение температурозависимых параметров сдвига энергетических уровней  $\Delta E_i$  и  $\sigma_i$  обеспечивает более точное моделирование влияния температуры на спектральную форму излучения.

Результаты валидации модели подтверждают достаточную степень согласованности между моделируемыми параметрами и экспериментальными данными, особенно в диапазоне средних нагрузок для светодиодов (150 – 250 мА). В целом, среднее абсолютное отклонение от измеренных данных составило около 5%, что свидетельствует о хорошей точности модели. Однако, следует отметить, что при низких токах (50 – 100 мА) наблюдаются более высокие отклонения, по сравнению с традиционными методами моделирования, которые могут быть вызваны недостаточным учётом плотности состояний носителей заряда в этих режимах. Это указывает на дальнейший вектор развития разработанной модели, так как модель может быть дополнена функцией учёта временных изменений характеристик материалов, вызванных длительной эксплуатацией светодиода, что расширит возможности модели для обеспечения её применимости в различных диапазонах токовых нагрузок.

Таким образом, предложенная модель является физически обоснованной и имеет практическую применимость в области управления качеством светодиодных осветительных приборов для температурного контроля  $p$ - $n$ -перехода в активной зоне кристалла светодиода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев В. А., Ходаков А. М., Фролов И. В. Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре. // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, Т. 12, №. 3, 2020, С. 329-334.
2. Манего С.А., Бумай Ю.А., Хорунжий И.А., Трофимов Ю.В. Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, №. 6, 2015, С. 74-86.
3. Удальцов В.Е., Удальцов А.В., Фомин О.Г. Обеспечение тепловых режимов мощных светодиодов. // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, №. 6 (104), 2017, С. 41-44.
4. Савкова Т. Н. Автоматизация расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок. // Вестник Белорусско-Российского университета, №. 4 (69), 2020, С. 97-104.
5. Vo T.-M.L., Nguyen T.-K., Pham T.-H., Thi-Yen-Nhi, Huynh T.-B., Tran L.-M.K., Pham D.-K., Nguyen Q.-C., Nguyen Q.-K. Development of an efficient optical model for LEDs-based white light spectrum design applications // Journal of Innovations in Business and Industry. – 2024. – № 2. – pp. 185–192. – DOI: 10.61552/JIBI.2024.03.007.
6. Li Y., Zhu Y., Wang M., Deng H., Huang J., Yin H., Sun L. Temperature dependence of the optical properties of violet, blue and green InGaN/GaN single quantum well light-emitting diodes // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Т. 50. – DOI: 10.1088/1361-6463/aa95b2.
7. Mytrix GaN - Gallium Nitride Band structure and carrier concentration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/bandstr.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/bandstr.html?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения: 25.12.2024).
8. Шириев Р.Р., Борисов А.Н., Валеев А.А. Об обеспечение теплового режима светодиодного источника света // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т.24. – №3. – С.57–64.
9. Мещерякова К. Тепловой режим работы мощных светодиодов – моделирование в ANSYS ICEPAK // ЭЛЕКТРОНИКА: наука | технология | бизнес. – 2015. – №8 (00148). – С.114–116.
10. Zakgeim, A.L., Ivanov, A.E. Chernyakov, A.E. Features of Operation of High-Power AlInGaN LEDs at High Pulse Currents. *Tech. Phys. Lett.* **47**, 834–837 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021080290.
11. Саврухин А.П. Сущность света // Восточно-европейский научный журнал. – 2017. – №12-2 (28). – С.57–64.
12. Александров Б.Л. Модель фотона // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №111. – С.657–679.
13. Pässler R. Dispersion-related assessments of temperature dependences for the fundamental band gap of hexagonal GaN // Journal of Applied Physics. – 2001. – Т.90, №8. – С.3956–3964. – DOI: 10.1063/1.1402147.
14. Pavlidis G. et al. Thermal Performance of GaN/Si HEMTs Using Near-Bandgap Thermoreflectance Imaging // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – Т.67, №3. – С.822–827. – DOI: 10.1109/TED.2020.2964408.

**Кузьменко Владимир Павлович**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники (№32)  
190000 г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская д. 67 лит.А  
E-mail: mr.konnny@gmail.com

KUZMENKO V.P.

## SPECTRAL ANALYSIS MODEL FOR DETERMINING P-N JUNCTION TEMPERATURE IN GAN-BASED LEDs

**Abstract.** The paper proposes a model based on spectral analysis of light emission to determine the temperature of the LED p-n junction. The model takes into account thermal effects, nonlinearities in the active zone of the LED and the influence of increased current load, which ensures its applicability for the temperature ranges of 300K - 400K. In this work we used the method of optical determination of the p-n junction temperature and experimental verification of the model in the range of operating currents 100 mA - 250 mA for LEDs type SMD2835 with a crystal based on gallium nitride (GaN), coated with phosphor layer. Evaluation of the model accuracy showed the average absolute deviation in the neighborhood of 5%, which confirms the reliability of the proposed approach. Comparative analysis with similar methods for determining the p-n junction temperature showed higher accuracy of the developed model under conditions of increased current loads (200 - 250 mA on the studied samples). The developed model is a new tool for quality control of LED light sources in the field of controlling the parameters of the operating temperature of the p-n junction.

**Keywords:** LED quality management, p-n junction temperature, spectral analysis, LED efficiency, spectral analysis model, optical temperature determination method.

## BIBLIOGRAPHY

1. Sergeev V.A., Khodakov A.M., Frolov I.V. Model of InGaN/GaN LED degradation under current testing considering inhomogeneous distribution of temperature and current density in the heterostructure [Model degradatsii InGaN/GaN svetodioda pri tokovykh ispytaniyakh s uchetom neodnorodnogo raspredeleniya temperatury i plotnosti toka v geterostrukture] // Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye Tekhnologii. – 2020. – Vol.12, No.3. – pp.329–334.
2. Maneho S.A., Bumay Yu.A., Khorunzhii I.A., Trofimov Yu.V. Analysis of thermal properties of LED strings using transient electrical processes method [Analiz teplovyykh svoystv lineyek svetodiodov metodom perekhodnykh elektricheskikh protsessov] // Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. – 2015. – No.6. – pp.74–86.
3. Udal'tsov V.E., Udal'tsov A.V., Fomin O.G. Ensuring thermal regimes of high-power LEDs [Obespechenie teplovyykh rezhimov moshchnykh svetodiodov] // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo. – 2017. – No.6 (104). – pp.41–44.
4. Automation of residual resource calculation for LED lighting installations [Avtomatizatsiya rascheta ostatichnogo resursa svetodiodnykh osvetitelnykh ustavok] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2020. – No.4 (69). – pp.97–104.
5. Vo T.-M.L., Nguyen T.-K., Pham T.-H., Thi-Yen-Nhi, Huynh T.-B., Tran L.-M.K., Pham D.-K., Nguyen Q.-C., Nguyen Q.-K. Development of an efficient optical model for LEDs-based white light spectrum design applications // Journal of Innovations in Business and Industry. – 2024. – № 2. – pp. 185–192. – DOI: 10.61552/JIBI.2024.03.007.
6. Li Y., Zhu Y., Wang M., Deng H., Huang J., Yin H., Sun L. Temperature dependence of the optical properties of violet, blue and green InGaN/GaN single quantum well light-emitting diodes // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – T. 50. – DOI: 10.1088/1361-6463/aa95b2.
7. Mytrix GaN - Gallium Nitride Band structure and carrier concentration [Electronic resource]. – Available at: [https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/bandstr.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/bandstr.html?utm_source=chatgpt.com) (accessed: 25.12.2024).
8. Shiriyev R.R., Borisov A.N., Valeev A.A. Ensuring the thermal regime of LED light source [Ob obespechenii teplovogo rezhma svetodiodnogo istochnika sveta] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. – 2022. – Vol.24. – No.3. – pp.57–64.
9. Meshcheryakova K. Thermal regime of high-power LEDs operation – modeling in ANSYS ICEPAK [Teplovoy rezhim raboty moshchnykh svetodiodov – modelirovaniye v ANSYS ICEPAK] // Elektronika: nauka i tekhnologiya | biznes. – 2015. – No.8 (00148). – pp.114–116.
10. Zakgeim, A.L., Ivanov, A.E. Chernyakov, A.E. Features of Operation of High-Power AlInGaN LEDs at High Pulse Currents. Tech. Phys. Lett. 47, 834–837 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021080290.
11. Savrukhin A.P. Essence of Light [Sushchnost sveta] // Vostochoevropeyskiy nauchnyy zhurnal. – 2017. – No.12-2 (28). – pp.57–64.
12. Alexandrov B.L. Photon Model [Model fotona] // Politekhnicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No.111. – pp.657–679.
13. Pässler R. Dispersion-related assessments of temperature dependences for the fundamental band gap of hexagonal GaN // Journal of Applied Physics. – 2001. – T.90, №8. – C.3956–3964. – DOI: 10.1063/1.1402147.
14. Pavlidis G. et al. Thermal Performance of GaN/Si HEMTs Using Near-Bandgap Thermoreflectance Imaging // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – T.67, №3. – C.822–827. – DOI: 10.1109/TED.2020.2964408.

### Kuzmenko Vladimir Pavlovich

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Candidate of technical science, Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics (No. 32)

190000 St. Petersburg, ul. Bolshaya Morskaya d. 67 lit.A

E-mail: mr.konnny@gmail.com

# **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 629.7.05.61: 629.7.054.44

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-148-156

ЕФРЕМОВА Е.С., СОЛДАТКИН В.В., СОЛДАТКИН В.М.

## **МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА**

**Аннотация.** Отмечена важность информации о воздушных параметрах движения летательного аппарата (ЛА) относительно окружающей воздушной среды при решении задач пилотирования, автоматического управления и обеспечения безопасности движения, а том числе малоразмерных ЛА, получаемых все более широкое применение и развитие. При этом сложность конструкции, значительная масса и стоимость традиционных для самолетов и других объектов авиационной техники информационно-измерительных систем воздушных сигналов с распределенными по фюзеляжу приемниками и датчиками информации о параметрах набегающего воздушного потока, связанных с бортовым вычислителем, ограничивает их применение на малоразмерных ЛА различного класса и назначения, что определяет перспективность информационно-измерительной системы на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока с одним интегрированным неподвижным приемником первичной информации в виде частотных информативных сигналов, обрабатываемых во встроенным вычислителе.

Рассмотрены причины, разработаны аналитические модели, проведен расчет и анализ соответствия современным требованиям инструментальных погрешностей каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, обусловленных погрешностью используемого датчика абсолютного давления, погрешностью каналов выделения и преобразования частотных информативных сигналов, а также погрешностью вычисления. Показано, что инструментальные погрешности измерительных каналов рассматриваемой системы при выборе отечественного датчика абсолютного давления, элементной базы ультразвуковых измерительных каналов и встроенного вычислителя соответствуют предъявляемым требованиям без дополнительных мероприятий по их уменьшению.

Раскрывается методика, получены аналитические модели, проведен расчет и анализ методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов, обусловленныхискажением невозмущенного набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании фюзеляжа с расположенным на его поверхности интегрированным приемником. Предложены эффективные направления уменьшения систематических и случайных составляющих методических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы.

Полученные результаты подтверждают конкурентные преимущества применения информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока на малоразмерных летательных аппаратах различного класса и назначения.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, движение, воздушные сигналы, информационно-измерительная система, контроль, набегающий поток, ультразвуковой метод, погрешности, инструментальные, методические, аналитические модели, расчет, анализ, уменьшение.

### **Введение**

При решении задач пилотирования, автоматического управления и обеспечения безопасности полета летательных аппаратов (ЛА) различного класса и назначения широко используется информация об истинной воздушной скорости и аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте и вертикальной скорости, приборной скорости и числе Maxa, других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику и динамику движения, относительно окружающей воздушной среды [1 – 3].

Расширение области применения и круга задач, решаемых малоразмерными пилотируемыми, беспилотными и дистанционно-пилотируемыми ЛА, а также значительная сложность, масса и стоимость традиционных для авиационной техники систем воздушных сигналов с распределенными по фюзеляжу приемниками воздушных давлений, температуры торможения и флюгерными датчиками направления набегающего воздушного потока, подключенных к бортовому вычислителю [4, 5], ограничивают их применение на малоразмерных ЛА. Это определяет перспективность разработки и исследования характеристик системы воздушных сигналов, построенной на базе датчика вектора воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров

набегающего воздушного потока [6]. Ниже проводится исследование инструментальных и методических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, оценка их соответствия современным требованиям.

**Аналитические модели и анализ инструментальных погрешностей ультразвуковых измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов.**

Ультразвуковые измерительные каналы рассматриваемой системы построены на основе ультразвукового датчика вектора истинной воздушной скорости [6]. Поэтому инструментальные погрешности ультразвуковых измерительных каналов рассматриваемой информационно-измерительной системы в основном обусловлены погрешностями используемого ультразвукового датчика. Как показано в работе [7], при формировании выходных сигналов датчика реализуются аналитические модели определения истинной воздушной скорости  $V_B$ , угла скольжения  $\beta$  и угла атаки  $\alpha$  вида

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}; \quad \beta = K_i \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{\Delta f_1 + \Delta f_2}; \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_3 - \Delta f_4}{\Delta f_3 + \Delta f_4}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между излучателями, генерирующими ультразвуковые колебания с частотами  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  распространения их от излучателей И1, И2, И3, И4 до приемников П1, П2, П3, П4 по направлению контролируемого набегающего воздушного потока и от источников И'1, И'2, И'3, И'4 до приемников П'1, П'2, П'3, П'4 – против направления набегающего потока;  $\Delta f_1 = f_1 - f'_1$ ,  $\Delta f_2 = f_2 - f'_2$  – информативные разности частот приемников П1, П'1, П2, П'2 ультразвуковых колебаний, расположенных в плоскости изменения угла скольжения  $\beta$ ;  $\Delta f_3 = f_3 - f'_3$ ,  $\Delta f_4 = f_4 - f'_4$  – информативные разности частот приемников П3, П'3, П4, П'4, расположенных в плоскости изменения угла атаки  $\alpha$ ;  $K_i \frac{\pi}{2}$  – множитель, определяющий диапазон изменения угла скольжения (при  $-45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$   $K_i = 0$ ; при  $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$   $K_i = 1$ ; при  $135^\circ \leq \beta \leq 225^\circ$   $K_i = 2$ ; при  $-45^\circ \leq \beta \leq -135^\circ$   $K_i = -1$ ).

Из выражений (1) видно, что инструментальная погрешность  $\Delta V_B$  определения истинной воздушной скорости обусловлена технологическим допуском  $\pm \Delta L$  на расстояние между излучателями и приемниками ультразвуковых колебаний, погрешностями  $\Delta(\Delta f_1)$  и  $\Delta(\Delta f_2)$  измерения разности частот  $f_1$  и  $f'_1$ ,  $f_2$  и  $f'_2$ , распространяемые по направлению потока и против потока, а также погрешностью  $\Delta_B$  реализации вычислителем аналитической модели определения истинной воздушной скорости. Принимая, что  $\Delta(\Delta f_1) = \Delta(\Delta f_2) = \Delta(\Delta f)$ , получим аналитическую модель для расчета инструментальной погрешности  $\Delta V_B$  определения истинной воздушной скорости вида

$$\Delta V_B = \pm \frac{\Delta L}{2} V_B + \frac{(\Delta f_1 + \Delta f_2)}{\sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}} \Delta(\Delta f) + \Delta_B. \quad (2)$$

При  $\Delta(\Delta f_1) = \Delta(\Delta f_2) = \Delta(\Delta f)$ , используя линейное приближение, аналитические модели для инструментальных погрешностей определения угла скольжения и угла атаки получены в виде

$$\Delta \beta = K_i \frac{\pi}{2} \frac{(\Delta f_1 + \Delta f_2)^3}{(\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2)^2} \Delta(\Delta f) + \Delta_B; \quad \Delta \alpha = \frac{(\Delta f_3 + \Delta f_4)^3}{(\Delta f_3^2 + \Delta f_4^2)^2} \Delta(\Delta f) + \Delta_B. \quad (3)$$

Как показывают полученные аналитические модели (2) и (3), инструментальные погрешности ультразвуковых измерительных каналов информационно-измерительной системы в значительной степени определяются погрешностями вычисления, в каналах которого определяются частоты  $f_1$  и  $f'_1$ ,  $f_2$  и  $f'_2$ ,  $f_3$  и  $f'_3$ ,  $f_4$  и  $f'_4$ , их разности  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_3$ ,  $\Delta f_4$  и реализации аналитических моделей вычисления  $V_B$ ,  $\beta$  и  $\alpha$ . При соответствующем выборе программного обеспечения указанные инструментальные погрешности будут

сравнительно малы. Используя результаты разработки двухкомпонентного комбинированного ультразвукового датчика скорости направления ветра LA-1647 [8], конструкция которого подобна панорамному ультразвуковому датчику аэродинамического угла и истинной воздушной скорости рассматриваемой информационно-измерительной системы, по инструментальным погрешностям датчика LA-1647 можно оценить инструментальную погрешность канала истинной воздушной скорости ультразвукового измерительного канала значением  $\Delta V_{B,i} \leq \pm 1,0$  км/ч, инструментальную погрешность канала угла скольжения в диапазоне  $\pm 180^\circ$  – оценить значением  $\Delta \beta_i \leq \pm 0,5^\circ$ , инструментальную погрешность канала угла атаки в диапазоне  $\pm 40^\circ$  – оценить значением  $\Delta \alpha_i \leq \pm 0,25^\circ$ .

**Аналитические модели и расчет инструментальных погрешностей высотно-скоростных измерительных каналов информационно-измерительной системы на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Как показано в работе [10], первичной информацией высотно-скоростного измерительного канала информационно-измерительной системы является статическое давление  $P_H$  на данной высоте полета  $H$ , воспринимаемой плиточным приемником на обтекаемой скользящим потоком поверхности.

Абсолютная (барометрическая) высота  $H$  информационно-измерительной системы определяется для высот до 11000 м аналитической моделью стандартной атмосферы вида [9, 10]

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right], \quad (4)$$

где  $T_0$  и  $P_0$  – абсолютная температура и давление на высоте  $H=0$ ;  $\tau$  и  $R$  – температурный градиент и газовая постоянная.

Инструментальная погрешность  $\Delta H_i$  измерения барометрической высоты обусловлена погрешностью  $\Delta P_H$  датчика абсолютного давления, вход которого связан с приемником статического давления, а выход подключен ко входу вычислителя, реализующего аналитическую модель (4) и определяющую высоту  $H$ .

Связь инструментальной погрешности  $\Delta H_i$  измерения барометрической высоты  $H$  и погрешности  $\Delta P_H$  датчика абсолютного давления определяется аналитической моделью вида

$$\Delta H_i = \frac{dH}{dP_H} \Delta P_H = -\frac{T_0 R}{P_0} \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{R\tau-1} \Delta P_H = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} \frac{1}{P_H^{1-\tau R}} \Delta P_H. \quad (5)$$

Подставляя численные значения  $T_0 = 288,15$  К,  $P_0 = 101325$  Па,  $\tau = 0,0065$  К/м,  $R = 29,27125$  м/К, выражение (5) приводится к виду

$$\Delta H_i = -935,738 \frac{1}{P_H^{0,809737}} \Delta P_H = -935,738 P_H^{0,190263} \delta P_H, \quad (6)$$

где  $\delta P_H$  – относительная погрешность датчика абсолютного давления.

Как показали расчеты, при полете в диапазоне высот от 0 до 7000 м статическое давление  $P_H$  изменяется от 101325 Па до 41105,3 Па и расчетное значения инструментальной погрешности канала измерения барометрической высоты изменяется от  $\Delta H_i = 0,838$  м до  $\Delta H_i = 0,712$  м. При использовании в качестве датчика абсолютного давления отечественных датчиков ДДГ, ДДЧП, ДДГМ [10], имеющих относительную среднеквадратическую погрешность  $\delta P_H = 0,01\%$ , максимальное значение канала барометрической высоты информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока будет определяться величиной  $\Delta H_{i\max} = \pm 3\sigma_{\Delta H_i} = \pm 2,5$  м.

При определении инструментальной погрешности канала приборной скорости рассматриваемой информационно-измерительной системы используется связь приборной  $V_{\text{пр}}$  и истинной воздушной  $V_B$  скорости вида [11]

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_{\text{в.}} \quad (7)$$

Тогда при известной инструментальной погрешности  $\Delta V_{\text{в.}}$  измерения истинной воздушной скорости ультразвукового измерительного канала инструментальная погрешность определения приборной скорости без учета погрешности вычислителя можно оценить аналитической моделью вида

$$\Delta V_{\text{пр и}} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} \Delta V_{\text{в.}} \quad (8)$$

После подстановки численных значений  $T_0$  и  $P_0$ , получим

$$\Delta V_{\text{пр и}} = \sqrt{0,284 \cdot 10^{-2} \frac{P_H}{T_H}} \Delta V_{\text{в.}} \quad (9)$$

Как показали расчеты, при значении инструментальной погрешности ультразвукового канала истинной воздушной скорости  $\Delta V_{\text{в.}} = \pm 1,0 \text{ км/ч}$  при значении барометрической высоты  $H=0$  инструментальная погрешность канала приборной скорости оценивается максимальным значением  $\Delta V_{\text{пр и max}} = \pm 3,7 \text{ км/ч}$ , при  $H=7000 \text{ м}$  – уменьшается до  $\Delta V_{\text{пр и max}} = \pm 2,56 \text{ км/ч}$ .

При определении инструментальной погрешности канала измерения числа Маха рассматриваемой информационно-измерительной системы воспользуемся связью числа Маха и истинной воздушной скоростью  $V_{\text{в}}$  вида [12]

$$M = \frac{V_{\text{в}}}{\sqrt{kgRT_H}} \quad (10)$$

Тогда в первом приближении аналитическую модель для определения инструментальной погрешности  $\Delta M_{\text{и}}$  канала числа  $M$  можно представить в виде

$$\Delta M_{\text{и}} = \frac{\partial M}{\partial V_{\text{в}}} \Delta V_{\text{в.}} + \frac{\partial M}{\partial T_H} \Delta T_{H\text{ и}} = \frac{1}{\sqrt{kgRT_H}} \Delta V_{\text{в.}} + \frac{V_{\text{в}}}{2\sqrt{kgR}} \Delta T_{H\text{ и}} \quad (11)$$

При подстановке численных значений входящих параметров, получим

$$\Delta M_{\text{и}} = \frac{0,04}{\sqrt{T_H}} \Delta V_{\text{в.}} + \frac{0,02V_{\text{в}}}{T_H} \Delta T_{H\text{ и}} \quad (12)$$

Используя полученные выше значения инструментальных погрешностей канала истинной воздушной скорости  $\Delta V_{\text{в.}} = \pm 1,0 \text{ км/ч}$  ( $\pm 0,3 \text{ м/с}$ ) и канала измерения температуры наружного воздуха  $\Delta T_{H\text{ и}} = \pm 1,0^\circ$ , расчетное значение инструментальной погрешности канала измерения числа Маха информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока при  $H=0$  и  $V_{\text{в}} = 50 \text{ км/ч}$  не превышает значение  $\Delta M_{\text{и}} = 6,6 \cdot 10^{-3}$ , при  $H=7000 \text{ м}$  и  $V_{\text{в}} = 800 \text{ км/ч}$  –  $\Delta M_{\text{и}} = 68 \cdot 10^{-3}$ .

Как показывает анализ, расчетные значения инструментальных погрешностей каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока в диапазоне высот от 0 до 7000 м и истинной воздушной скорости от 50 до 800 км/ч соответствуют современным требованиям без дополнительных мероприятий по повышению инструментальной точности измерительных каналов.

**Причины, аналитические модели и анализ методических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Причиной методических аэродинамических погрешностей определения воздушных сигналов, определяющих движение ЛА относительно набегающего воздушного потока

является отклонение воспринимаемого отверстием-приемником местного статического давления  $P_m$  от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока.

Из-за возмущения набегающего воздушного потока, вносимого движением и обтеканием фюзеляжа летательного аппарата, давление  $P_m$  в месте расположения отверстия-приемника на поверхности ультразвукового датчика отличается от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока на величину аэродинамического искажения  $\Delta P_a$  и определяется следующим образом:

$$P_m = P_H + \Delta P_a = P_H + K_p q; \quad \Delta P_a = K_p q, \quad (13)$$

где  $K_p = P_m/q$  – безразмерный коэффициент местного статического давления, в общем случае зависящий от скорости  $V_B$ , углов атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  ЛА и определяемый при летных испытаниях системы на конкретном типе ЛА для конкретного места установки ультразвукового датчика на всех характерных режимах полета.

Тогда барометрическая высота полета  $H_m$ , определяемая в измерительном канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов по давлению  $P_m$ , в соответствии со стандартной зависимостью [9] в диапазоне высот до 11000 м будет определяться по соотношениям

$$H_m = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_m}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] + \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = H + \Delta H_a, \quad (14)$$

$$\Delta H_a = \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{K_p \rho_H V_B^2}{2P_0} \right)^{\tau R},$$

где  $\Delta H_a = H_m - H$  – методическая аэродинамическая погрешность определения барометрической высоты из-за искажения статического давления на поверхности ультразвукового датчика при движении и обтекании фюзеляжа летательного аппарата.

В таблице приведены вычисленные по соотношениям (14) значения методической аэродинамической погрешности  $\Delta H_a$  канала измерения барометрической высоты информационно-измерительной системы воздушных сигналов при изменении значения безразмерного коэффициента местного статического давления от  $K_p = 0,05$  до  $K_p = 0,2$  для различных значений скорости и высоты полета.

При изменении коэффициента местного статического давления от регламентируемого нормами летной годности (НЛГС) самолетов значения [13]  $K_p = 0,05$  до  $K_p = 0,2$  расчетная методическая аэродинамическая погрешность  $\Delta H_a$  канала измерения барометрической высоты в диапазоне высот 0...7000 м при дозвуковых скоростях полета исследуемой системы изменяется от  $\Delta H_{a\ min} = 0,75...2,5$  м до  $\Delta H_{a\ max} = 2,9...4,8$  м.

$V_B$ , км/ч	$\Delta H_a$ , м											
	H=0			H=1000			H=3000			H=7000		
	$K_p$			$K_p$			$K_p$			$K_p$		
	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2
50	1,19	1,36	1,55	0,77	0,88	1,00	0,77	0,88	1,00	0,77	0,88	1,00
100	1,55	1,77	2,03	1,00	1,14	1,31	1,00	1,14	1,31	1,00	1,14	1,31
200	2,03	2,31	2,64	1,31	1,49	1,70	1,31	1,49	1,70	1,31	1,49	1,70
400	2,64	3,01	3,44	1,70	1,94	2,22	1,70	1,94	2,22	1,70	1,94	2,22
600	3,08	3,51	4,01	1,99	2,27	2,59	1,99	2,27	2,59	1,99	2,27	2,59
800	3,44	3,92	4,47	2,22	2,53	2,89	2,22	2,53	2,89	2,22	2,53	2,89

Отклонение местного статического давления  $P_m$ , воспринимаемого на обтекаемой поверхности панорамного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости,

от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока также является причиной методической аэродинамической погрешности канала приборной скорости информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.

Приборная скорость, вычисляемая по местному статическому давлению  $P_m$  в канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов, будет определяться соотношением

$$V_{\text{пр}}^{P_m} = \sqrt{2gRT_0 \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (P_H + \Delta P_a) + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} =$$

$$= \sqrt{2gRT_0 \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (1 + K_p) + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (15)$$

Тогда методическая аэродинамическая погрешность  $V_{\text{пр}}^{P_m}$  определения приборной скорости в месте установки ультразвукового датчика будет определяться выражением вида

$$\Delta V_{\text{пр}}^{P_m} = V_{\text{пр}}^{P_m} - V_{\text{пр}} = \sqrt{2gRT_0 \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (1 + K_p) + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} -$$

$$- \sqrt{2gRT_0 \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (16)$$

Расчетные значения аэродинамической погрешности  $\Delta V_{\text{пр}}^{P_m}$  канала приборной скорости информационно-измерительной системы воздушных сигналов, обусловленной отличием местного статического давления  $P_m$ , воспринимаемого на обтекаемой поверхности ультразвукового датчика, от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока (при регламентируемом нормами летной годности самолетов значении  $K_p = 0,05$  в диапазоне высот 0...7000 м и скорости полета от 50 до 800 км/ч изменяются от 1,26 км/ч до 28,188 км/ч, т.е. составляют примерно 0,16–3,5 % от величины истинной воздушной скорости. При увеличении  $K_p$  значения методической аэродинамической погрешности  $\Delta V_{\text{пр}}^{P_m}$  пропорционально увеличиваются.

Разработанный подход можно использовать и при оценке методической аэродинамической погрешности канала измерения числа Маха разрабатываемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов.

Полученные результаты позволяют обоснованно решать задачи обеспечения точности каналов измерения барометрической высоты, приборной скорости и числа Маха информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.

Разработаны технологии летных испытаний бортового оборудования самолетов, вертолетов и других летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений [14], в том числе технология определения методических аэродинамических погрешностей приемников воздушных давлений и систем измерения воздушных сигналов [15]. Использование указанных технологий позволит с достаточно высокой достоверностью определить систематические составляющие методических аэродинамических погрешностей в измерительных каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока на всех

характерных режимах полета с последующим их учетом в виде аэродинамических поправок, которые заносятся в память вычислителя и используются для коррекции систематических составляющих методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов разрабатываемой системы.

Случайные составляющие методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока оцениваются по результатам летных испытаний на конкретном типе летательного аппарата и учитываются аналогично другим типам систем воздушных сигналов летательного аппарата, в том числе реализацией принципов комплексирования [16, 17].

### Заключение

Таким образом, разработанные аналитические модели, проведенные расчеты и анализ инструментальных погрешностей измерительных каналов в рабочем диапазоне скоростей и высот полета свидетельствует о соответствии точности информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока современным требованиям.

Разработанные модели, полученные оценки и рассмотренные пути уменьшения составляющих методической аэродинамической погрешности измерительных каналов разрабатываемой информационно-измерительной системы, обусловленных искажением статического давления, воспринимаемого на обтекаемой скользящей поверхности ультразвукового датчика истинной воздушной скорости и аэродинамических углов атаки и скольжения позволяют обеспечить погрешности каналов измерения барометрической высоты, истинной воздушной и приборной скоростей, числа Maxa и других воздушных параметров близкими к погрешностям каналов традиционных информационно-измерительных систем воздушных сигналов на основе аэрометрического метода контроля параметров набегающего воздушного потока.

Один интегрированный неподвижный приемник первичной информации с частотными информативными сигналами, чисто электронная многоканальная измерительная схема и встроенный вычислитель, формирующий цифровые выходные сигналы существенно упрощают конструкцию, снижают массу и стоимость, расширяют область применения информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, в том числе на малоразмерных пилотируемых, беспилотных и дистанционно-пилотируемых ЛА различного класса и назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Г.А. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.В. Сильвестров. – М.: Транспорт. – 1992. – 272с.
2. Синяков А.Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками / А.Н. Синяков, Ф.А. Шаймарданов. – М.: Машиностроение. – 1991. – 320с.
3. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2001. – 448 с.
4. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509с.
5. Солдаткин В.М. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности: Учебное пособие / В.М. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 526с.
6. Мицхахов Б.И. Модели и анализ методических погрешностей панорамного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с неподвижным приемником и ультразвуковыми каналами / Б.И. Мицхахов, В.М. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин, В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2023. – № 1. – С. 110-114.
7. Мицхахов Б.И. Анализ точности электронной системы пространственного измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с неподвижным приемником набегающего потока / Б.И. Мицхахов, В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2023. – № 3. – С. 127-134.
8. Комбинированный ультразвуковой датчик скорости и направления ветра LA-1647 [Электронный ресурс]. Фирма ООО «Полтраф». Режим доступа: [https://poltraf.ru/hallyudateinye\\_stant\\_ii\\_kompleksy/datchiki\\_skorosti\\_napravleniya\\_vetra/ultrazvyk/la1647/](https://poltraf.ru/hallyudateinye_stant_ii_kompleksy/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/ultrazvyk/la1647/)

9. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартов. Параметры. М.: Изд-во Стандартов. 1981. 179 с.
10. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение. – 1981. – 344 с.
11. Системотехническое проектирование измерительно-вычислительных систем: Учебное пособие / под ред. проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2011. – 150с.
12. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов / Д.А. Браславский. – М: Машиностроение. – 1970. – 392 с.
13. Авиационные правила 4.25 Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М.: Издание Международного авиационного комитета. – 1994. – 321с.
14. Харин Е.Г. Технология летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений / Е.Г. Харин, И.А. Копылов. – М.: МАИ-ПРИНТ. – 2012. – 360с.
15. Пушкин С.Г. Технология определения аэродинамических погрешностей ПВД и воздушных параметров в летных испытаниях ЛА с использованием спутниковых средств измерений / С.Г. Пушкин, Е.Г. Харин, В.Р. Кожурин, В.Г. Захаров // ВИНИТИ. Информационный сборник «Проблемы безопасности полетов». – 2016. – Вып. 7. – С. 24-38.
16. Иванов Ю.П. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение. – 1984. – 208с.
17. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение. – 1976. – 312с.

**Ефремова Елена Сергеевна**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Доцент кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Профессор кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Владимир Михайлович**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Профессор кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

---

EFREMOVA E.S., SOLDATKIN V.V., SOLDATKIN V.M.

**MODELS AND ERROR ANALYSIS OF CHANNELS  
OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM  
OF AIR SIGNALS BASED ON THE ULTRASONIC METHOD  
OF MONITORING THE PARAMETERS OF THE INCOMING FLOW**

**Abstract.** The importance of information on the air parameters of the aircraft movement relative to the surrounding air environment in solving the tasks of piloting, automatic control and traffic safety, including small-sized aircraft, which are becoming more widely used and developed, was noted. At the same time, the complexity of the design, the significant weight and cost of traditional aircraft and other aviation equipment information and measurement systems of air signals with receivers and sensors distributed over the fuselage of information about the parameters of the incoming airflow associated with the on-board computer limits their use on small-sized aircraft of various classes and purposes, which determines the prospects of the information and measurement system based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming air flow with one integrated fixed receiver of primary information in the form of frequency informative signals processed in the built-in.

The reasons are considered, analytical models are developed, calculation and analysis of compliance with modern requirements of instrumental errors of channels of the information and measurement system of air signals based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming air flow due to the error of the absolute pressure sensor used, the error of the channels of isolation and conversion of frequency informative signals, as well as the error of calculation. It is shown that the instrumental errors of the measuring channels of the considered system when choosing a domestic absolute pressure sensor, the element base of ultrasonic measuring channels and an integrated computer meet the requirements without additional measures to reduce them.

The methodology is disclosed, analytical models are obtained, calculation and analysis of methodological aerodynamic errors of the measuring channels of the considered information and measurement system of air signals due to distortion of the undisturbed incoming air flow during aircraft movement and flow around the fuselage with an integrated receiver located on its surface is carried out. Effective ways of reducing the systematic and random components of the methodological errors of the measuring channels of the system under consideration are proposed.

*The results obtained confirm the competitive advantages of using an information and measurement system of air signals based on an ultrasonic method for monitoring the parameters of the incoming air flow on small-sized aircraft of various classes and purposes.*

**Keywords:** aircraft, movement, air signals, information and measurement system, control, incoming flow, ultrasonic method, errors, instrumental, methodological, analytical models, calculation, analysis, reduction.

## BIBLIOGRAPHY

1. Filatov G.A. Bezopastnost poletov v vozmychennou atmosphere / G.A. Filatov, G.S. Pyminova, P.V. Silvestrov. – M.: Transport. – 1992. – 272s.
2. Sinaykov A.N. Sistemy avomaticeskogo upravlenua LA i ix silovymi ustankovkami / A.N. Sinaykov, F.A. Shaimardanov. – M: Mashinostroyeniye. – 1991. – 320s.
3. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatelnyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2001. – 448 s.
4. Kljuev. G.I. Izmeritelni dinamicheskih parametrov letatelnyh apparatov / G.I. Kljuev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin, I.P. Efimov: Uchebnoe posobie. Uljanovsk: Izd-vo Uljanovsk. gos. tehn. un-t, 2005. – 590 s.
5. Soldatkin V.M. Aviationnye pribory, izmeritelbo-vicheslitelnye sistemy I kompleksy: Printipsy postroenia, algoritmy obrabotki informatsie, xarakteristiki i pogrechosti: Uchebnoe posobie / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. un-ta. – 2014. – 526s.
6. Miftchachov B.I. Modeli i analiz metodicheskix pogrechnostey panoramnogo datchika ajerodinamicheskogo ugla i vozduzhnoj skorosti s nepodviznim priemnikom i ultrazvukovymi kanalami / B.I. Miftchachov, V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Izvestia vyzov. Avictionnay technika. – 2023. – № 1. – S. 110-114.
7. Miftchachov B.I. Analyz tochnosti elektronnoy sistemy prostranstvennogo izmerenija vozduzhnyx parametrov letatelnogo appara s nepodviznim priemnikom nabegaucheego notoka / B.I. Miftchachov, V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Izvestia vyzov. Avictionnay technika. – 2023. – № 3. – S. 127-134.
8. Kombinirovannuy ultrazvukovoy datchik skorosti i napravleniy vетra LA-1647 [Electronnuy resyrs]. Firma OOO «Poltraf». Rezim dostupa: [https://poltraf.ru/hallyudatelnye\\_stant\\_ii\\_kompleksy/datchiki\\_skorosti\\_napravleniya\\_vetra/ultrazvyk/la1647/](https://poltraf.ru/hallyudatelnye_stant_ii_kompleksy/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/ultrazvyk/la1647/)
9. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov. – 1981. – 179s.
10. Bodner V.A. Pribozy pervechnoy informactie / V.A. Bodner. – M: Mashinostroyeniye. – 1981. – 344 s.
11. Sistemotchnicheskoe proektirovanie izmeritelno-vycheslitelnyx system: Uchebnoe posobie / pod red. prof. V.M. Soldatkina. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2011. – 150 s.
12. Braslavskiy D.A. Pribozy i datchiki letatelnogo appara / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1970. – 392s.
13. Aviacionnye pravila 4.25 Normy letnoi godnosti samoletov transportnoy kategorii. – M.: Izdanue Mezdynarodnogo aviacionnogo komiteta. – 1994. – 321 s.
14. Xarin E.G. Technologuy letnix isputaniy bortovogo oborudovania letatelnix apparatov s primeneniem kompleksa bortovyx traektornyx izmereniy / E.G. Xarin, I.A. Kopylov. – M.: MAI-PRINT. – 2012. – 360 s.
15. Pushkov S.G. Texnologya aerodinamicheskix pogrechnostey PVD i vozduhnix parametrov v letnix ispitaniyax LA s ispolzovaniem spetnikovuix sredstv izmereniu / S.G. Pushkov, E.G. Xarin, V.R. Kozurin, V.G. Zaxarov // VINITI. Informachionny sbornik «Problemy bezopastnosti poletov». – 2016. – Vup. 7. – S. 24-38.
16. Ivanov Ju. P. Kompleksirovanie informacionno-izmeritelnyx ustroystv letatelnix apparatov / Ju. P. Ivanov, A.N. Sinuakov, I.V. Filatov. – L.: Mashinostroyeniye. – 1984. – 208 s.
17. Braslavskiy D.A. Tochnost izmeritelnix ustroystv / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1976. – 312 s.

### Efremova Elena Sergeevna

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: soldatkina1991@bk.ru

### Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: w-soldatkin@mail.ru

### Soldatkin Vladimir Mikhailovich

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: w-soldatkin@mail.ru

ЩЕГЛОВ Д.К.

## МОДЕЛЬ КОМПРОМИССНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

**Аннотация.** В статье подчеркивается актуальность решения вопросов, связанных с организацией высокотехнологичного производства в условиях санкционных ограничений. Основное внимание уделяется противоречиям в целях управления процессами импортозамещения на уровне предприятий, отраслей (интегрированных структур) и государства. Предложены матрицы противоречий для внутренних и внешних целей импортозамещения для различных уровней управления. На основе предложенных матриц рассчитано число возможных вариантов одновременного проявления различных противоречий, характерных для организации промышленного производства в условиях санкционных ограничений. Представлена формализованная постановка задачи импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета в рамках предприятия высокотехнологичной промышленности. Приведен вариант формализованного описания процесса компромиссного управления множеством противоречивых целей, в том числе целей импортозамещения, в процессе организации промышленного производства.

**Ключевые слова:** модель, компромиссное управление, импортозамещение, технологический суверенитет, высокотехнологичная продукция, организация производства.

### Введение

В современном мире технологии играют огромную роль в развитии экономики и общества. При этом представляется очевидным, что рациональное использование преимуществ мирового технологического прогресса предполагает непременное обеспечение технологического суверенитета государства, означающее способность государства создавать, контролировать и использовать развитые технологии самостоятельно, независимо от других стран и глобальных корпораций.

Для Российской Федерации вопрос технологического суверенитета является одним из наиболее важных. Проблема зависимости российской экономики от импорта начала обсуждаться в научных и правительственные кругах еще в 1990-х годах, а в 2014 году после введения США, Евросоюзом и рядом других стран ограничений на поставку высокотехнологичной продукции, в том числе станков и оборудования, программного обеспечения, электронной компонентной базы руководство страны официально объявило о стратегии импортозамещения. Так, 4 августа 2015 года на заседании Правительства РФ было принято решение о создании Правительственной комиссии по импортозамещению [1, 2], деятельность которой направлена на замену импортируемых товаров аналогами, производимыми внутри страны, с целью снижения зависимости от импорта и стимулирования развития собственного производства. При этом вопросы импортозамещения являются особо актуальными на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, обеспечивающего производство высокотехнологичной продукции в интересах национальной безопасности страны.

Однако, несмотря на значительные технологические достижения, наша страна все еще сильно зависит от импорта техники и технологий. В условиях жестких санкционных ограничений, не связанных с рыночными механизмами и противоречащих логике развития мировой экономики, а также повышения востребованности продукции военного назначения, необходимо предпринять решительные шаги для поддержки критически важных секторов народного хозяйства [3]. Это подчеркивает сложность обеспечения технологического суверенитета и необходимость применения системного подхода к поддержанию существующих и созданию новых высокотехнологичных производств.

### 1 Обеспечение технологического суверенитета как поиск компромисса между противоречивыми целями

В настоящее время вопросы обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета ставятся и решаются на различных уровнях, в том числе на уровне предприятий российской промышленности, различных отраслей экономики и государственных структур. При этом на каждом из этих уровней процессы управления направлены на достижение конкретных целей, что подразумевает разрешение как внутренних, так и внешних организационных и технических противоречий. Таким образом, вопросы организации

высокотехнологичного производства целесообразно рассмотреть в контексте решения задачи управления множеством противоречивых целей на различных уровнях.

Одним из наиболее эффективных инструментов управления целями в организационных системах является подход Ч. Черчмена и Р. Акоффа, известный как «дерево» целей [4]. Он заключается в формировании графической диаграммы иерархии целей, в которой общие стратегические цели декомпозируются на более конкретные подцели, а затем на еще более детализированные. Это позволяет выявить естественные противоречия в целях различных уровней для системного понимания взаимосвязей между ними.

Постановка задачи исследования включает в себя три взаимодействующих объекта: промышленное предприятие, отрасль (или интегрированная структура) и государство, которые представим в виде вектора  $\vec{A} = (A_1, A_2, A_3)$ .

В философских категориях исследуемые объекты  $A_1, A_2, A_3$  и их взаимодействия подчиняются закону единства и борьбы противоположностей, из чего следует, что динамика их состояний определяется балансом достижимости разнородных целей взаимодействующих элементов системы. Например, каждое предприятие в процессе своего функционирования и развития осуществляет согласование противоречивых устремлений для достижения комплекса целей. Противоречия могут быть внутренними, связанными с различиями в целеполагании структурных подразделений, а также внешними, связанными с конкуренцией с другими предприятиями, стремлением к повышению автономности и снижению регулирования со стороны отрасли и государства. Подобные противоречия можно выявить и в отношении других элементов объекта исследования.

Вариант формулировки внутренних противоречий между целями импортозамещения предприятия, отрасли и государства представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Противоречия между внутренними целями импортозамещения предприятия, отрасли (или интегрированной структуры) и государства

$(A_1, A_1)^*$	$(A_2, A_2)^*$	$(A_3, A_3)^*$
Противоречие между необходимостью выполнения работ и поставки продукции требуемого качества в необходимом количестве в установленные сроки	Противоречие между потребностью в обеспечении в долгосрочной перспективе рынка и государства продукцией требуемого качества в необходимом объеме	Противоречие между стремлением к полной независимости и автономии в производстве ключевых товаров и услуг для обеспечения высокого уровня жизни граждан и национальной безопасности
и организацией новых производственных мощностей или налаживания оперативных поставок качественной импортозамещающей элементной базы	и необходимостью обеспечения требуемого технологического уровня отраслевой продукции в условиях санкционных ограничений	и необходимостью привлечения иностранных инвестиций, передовых технологий и международного опыта для ускоренного развития и конкурентоспособности на мировой арене

Основываясь на идее «дерева» целей и методе попарных сравнений Т. Саати [5], построим матрицу внешних противоречий по целям, охватывающим интересы предприятий промышленности, отраслей и государства. Для этого каждому элементу прямого произведения вектора  $\vec{A}$  на самого себя поставим в соответствие противоречие  $q_{ij}$ , то есть

$A \otimes A \xrightarrow{\Delta} Q$ ,  $\Delta: (A_i, A_j) \rightarrow q_{ij}$ , где  $(A_i, A_j) \in A \otimes A$ ,  $q_{ij} \in Q$ ,  $i, j = \overline{1, m}$ . Полученное отображение формирует матрицу внешних противоречий  $\|Q_{out}\|$ , вариант построения которой, в контексте обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета российской промышленности, представлен в таблице 2.

Из анализа таблицы 2 следует, что совокупность внешних противоречий представлена квадратной обратно симметричной матрицей  $\|Q_{out}\|$  (таблицей). Эта матрица обладает следующими свойствами:  $q_{ij} = 1 \vee 0$  (в рамках булевой алгебры),  $q_{ij} = 1/q_{ji}$  (над главной диагональю расположены прямые утверждения, а под – обратные),  $q_{ik} \cdot q_{kj} = q_{ij}$ . Представленные противоречия подчеркивают важность поиска компромиссов для согласования интересов и целей на разных уровнях при организации высокотехнологичного промышленного производства в условиях санкционных ограничений.

Таблица 2 – Противоречия между внешними целями импортозамещения предприятия, отрасли (или интегрированной структуры) и государства

$(A_i, A_j)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	Противоречие между стремлением к увеличению производственных мощностей, снижением затрат на покупные изделия, зависимости от импорта	Противоречие между стремлением предприятий к максимизации своей выгоды через использование импортных комплектующих и технологий	Противоречие между стремлением предприятий к увеличению доли рынка и максимизации прибыли, включая использование импортных технологий и компонентов
	и необходимостью поддержания высокого качества продукции, необходимостью инвестиций в создание и постановку на производство собственных комплектующих	и необходимостью устойчивого развития внутренних отраслевых ресурсов, повышения эффективности управления ресурсами и конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках	и уменьшением зависимости государства от импорта и обеспечения технологической безопасности национальной экономики
$A_2$	Противоречие между стремлением отрасли к формированию общих стратегических направлений, повышению прозрачности деятельности предприятий	Противоречие между наличием конкуренции за доступ к государственному финансированию, стремлением к максимизации прибыли от продажи выпускаемой отраслью продукции	Противоречие между стремлением каждой из отраслей к диверсификации деятельности, расширению мер государственной поддержки, увеличению доли экспорта выпускаемой продукции
	и стремлением предприятий к большей гибкости и автономии в вопросах реализации и планирования производственно-хозяйственной деятельности	и необходимостью консолидации усилий для выпуска качественной отраслевой продукции	и необходимостью обеспечения межотраслевого баланса, равномерного развития и конкуренции между отраслями
$A_3$	Противоречие между стремлением государства к усилению регулирования деятельности предприятий в части соблюдения стандартов безопасности, качества и социальной ответственности	Противоречие между необходимостью консолидации усилий отраслей для сокращения зависимости от импорта, созданием защищенного от импорта рынка, увеличением устойчивости национальной экономики	Противоречие между стремлением к ослаблению зависимости от импорта, ограничением на поставку комплектующих и технологий зарубежного производства
	и стремлением предприятий к сокращению издержек и максимизации своей выгоды, в том числе за счет использования импортных комплектующих и технологий	и необходимостью сохранения внутренней конкуренции и высокого качества межотраслевой продукции	и необходимостью соблюдения обязательств по международным торговым соглашениям, а также необходимостью обмена знаниями и технологиями

Противоречия представляют собой потенциальные вызовы, изучение динамики проявления которых позволяет выявить периоды, когда уровень противоречий не является критическим и не требует принятия специальных мер для их разрешения. На других временных интервалах необходимо обеспечить разрешение противоречий, что требует рационального расходования усилий с учетом критичности возможных последствий. В случае одновременного проявления нескольких противоречий, анализ последствий и разработка методического инструментария для их разрешения становятся более сложными.

Оценим объем исследований на основе возможных сценариев проявления противоречий.

Представленные в таблицах 1 и 2 противоречивые цели образуют множество из двенадцати элементов ( $n=12$ ). Если рассматривать только сценарии, в которых каждый элемент из этого множества проявляется однократно, то в рамках статического анализа, когда состав вектора противоречий неизменен, число вариантов сценариев равно числу перестановок. В противном случае, если порядок проявления противоречий имеет значение, то число вариантов равно числу размещений, иначе – сочетаний. Соответственно число всех сочетаний из  $n$  по  $m$ , где  $m = \overrightarrow{1, n}$  – число одновременно проявившихся противоречий, определяется формулой [6]:

$$S = C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!},$$

и вычисляется как

$$S = \sum_{m=1}^{12} C_{12}^m = \sum_{m=1}^{11} \frac{12!}{m!(12-m)!} + 1 = 4095. \quad (1)$$

Полученное из формулы (1) значение характеризует число возможных вариантов одновременного проявления различных противоречий, что позволяет утверждать о значительной трудоемкости задачи исследования их влияния на процессы и результаты деятельности предприятий промышленности в рамках системы ведомственных и межведомственных взаимодействий.

Существуют различные подходы к решению задачи управления сложными процессами, включающими противоречивые цели и множественные интересы, в том числе подход Парето [7], принцип равновесия Нэша [8] и метод последовательных уступок [9]. Анализ областей применимости этих подходов с учетом сложности, комплексности, масштабности и иерархичности задачи импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета позволяет сделать заключение о целесообразности разработки модели компромиссного управления для формирования приемлемого сценария разрешения выявленных организационных противоречий. При этом под **компромиссным управлением** будем понимать подход к выработке приемлемых организационных решений, обеспечивающий достижение устойчивого баланса между противоречивыми целями участников, при котором ни одна сторона не может улучшить свое положение, не ухудшив положение других, что требует взаимных уступок для достижения всеми сторонами наилучшего возможного результата в рамках согласованных ограничений. Поскольку условия внешней среды могут изменяться, то модель управления должна быть гибкой, предполагая регулярный мониторинг степени достижения целей и возможность корректировки компромиссных решений.

## 2 Особенности управления процессами импортозамещения

Рассмотрим подходы к управлению процессом импортозамещения в контексте разрешения внутреннего противоречия  $(A_1, A_1)^*$  применительно к высокотехнологичному машиностроительному предприятию.

Ретроспективный анализ подходов к управлению сложными производственными системами позволяет заключить, что традиционно они развивались в рамках теории автоматизированного управления и теории организации производства (или организационного управления). Теория автоматизированного управления стремится к оптимизации производственных процессов и снижению влияния человеческого фактора, разработке и применению автоматических систем и информационных технологий, обеспечивающих повышение эффективности управления производственными процессами. В то время как теория организационного управления уделяет особое внимание развитию методов управления организационными структурами и стимулирования работников, подчеркивая важность человеческого фактора в организации промышленного производства.

Несмотря на различия в подходах теория автоматизированного управления и теория организации производства оказали сильное влияние на современные методы и практики управления промышленным производством. Очевидно, что теории и методы управления средствами и силами (людьми) принципиально различаются в сущности управляемых объектов, но они имеют и общие принципы, которые могут быть использованы для объединения различных подходов к управлению в единую модель, подчиненную общему замыслу.

С точки зрения теории автоматизированного управления формальную постановку задачи импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета можно представить следующим образом. Пусть заданы вектор цели импортозамещения  $\vec{G}(t)$  и вектор текущего состояния  $\vec{S}(t)$ . Если компоненты этих векторов оценить количественно, то вектор ошибки  $\vec{E}(t)$ , который можно интерпретировать как вектор частных противоречий, можно определить как  $\vec{E}(t) = \vec{G}(t) - \vec{S}(t)$ . Тогда цель управления  $C_{man}$  можно представить следующим выражением:

$$C_{man} : \min \sum_{j=1}^N E_j(t), \quad (2)$$

где  $j = \overline{1, N}$ ,  $N$  – размерность (число элементов) векторов  $\vec{G}(t)$ ,  $\vec{S}(t)$  и  $\vec{E}(t)$ .

Как правило, можно выполнить приоретизацию целей, задав вектор их значимости  $\vec{W}(t)$ . Тогда выражение (2) можно записать как

$$C_{man} : \min \sum_{j=1}^N W_j(t) \cdot E_j(t).$$

Рассмотренный подход позволяет количественно оценить отклонение системы от ее целевого состояния, однако он не является компромиссным, поскольку не учитывает когнитивных эффектов при формировании векторов цели и управления, а также не подразумевает наличия допустимых уступок по результативности достижения одних целей в пользу других.

Таким образом, теория автоматизированного управления концентрируется на установлении взаимосвязи между уровнем управляющего воздействия и изменениями в состоянии управляемого объекта. В случае, если эта связь не является строго детерминированной, то организуется система контроля параметров состояния объекта для формирования управляющих воздействий. Если поступающие данные зашумлены или поступают с задержкой, управление строится на основе сглаживания и фильтрации зашумленных данных, а также прогнозирования состояния объекта с использованием методов экстраполяции временных рядов.

Однако, при создании систем управления силами (людьми) такая модель оказывается недостаточно состоятельной. Это связано с тем, что методы организационного управления учитывают возможность неправильной интерпретации корректно передаваемых управляющих воздействий непреднамеренно или умышленно из-за неправильного понимания (неверной интерпретации) содержания или несоответствия полученных указаний собственным интересам или планам исполнителей.

С точки зрения теории организационного управления формальную постановку задачи импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета можно представить в рамках верbalного подхода, пример которого приведен в таблице 3.

Рассмотренный подход позволяет подробно описать проблемную ситуацию и сформировать меры по переводу системы из состояния «как есть» в состояние «как должно быть». Однако он является стохастическим и базируется на качественной, а в ряде случаев еще и субъективной, оценке целей, текущего состояния системы и управляющих воздействий. В таких условиях многое зависит от опыта специалистов, привлекаемых в качестве экспертов (или аналитиков) и интуиции руководителей. При этом такой подход к управлению часто носит компромиссный, хоть и не формализованный характер. Тем не менее, компоненты условных векторов (см. таблицу 3) могут быть оценены количественно для более строго научного обоснования принимаемых управленческих решений.

Таблица 3 – Пример верbalного описания подхода к управлению процессами импортозамещения

Вектор целей (что хочу)	Вектор состояния (что имею)	Вектор ошибки (чего не хватает, что не так)	Вектор управления (что надо сделать)
1. Обеспечить импортозамещение используемой электронной компонентной базы (ЭКБ)	Применяется преимущественно импортная ЭКБ	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие стратегии импортозамещения;</li> <li>– слабые компетенции специалистов;</li> <li>– отсутствие механизмов сбыта ЭКБ;</li> <li>– низкая эффективность организации и выполнения работ (большие затраты ресурсов)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разработать программу импортозамещения ЭКБ;</li> <li>– повысить компетенции специалистов в области импортозамещения ЭКБ;</li> <li>– создать систему сбыта импортозамещающей ЭКБ;</li> <li>– оптимизировать систему организации и выполнения работ</li> </ul>
...	...	...	...
N. Использовать отечественное программное обеспечение (ПО)	Применяется преимущественно импортное ПО	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие стратегии импортозамещения ПО;</li> <li>– отсутствие показателей импортозамещения ПО</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разработать программу импортозамещения применяемого ПО;</li> <li>– определить критерий уровня импортозамещения ПО</li> </ul>

Таким образом, проведенный анализ позволяет предположить, что подход к компромиссному управлению может быть найден на стыке теории автоматизированного управления и теории организации производства (или организационного управления).

Рассмотрим один из возможных вариантов постановки задачи компромиссного управления процессами импортозамещения на уровнях государства, отрасли промышленности (или интегрированной структуры) и предприятия промышленности.

Введем обозначение показателя результативности импортозамещения  $p_i^{jk}$ , где  $p_i^{jk} \in P^k$ ,  $P^k \subseteq P$ . В рамках введенного обозначения:

$k = \overrightarrow{1, L}$  – индекс отрасли ( $L$  – число отраслей),

$j = \overrightarrow{1, M_k}$  – индекс предприятия ( $M_k$  – число предприятий в  $k$ -ой отрасли,  $M = \sum_{k=1}^L M_k$  – общее число предприятий),

$i = \overrightarrow{1, N_k}$  – индекс показателя результативности импортозамещения ( $N_k = |P^k|$  – число целевых показателей  $k$ -ой отрасли).

Введем допущение, что показатели импортозамещения государства и отрасли агрегируют в себя соответствующие  $i$ -ые показатели импортозамещения предприятий промышленности  $p_i^{jk}$ .

Пусть на уровне государства приняты плановые значения показателей результативности импортозамещения  $\bar{p}_i$  с приоритетами  $a_i$ , где  $\sum_{i=1}^{N_k} a_i = 1$ .

Тогда целевую функцию импортозамещения на уровне государства можно представлять, как минимизацию отклонений фактических показателей от плановых, то есть

$$f_1(P) = \sum_{i=1}^{N_k} a_i \left\| \bar{p}_i - \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk} \right\| \rightarrow \min. \quad (3)$$

На уровне  $k$ -ой отрасли приняты свои плановые значения показателей результативности импортозамещения  $\bar{p}_i^k$  с приоритетами  $b_i$ , где  $\sum_{i=1}^{N_k} b_i = 1$ .

Тогда целевую функцию импортозамещения на уровне отрасли можно представлять следующим образом

$$f_2(P) = \sum_{i=1}^{N_k} b_i \left\| \bar{p}_i^k - \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk} \right\| \rightarrow \min. \quad (4)$$

На уровне  $j$ -го предприятия  $k$ -ой отрасли приняты свои плановые значения показателей результативности импортозамещения  $\bar{p}_i^{jk}$  с приоритетами  $c_i$ , где  $\sum_{i=1}^{N_k} c_i = 1$ .

Тогда целевую функцию импортозамещения на уровне предприятия можно представлять следующим образом

$$f_3(P) = \sum_{i=1}^{N_k} c_i \left\| \bar{p}_i^{jk} - p_i^{jk} \right\| \rightarrow \min. \quad (5)$$

С учетом изложенного задача поиска компромиссного решения сводится к минимизации векторной целевой функции импортозамещения  $F(P)$ , которая включает целевые функции (3 – 5) импортозамещения на уровнях государства, отрасли и предприятия:

$$F(P) = \{f_1(P), f_2(P), f_3(P)\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} P &\in D, \\ p_i^{jk(\min)} &\leq p_i^{jk} \leq p_i^{jk(\max)}, \\ p_i^{k(\min)} &\leq \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk} \leq p_i^{k(\max)}, \\ p_i^{(\min)} &\leq \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk} \leq p_i^{(\max)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $D$  – область допустимых решений, а  $p_i^{jk(\min)}$ ,  $p_i^{jk(\max)}$ ,  $p_i^{k(\min)}$ ,  $p_i^{k(\max)}$ ,  $p_i^{(\min)}$ ,  $p_i^{(\max)}$  – ограничения, накладываемые на значения показателей импортозамещения предприятия, отрасли и государства соответственно.

В рамках предлагаемой постановки задачи целевые функции (3 – 5) уже упорядочены по убыванию важности, что позволяет сразу применить метод последовательных уступок к решению задачи (6).

На первом шаге решается задача поиска оптимальных параметров, соответствующих минимальному значению первой целевой функции:

$$f_1(P) \rightarrow \min,$$

при ограничениях (7).

На втором шаге задается допустимое отклонение (уступка)  $\Delta_1 > 0$  по значению первой целевой функции от ее оптимального значения  $f_1(P^*)$  и решается задача поиска оптимальных параметров, соответствующих минимальному значению второй целевой функции при условии, что отклонение значения первой целевой функции от ее оптимального значения не превышает величину принятой уступки:

$$\begin{aligned} f_2(P) &\rightarrow \min, \\ f_1(P) &\leq f_1(P^*) + \Delta_1, \end{aligned}$$

при ограничениях (7).

На третьем шаге задается допустимое отклонение (уступка)  $\Delta_2 > 0$  по значению второй целевой функции от ее оптимального значения  $f_2(P^*)$ . Уступки  $\Delta_2$  и  $\Delta_1$  используется при решении задачи поиска оптимальных параметров, соответствующих минимальному значению третьей целевой функции:

$$\begin{aligned} f_3(P) &\rightarrow \min, \\ f_1(P) &\leq f_1(P^*) + \Delta_1, \\ f_2(P) &\leq f_2(P^*) + \Delta_2, \end{aligned}$$

при ограничениях (7).

В качестве дополнения или альтернативы методу последовательных уступок можно использовать принцип Нэша, основанный на критерии максимизации общего выигрыша всех участников. Для этого целевые функции (3 – 5) модифицируются с использованием мультиплекативного показателя, отражающего совокупный эффект.

Например, выражение (3), описывающее целевую функцию на уровне государства, можно записать в следующем виде:

$$f_1^*(P) = \prod_{i=1}^{N_k} \left( 1 - \frac{\check{p}_i - \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk}}{\check{p}_i} \right) \rightarrow \max$$

или

$$f_1^*(P) = \prod_{i=1}^{N_k} e^{-\left( \check{p}_i - \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} p_i^{jk} \right)} \rightarrow \max.$$

Разумеется, реализация описанного подхода на практике требует продолжения исследований в рассматриваемой предметной области. При этом важно отметить, что поиск компромиссов при решении задачи импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета особенно актуален для высокотехнологичных предприятий и отраслей российской промышленности, которые значительно зависят от импортных технологий, поставок электронной компонентной базы, программного обеспечения, оборудования, сырья и материалов. В настоящее время эта зависимость наиболее ярко выражена в таких секторах экономики, как машиностроение, авиастроение, судостроение, автомобилестроение, нефтегазовая отрасль, ракетно-космическая промышленность, а также в медицине и фармацевтической индустрии, где используется импортная микроэлектроника и полупроводниковая техника.

На рисунке 1 приведен пример формализованного описания процесса компромиссного управления целями в виде контекстной функциональной модели IDEF0 (диаграммы уровня A1) с «точки зрения» руководителя промышленного предприятия. Функциональная модель построена в соответствии с рекомендациями по стандартизации Р 50.1.028-2001 [10].

На рисунке 1 представлены типовые процессы управления множеством противоречивых целей, взаимосвязи между ними, входные данные, управляющие воздействия, потребные ресурсы и результаты выполнения процессов. Как видно из рисунка, к типовым процессам управления множеством противоречивых целей относится:

- анализ среды и идентификация целей – выявление, изучение и притиризация внутренних и внешних целей, а также связанных с ними противоречий;
- формирование стратегии управления – разработка стратегии, которая ориентирована на разрешение противоречий по целям и достижение компромиссного результата. Учет множества факторов, включая экономические, технологические, кадровые и т.д.;
- разработка плана мероприятий – определение конкретных шагов и мероприятий, направленных на решение противоречий и достижение целей. Разработка

долгосрочных и краткосрочных планов реализации мероприятий, определение показателей их результативности;

- ресурсное обеспечение – выделение (аллокация) необходимых ресурсов для реализации стратегии, включая финансовые, человеческие и технологические ресурсы;
- реализация мероприятий, мониторинг и контроль – реализация разработанных планов мероприятий, мониторинг выполнения поставленных задач и оперативное управление, включая предупреждающие и корректирующие действия;
- оценка результатов и выработка корректирующих действий – проведение оценки достижения поставленных целей с использованием ключевых показателей. Анализ результативности разработанных мероприятий и корректировка стратегии управления.

Следует подчеркнуть, что разрешение противоречий по целям является важной составляющей при решении разнообразных практических задач [11-15]. При этом предлагаемые выше рассуждения могут послужить основой для разработки методики разрешения противоречий и управления целями в различных областях науки и техники.

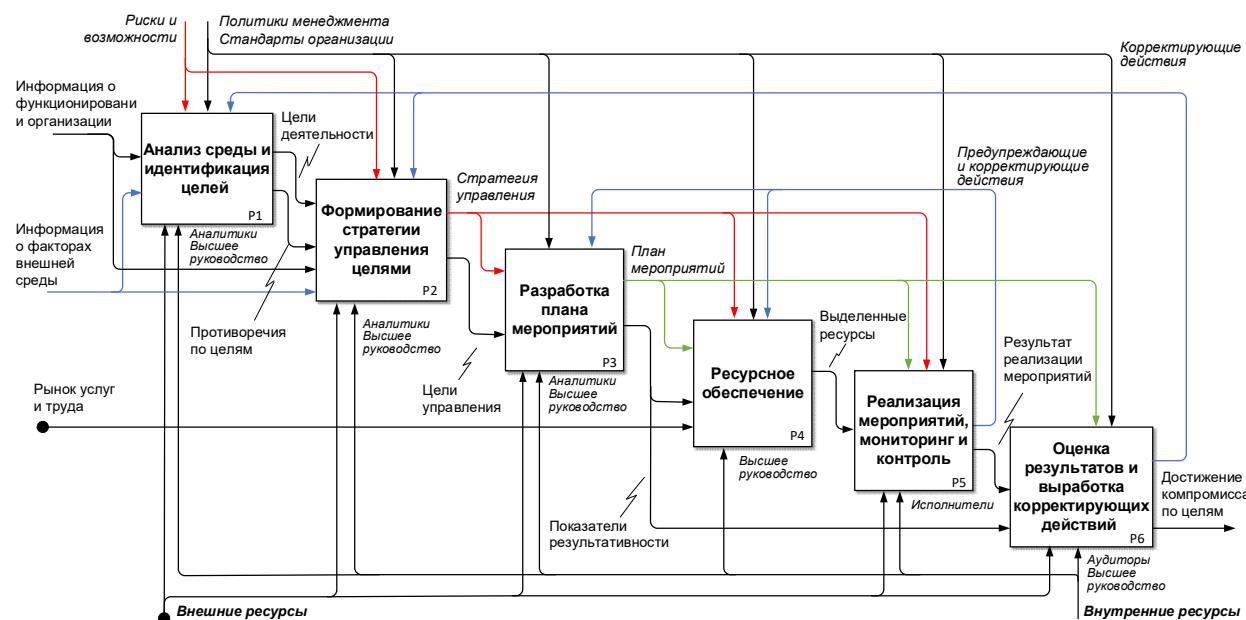


Рисунок 1 – Формализованное описание типового процесса управления целями (вариант)

### Заключение

Обеспечение бесперебойного выпуска качественной продукции является в настоящее время главной задачей большинства российских предприятий высокотехнологичной промышленности, прежде всего работающих в структуре Государственного оборонного заказа. При этом в условиях введенных санкционных ограничений на поставку материалов и комплектующих зарубежного производства, когда предприятия должны не только обеспечить выпуск наукоемкой продукции в требуемом объеме, надлежащего качества и в установленные сроки, но и сохранить свою конкурентоспособность и инновационность, вопросы обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета приобретают особую актуальность.

В предлагаемом исследовании приведена постановка задачи разрешения противоречий в целях управления процессами импортозамещения на уровне предприятий, отраслей и государства, решение которой будет способствовать выработке компромиссных организационных решений с учетом всех выявленных противоречий для повышения технологической независимости и конкурентоспособности всех субъектов экономической деятельности за приемлемое время. Выполнено оценивание объема исследований на основе определения многообразия сценариев проявления противоречий, способствующее более глубокому пониманию проблемной ситуации, выработке подходов к обоснованию выбора приемлемых стратегий управления импортозамещением, а также достижению технологического суверенитета через учет всех возможных вариантов развития ситуации.

Для снижения вероятности реализации неблагоприятных сценариев проявления конфликтующих целеполаганий участников масштабных процессов промышленного производства систематизированы и проанализированы внутренне и внешне противоречивые иерархически выстроенные цели. На основе полученной систематизации предложен подход к

импортозамещению и вариант формализованного описания типового процесса управления целями импортозамещения, позволяющий координировать противоречивые цели управления, адаптировать стратегии импортозамещения под изменяющиеся внешние условия для достижения баланса между качеством, затратами и скоростью внедрения отечественных технологий.

Введено понятие компромиссного управления как подхода к выработке организационных решений, обеспечивающего достижение устойчивого баланса между противоречивыми целями участников, при котором ни одна сторона не может улучшить свое положение, не ухудшив положение других, что требует взаимных уступок для достижения всеми сторонами наилучшего возможного результата в рамках согласованных ограничений. Введенное понятие позволяет переосмыслить постановку задачи импортозамещения и достижения технологического суверенитета с учетом интересов российских предприятий высокотехнологичной промышленности, отраслей и государственных структур для обеспечения гибкости управления этими процессами в условиях быстро меняющихся факторов внешней и внутренней среды. Кроме того, предложенная последовательность действий по достижению компромисса в условиях конфликта целей может послужить основой для разработки методики разрешения противоречий при решении управленческих задач в различных областях науки и техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление правительства РФ от 04.08.2015 №785 «О создании правительственной комиссии по импортозамещению». Гарант. URL: <https://base.garant.ru/71152492/> (дата обращения: 05.07.2024)
2. Распоряжение Правительства РФ от 4.08.2015 №1492-р «О составе Правительственной комиссии по импортозамещению». Гарант. URL: <https://base.garant.ru/71152480/> (дата обращения: 05.07.2024)
3. Щеглов, Д.К. Организация высокотехнологичного производства в условиях санкционных ограничений / Д.К. Щеглов, А.Г. Сайбель, М.С. Рябоконь // Стандарты и качество. – 2024. – №11. – С. 28-32.
4. Churchmen, C.W. An Approximate Measure of Value / C.W. Churchmen, R. Ackoff // Operations, Research. 1954. – №. 2. – Р. 172-181.
5. Saaty, T.L. The Analytical hierarchy Process. / T.L. Saaty. McGraw-Hill, New York 1980. – 287 р.
6. Дискретная математика и комбинаторика: [учебник] / Дж.А. Андерсон: [пер. с англ. М.М. Беловой] – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 960 с.
7. Григорьева, К.В. Парето-оптимальность в статической конкурентной модели принятия решений // Информационно-управляющие системы. – 2015. – №5(78). – С. 124-129.
8. Зоркальцев, В.И. Равновесие Нэша в нелинейной транспортной модели / В.И. Зоркальцев, М.А. Киселева // Дискретный анализ и исследование операций. – 2008 – Т.15. – №3. – С.31-42.
9. Бродецкий, Г.Л. Возможности метода последовательных уступок при выборе решения по многим критериям / Г.Л. Бродецкий, Д.А. Гусев, О.А. Мазунина, А.В. Фель // Логистика и управление цепями поставок. – 2017. – №3(80). – С. 91-105.
10. Р 50.1.028-2001 Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: Росстандарт России. – 54 с.
11. Альтшуллер, Г. Найти идею: Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач / Г. Альтшуллер. – М.: Альпина Паблишер, 2022. (Серия «Искусство думать»). – 402 с.
12. Бурук, А.Ф. Способы разрешения противоречий в ходе реализации кластерного проекта / А.Ф. Бурук, Е.В. Убоженко // Интерэкско Гео-Сибирь. – 2020. – №3(1). – С. 26-34.
13. Некрасов, В.Н. Механизм разрешения противоречий управления как фактор развития системы государственных услуг / В.Н. Некрасов, О.В. Бучина // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. – 2014. – №2. – С. 52-58.
14. Денисова, О.В. Противоречия целей системы высшего образования в России: пути их гармонизации / О.В. Денисова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2011. – № 41. – С.66-72.
15. Hickel, J. The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet / J. Hickel // Sustainable Development. – 2019. – №. 27(6). – Р. 1-12.

### Щеглов Дмитрий Константинович

АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод»,  
Кандидат технических наук, доцент,  
Научный руководитель,  
192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, 120  
Телефон: +7 (812) 665-56-61  
E-mail: [dk@bk.ru](mailto:dk@bk.ru)

---

SHCHEGLOV D.K.

## A MODEL OF COMPROMISE MANAGEMENT OF IMPORT SUBSTITUTION PROCESSES IN ORGANIZING HIGH-TECH PRODUCTION UNDER CONDITIONS OF SANCTION RESTRICTIONS

**Abstract.** The article emphasizes the relevance of addressing issues related to the organization of high-tech production under sanctions constraints. The primary focus is on the contradictions in managing the processes of import substitution at the enterprise, industry (integrated structures), and state levels. The article proposes matrices of contradictions for internal and external goals of import substitution across various management levels. Based on the proposed matrices, the number of possible simultaneous occurrences of different contradictions, characteristic of organizing production under sanctions constraints, is calculated. A formalized approach to the problem of import substitution in a high-tech industry enterprise is presented, along with an example of forming a management vector for import substitution processes. The article also presents a variant of a formalized description of the systemic management process of multiple conflicting goals, including import substitution goals, in the organization of targeted production.

**Keywords:** concept, import substitution, technological sovereignty, high-tech products, production organization, defense-industrial complex.

### BIBLIOGRAPHY

1. Postanovlenie pravitelstva RF ot 04.08.2015 №785 «O sozdani pravitelstvennoj komissii po importozameshcheniyu». Garant. URL: <https://base.garant.ru/71152492/> (data obrashcheniya: 05.01.2024)
2. Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 4.08.2015 №1492-r «O sostave Pravitelstvennoj komissii po importozameshcheniyu». Garant. URL: <https://base.garant.ru/71152480/> (data obrashcheniya: 05.01.2024)
3. Shcheglov, D.K. Organizaciya vysokotekhnologicheskogo proizvodstva v usloviyah sankcionnyh ogranicenij / D.K. Shcheglov, A.G. Sajbel, M.S. Ryabokon // Standarty i kachestvo. – 2024. – №11. – S. 28-32.
4. Churchmen, G.W. An Approximate Measure of Value / G.W. Churchmen, R. Ackoff // Operations, Research. 1954. – №2. – S. 172-181.
5. Saaty, T.L. The Analytical hierarchy Process. / T.L. Saaty. McGraw-Hill, New York 1980. – 287 s.
6. Diskretnaya matematika i kombinatorika: [uchebnik] / Dzh.A. Anderson: [per. s angl. M.M. Belovoj] – M.: Izdatelskij dom «Vilyams», 2004. – 960 s.
7. Grigoreva, K.V. Pareto-optimalnost v staticeskoy konkurentnoj modeli prinyatiya reshenij // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. – 2015. – №5(78). – S. 124-129.
8. Zorkalcev, V.I. Ravnovesie Neshu v nelinejnoj transportnoj modeli / V.I. Zorkalcev, M.A. Kiseleva // Diskretnyj analiz i issledovanie operacij. – 2008 – T.15. – №3. – S. 31-42.
9. Brodeckij, G.L. Vozmozhnosti metoda posledovatelnyh ustupok pri vybore resheniya po mnogim kriteriyam / G.L. Brodeckij, D.A. Gusev, O.A. Mazunina, A.V. Fel // Logistika i upravlenie cropyami postavok. – 2017. – №3(80). – S. 91-105.
10. R 50.1.028-2001 Rekomendacii po standartizacii. Informacionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo cikla produkcii. Metodologiya funkcionalnogo modelirovaniya. – M.: Rosstandart Rossii. – 54 s.
11. Altshuller, G. Najti ideyu: Vvedenie v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatelskikh zadach / G. Altshuller. – M.: Alpina Publisher, 2022. (Seriya «Iskusstvo dumat»). – 402 s.
12. Buruk, A.F. Sposoby razresheniya protivorechij v hode realizacii klasternogo proekta / A.F. Buruk, E.V. Ubozhenko // Interekspo Geo-Sibir. – 2020. – №3(1). – S. 26-34.
13. Nekrasov, V.N. Mekhanizm razresheniya protivorechij upravleniya kak faktor razvitiya sistemy gosudarstvennyh uslug / V.N. Nekrasov, O.V. Buchina // Gosudarstvennoe i municipalnoe upravlenie. Uchenye zapiski. – 2014. – №2. – S. 52-58.
14. Denisova, O.V. Protivorechiya celej sistemy vysshego obrazovaniya v Rossii: puti ih garmonizacii / O.V. Denisova // Nacionalnye interesy: prioritety i bezopasnost. – 2011. – №41. – S.66-72.
15. Hickel, J. The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet / J. Hickel // Sustainable Development. – 2019. – №27(6). – S. 1-12.

#### Shcheglov Dmitry Konstantinovich

JSC «Northwest Regional Center of the Concern VKO «Almaz – Antey» – Obukhov Plant»  
Candidate of Technical Sciences, associate Professor,  
Scientific Supervisor,  
192012, Russian, Saint Petersburg, Obukhovskoy Oborony Avenue, 120  
Phone: +7 (812) 665-56-61  
E-mail: [dk@bk.ru](mailto:dk@bk.ru)

© Щеглов Д.К., 2025

НЕЗНАНОВ А.И., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., СУСЛОВ О.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ УГЛОВ НАКЛОНА, ИЗМЕРЯЕМЫХ НА РАМЕ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА, СО ЗНАЧЕНИЯМИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ПУТИ

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос возможности измерения неровностей пути с помощью датчиков, установленных на подвижной состав. Приведены аналитические выражения, связывающие вертикальные неровности в поперечном и продольном профилях пути со значениями углов наклона рамы тележки вагона. Приведены результаты расчетов и имитационного моделирования для углов наклона при прохождении грузовым вагоном участка пути с поперечными и продольными вертикальными неровностями, показывающие адекватность расчетных соотношений. Моделирование значений углов приведено для различных масс и скоростей движения вагона, а также для обоих тележек вагона. Представленные результаты показывают возможность измерения неровностей и координат их расположения с помощью датчиков угла, расположенных на тележке вагона, при различной загруженности вагона и скоростях движения.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, цифровой двойник, неровность пути, тележка вагона, датчик угла, моделирование.

### Введение

В настоящее время в системах управления и диагностики состояния железных дорог, подвижного состава и системах управления режимами движения на железнодорожных магистралях широкое распространение получила технология «цифровых двойников» [1]. Данная технология предполагает сбор данных с помощью распределенных систем контроля о различных параметрах пути, подвижного состава, других элементов железнодорожных магистралей и моделирования на их основе состояния магистрали в текущий момент, а также прогнозирование изменений параметров состояния в течение времени с целью выработки решений о необходимости ремонтно-восстановительных работ на отдельных участках, оптимизации скоростных режимов движения и нагрузки на путь. Это позволяет улучшить экономику эксплуатации участков пути, а также снизить риски аварийных ситуаций.

Одной из задач построения таких цифровых двойников железнодорожной транспортной инфраструктуры является измерение параметров макрогоеометрии пути, причем при различных нагрузках со стороны подвижного состава и скоростных режимах движения. Для этого в элементы подвижного состава должны встраиваться датчики, позволяющие без дополнительных приспособлений, таких как, например, путеизмерительная хорда, осуществлять измерения макрогоеометрии пути, в частности, поперечных и продольных вертикальных неровностей пути.

Одной из основных идей построения таких систем является определение вертикальных неровностей пути из значений сигналов акселерометров, располагаемых в разных точках вагона, в том числе в буксах тележек [2]. Однако при ее реализации возникает проблема, вызванная сложностью различия ускорений, вызванных непосредственно движением тележки вагона по неровностям, и ускорениями, вызванными вынужденными колебаниями вагона под воздействием этих неровностей и прочими вибрациями, возникающими в нем, и также вносящими вклад в измеряемые ускорения и ухудшающие точность измерения неровностей. Кроме того, значения этих вынужденных ускорений существенно зависят от скорости движения подвижного состава. Для решения этой проблемы измерительная система существенно усложняется путем увеличения числа датчиков, отслеживающих эти вынужденные колебания отдельных элементов вагона и прочие вибрации. При этом, однако полностью проблему решить не удается, что проявляется в низкой точности (погрешность порядка 20 %) таких измерений [3].

Возможным решением указанной проблемы может быть переход от акселерометрического метода определения вертикальных неровностей к угловому методу, т.е. к измерениям углов наклона тележки вагона под воздействием неровностей и определению значений неровностей из значений этих углов [4]. В этом случае могут применяться датчики угла, характеризующиеся низкой чувствительностью к вибрациям, например построенных на основе алгоритма комплементарного фильтра [5], что может снизить влияние вибраций кузова

вагона на результат измерения углов наклона тележки, а, следовательно, и результат измерения вертикальных неровностей. Такие датчики могут располагаться на рамках (левой или правой) или на балке тележки вагона, а, следовательно, для работоспособности данного метода необходимо, чтобы углы наклона этих элементов тележки вагона были зависимыми от значений вертикальных неровностей пути.

Целью настоящей работы является исследование наличия зависимостей между вертикальными продольными и поперечными неровностями пути и углами поворота тележки грузового вагона, а также исследование влияния на эти зависимости массы, скорости движения вагона и точки установки датчика угла на тележке при контроле этих неровностей.

**Исследование возможности измерения вертикальных неровностей инерциальными датчиками, размещенными на тележке вагона**

Задача сводится к оценке соответствия между углами наклона тележки вагона и вертикальными неровностями, при прохождении которых возникают эти углы. Возможным путем решения данного вопроса является сопоставление результатов расчета значений углов наклона рамы тележки вагона при прохождении участка пути, обладающего определенными значениями неровностей, со значениями углов, полученных в результате имитационного моделирования. Для этого необходимо задать значения неровности, рассчитать теоретические значения углов наклона элементов тележки вагона при данных значениях неровностей, провести имитационное моделирование движения тележки вагона по участку с заданными неровностями, определить получившиеся значения углов и сопоставить их с расчетными значениями.

Для определения теоретических значений углов наклона элементов тележки рассмотрим прохождение тележкой вагона (рисунок 1) участка пути, обладающего неровностями. Пусть значения вертикальных координат центров осей колесных пар тележки относительно некоторой базовой линии, параллельной линии горизонта, в  $i$ -й точке пути характеризуются значениями  $Z_i$  и  $Z_{i+k}$ , а превышение наружного рельса характеризуется значением возвышения  $H_i$ . Тогда углы поворота рамы тележки могут быть определены из выражений [6]:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{H_i}{d}\right), \quad (1)$$

$$\beta_i = \arcsin\left(\frac{Z_{i+k} - Z_i}{L}\right), \quad (2)$$

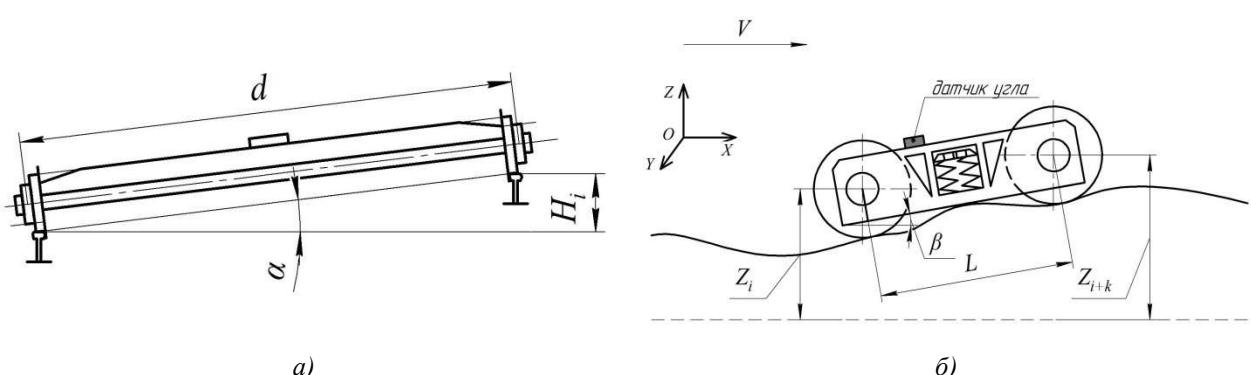
где  $\alpha$  – угол поворота тележки в поперечном профиле;

$d$  – расстояние между точками сопряжения оси колесной пары с рамами тележки;

$\beta$  – угол поворота тележки в продольном профиле;

$L$  – расстояние между осями колесных пар тележки [7];

$k$  – число шагов по времени, на которое задняя колесная ось тележки отстоит от передней для скорости движения  $V$ .



**Рисунок 1 – Углы наклона тележки вагона под воздействием вертикальных неровностей:**  
а) в поперечном профиле; б) в продольном профиле

Известно, что износ железнодорожного пути носит волнообразный характер, а продольные неровности характеризуются амплитудой и длиной волны неровности [8].

Поэтому в качестве моделей продольных неровностей будем использовать гармонические функции с периодом, равным длине волны неровности и амплитудой, равной величине неровности:

$$P_i = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_i}{\lambda}\right), \quad (3)$$

где  $A$  – пиковое значение волнообразной неровности;

$x_i$  – координата вдоль направления движения;

$\lambda$  – длина волны неровности.

Для моделирования наличия возвышения для другого рельса будем использовать функцию:

$$Q_i = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_i}{\lambda}\right) + H_i. \quad (4)$$

Для имитационного моделирования прохождения тележки вагона по участку пути с заданными неровностями можно воспользоваться программным комплексом «Универсальный механизм», который включает в себя специализированный модуль «UM Loco» для моделирования динамики железнодорожных экипажей: локомотивов, пассажирских и грузовых вагонов, путевых машин. В частности модуль «UM Loco» позволяет рассчитывать динамику рельсовых экипажей в полной пространственной постановке, в прямых и кривых участках пути, с учетом и без учета неровностей путевой структуры с одновременным расчетом переменных (рисунок 2), характеризующих кинематические и динамические параметры элементов конструкции подвижного состава [9].

Зададим неровности с длиной волны 25 м и амплитудой 5 мм. При этом пусть будет иметь место возвышение левого рельса над правым, равное 3 мм. Тогда функции, описывающие неровности для левого и правого рельсов соответственно равны:

$$P_i = 0.005 \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_i}{25}\right) + 0.003, \quad (5)$$

$$Q_i = 0.005 \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_i}{25}\right). \quad (6)$$

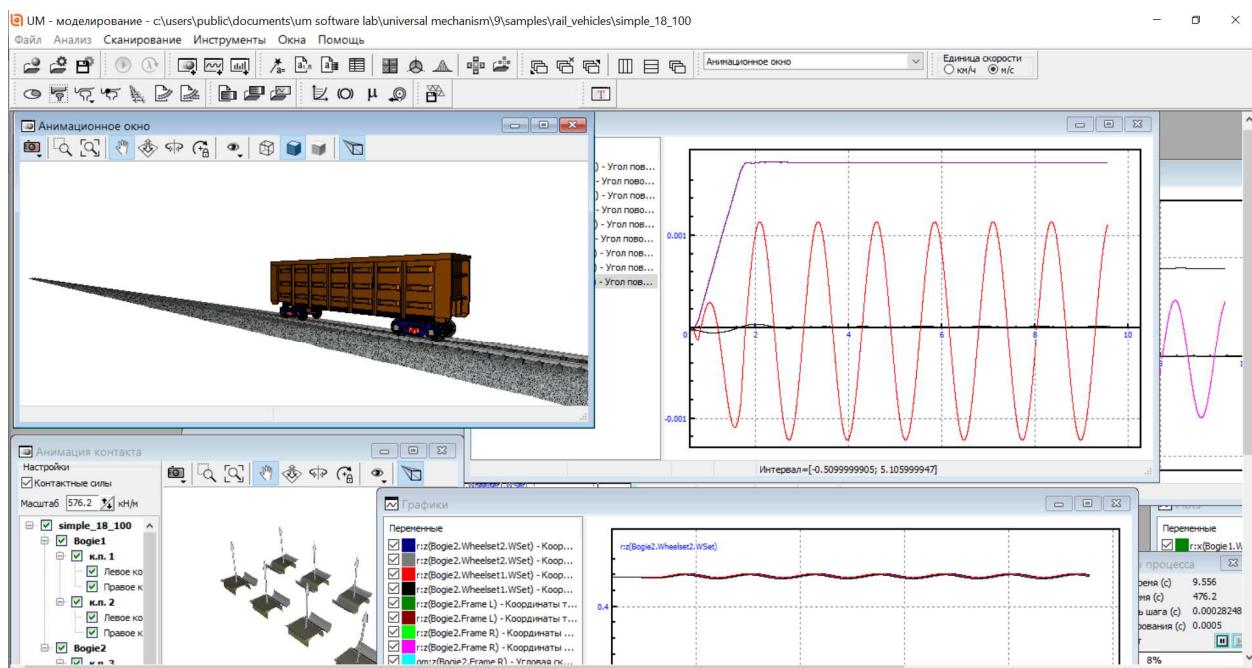


Рисунок 2 – Моделирование железнодорожного экипажа в программном комплексе «Универсальный механизм»

Значение углов наклона в поперечном  $\alpha$  и продольном профиле  $\beta$  для правой рамы, тележки вагона для массы 25 тонн и движущегося со скоростью 20 м/с, рассчитанные теоретически и полученные в результате моделирования в «Универсальный механизм» приведены на рисунке 3. Как видно из рисунка 1.6 первая колесная пара имеет индекс возвышения  $i$ , а вторая  $i+k$ . Значение  $k$  может быть рассчитано из выражения:

$$k = \frac{L}{V \cdot \Delta t}, \quad (7)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени.

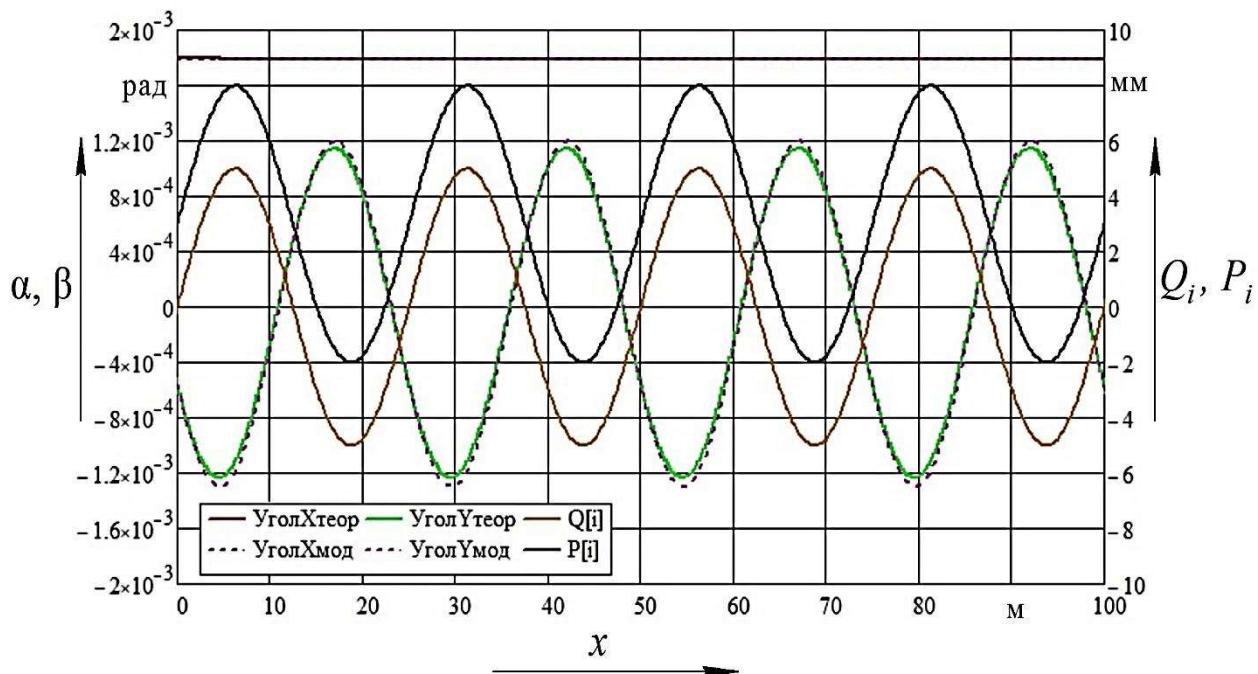


Рисунок 3 – Расчетные и модельные значения углов наклона левой рамы тележки при прохождении неровностей пути

На рисунке 3 введены обозначения: УголXтеор – угол поворота рамы тележки вокруг оси X (рисунок 1.6), рассчитанный теоретически по выражению (1) из значений неровностей (5), (6); УголXмод – угол поворота рамы тележки вокруг оси X, полученный в результате моделирования в программе «Универсальный механизм»; УголYтеор – угол поворота рамы тележки вокруг оси Y (рисунок 1.6), рассчитанный теоретически по выражению (2) из значений неровностей (5), (6); УголYмод – угол поворота рамы тележки вокруг оси Y, полученный в результате моделирования в программе «Универсальный механизм».

Из графиков на рисунке можно сделать вывод, что расчетные и модельные значения углов наклона тележки хорошо соотносятся, расхождение для угла  $\alpha$  не превышает 0,5 %, для угла  $\beta$  – значения 3 %. При этом следует также отметить, что теоретические и модельные графики синхронны между собой, что говорит о возможности адекватного определения местоположения пиков реальных неровностей по результатам пересчета углов наклона в геометрические неровности пути.

На рисунке 4 представлены значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  для правой и левой рамы, а также для балки задней тележки вагона, полученные в результате моделирования. На графике введены следующие обозначения: УголXпр – угол поворота правой рамы тележки вокруг оси X; УголXбал – угол поворота балки тележки вокруг оси X; УголXлр – угол поворота левой рамы тележки вокруг оси X; УголYпр, УголYбал, УголYлр – углы поворотов аналогичных элементов вокруг оси Y.

Анализ представленных на рисунке 4 графиков показывает, что максимальные отклонения между однотипными кривыми для соответствующих углов  $\alpha$  и  $\beta$  не превышает 0,02 %, что позволяет сделать вывод о том, что все элементы тележки имеют одинаковые углы

наклона и это позволяет в дальнейшем использовать для анализа углы наклона только одного какого-либо элемента, например, правой рамы тележки.

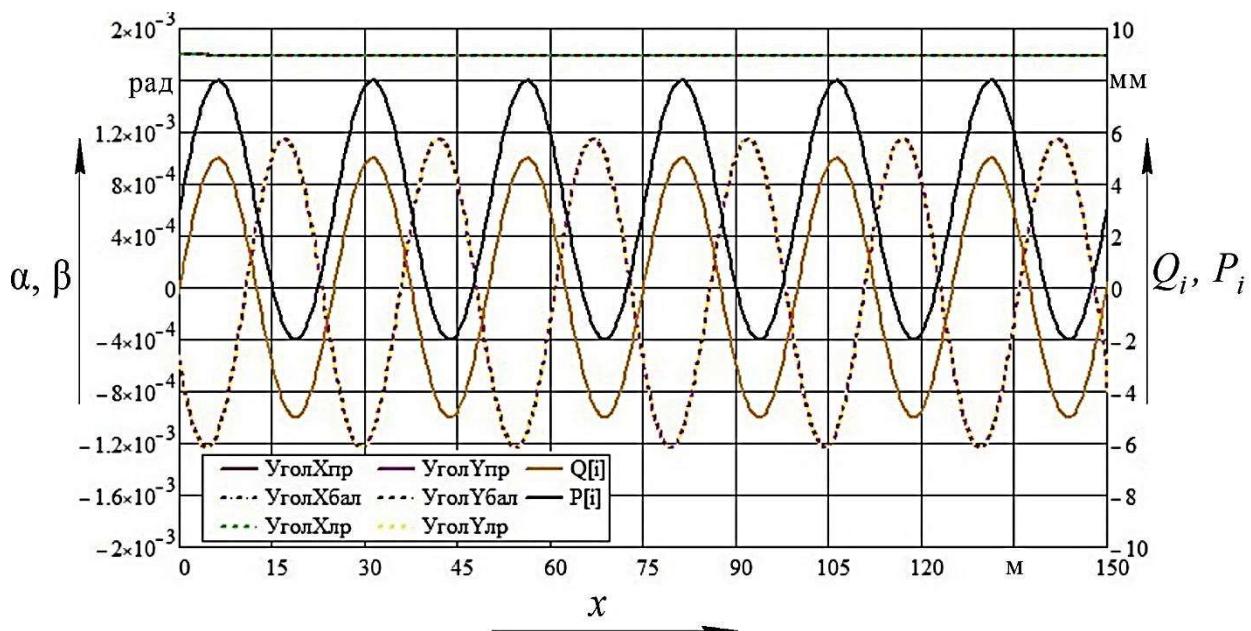


Рисунок 4 – Результаты моделирования углов наклона разных элементов задней тележки вагона при прохождении неровностей пути

Результаты моделирования углов наклона рам передней и задней тележек вагона представлены на рисунке 5. Здесь введены обозначения: УголХпр1 – угол поворота правой рамы задней тележки вагона вокруг оси X; УголХпр2 – угол поворота правой рамы передней тележки вагона вокруг оси X; УголYпр1 – угол поворота правой рамы задней тележки вагона вокруг оси Y; УголYпр2 – угол поворота правой рамы передней тележки вагона вокруг оси Y; УголYпр2сдв – угол поворота правой рамы передней тележки вагона вокруг оси Y, сдвинутый по фазе, чтобы быть синфазным со значением угла УголYпр1.

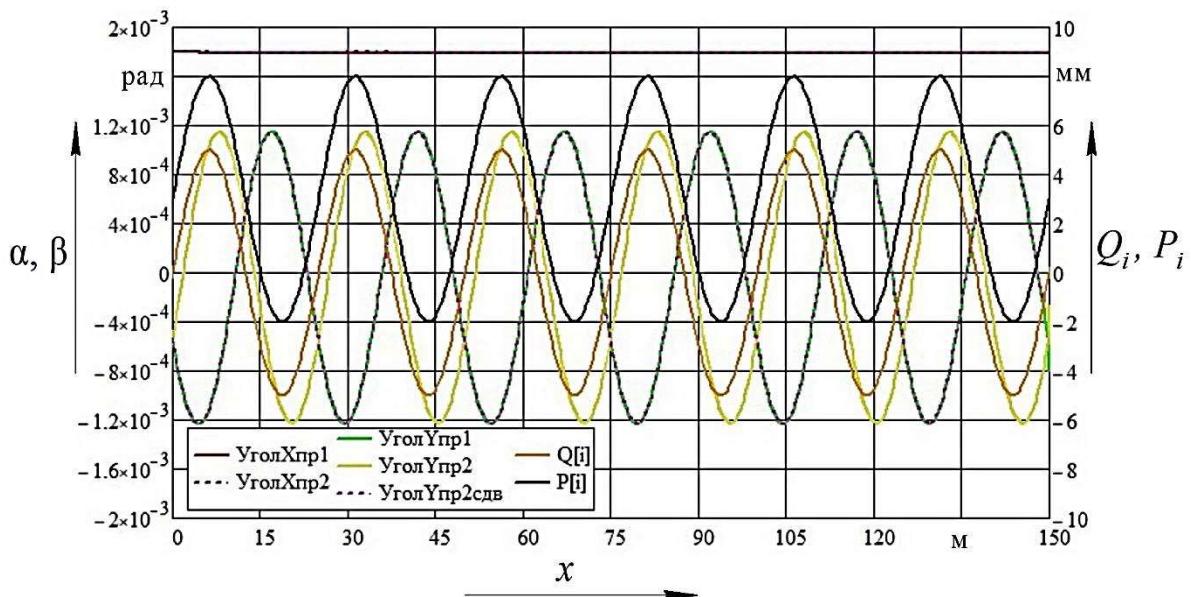


Рисунок 5 – Результаты моделирования углов наклона рам передней и задней тележек вагона

Из анализа рисунка 5 следует, что углы наклона совпадают по амплитуде с точностью 0,05 %, но отличаются по фазе, что обусловлено тем, что колеса передней и задней тележек вагона проезжают одни и те же неровности в разные моменты времени, обусловленные скоростью движения и длиной вагона. Однако если графики углов наклона в продольном

профиля для передней и задней тележек совместить между собой, т.е. если устраниТЬ фазовые сдвиг между ними, то получается, что они совпадают между собой с точностью до 0,05 % по амплитуде. Это дает возможность исследовать влияние других факторов на точность определения углов на примере только одной из двух тележек вагона.

Результаты моделирования углов наклона в продольном и поперечном профилях правой рамы задней тележки для различных масс вагона (от 23 тонн, что соответствует массе пустого вагона [10] до 85 тонн, что соответствует полностью загруженному грузовому вагону) для неровностей, описываемых выражениями (5), (6), и скорости движения 20 м/с представлены на рисунках 6 и 7.

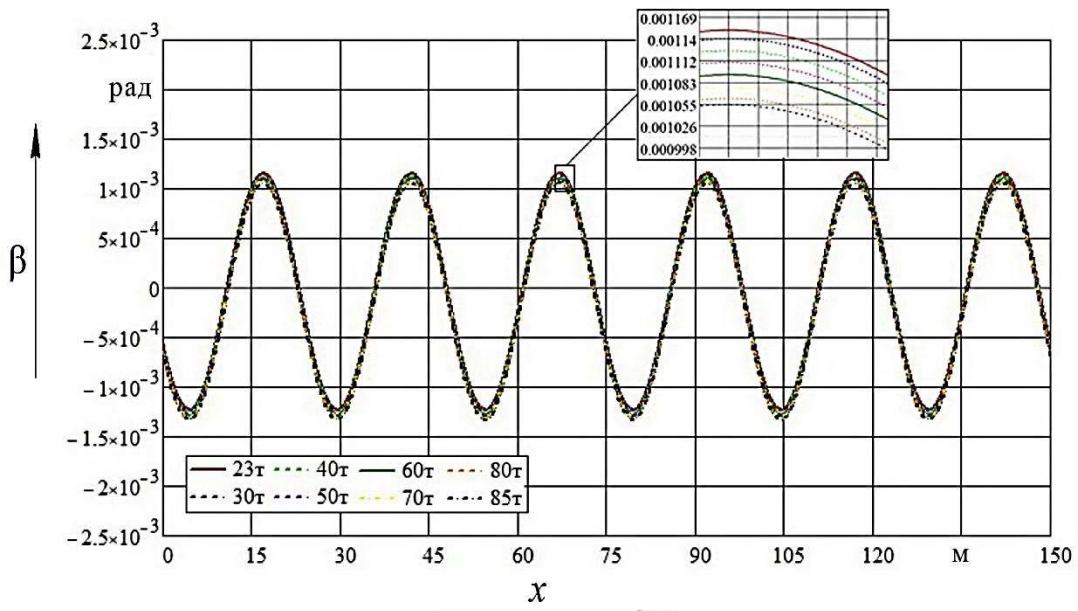


Рисунок 6 - Результаты моделирования угла наклона рамы тележки в продольном профиле для различных масс вагона

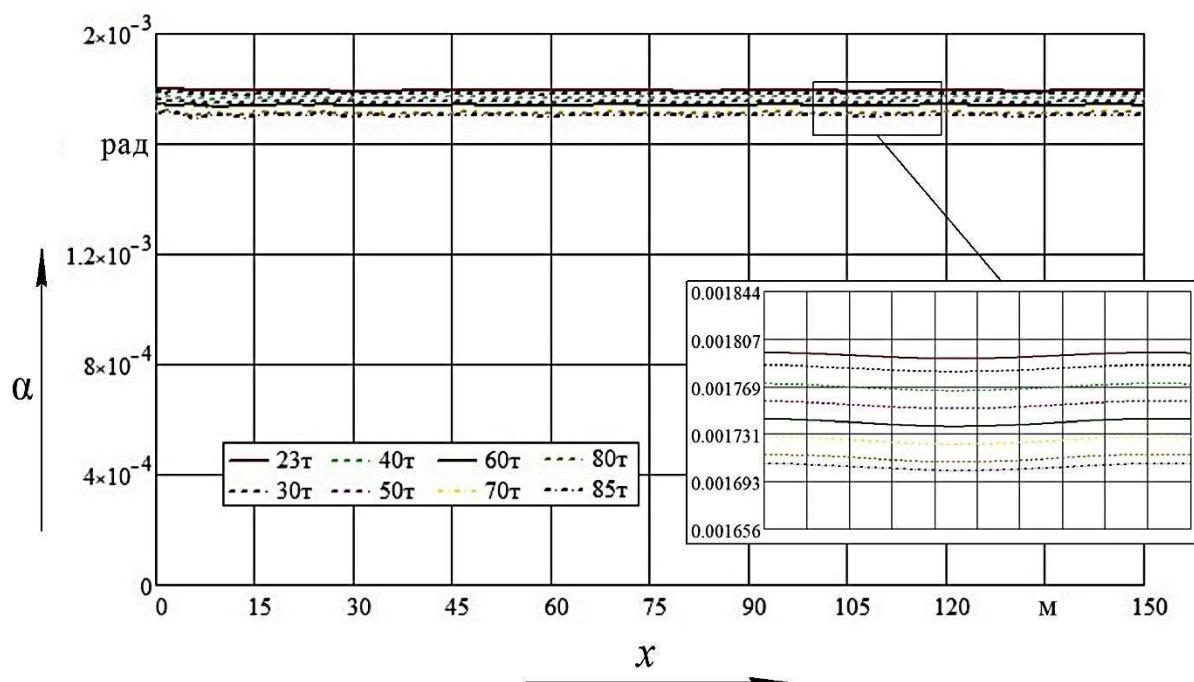


Рисунок 7 - Результаты моделирования угла наклона рамы тележки в поперечном профиле для различных масс вагона

Анализ графиков, приведенных на рисунке 6, показывает, что угловые колебания синфазны между собой, т.е. изменение массы не приводит к изменению определения пространственной координаты расположения неровности. При этом с увеличением массы вагона происходит практически прямо пропорциональное массе смещение графика угла наклона относительно средней линии. При максимальной массе вагона это смещение составляет 8,2 % относительно амплитуды, измеренной на пустом вагоне. В поперечном профиле (рисунок 7) отклонения значений измеряемого угла также практически прямо пропорционально зависят от массы вагона и достигают 5 % при максимальной массе вагона.

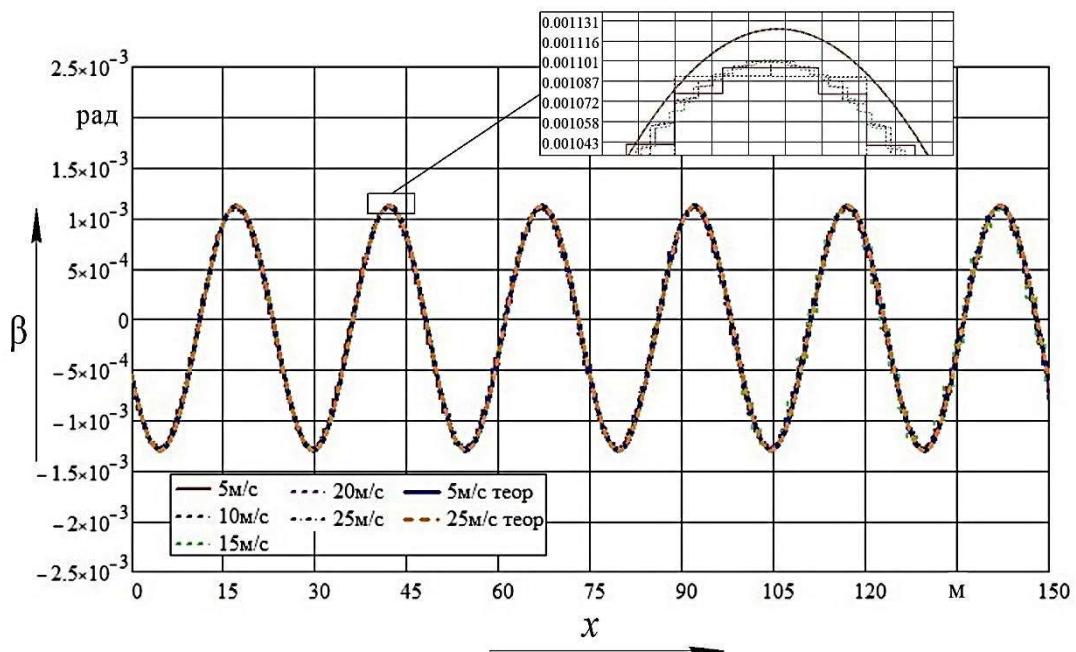


Рисунок 8 - Результаты моделирования угла наклона рамы тележки в продольном профиле для различных скоростей движения вагона

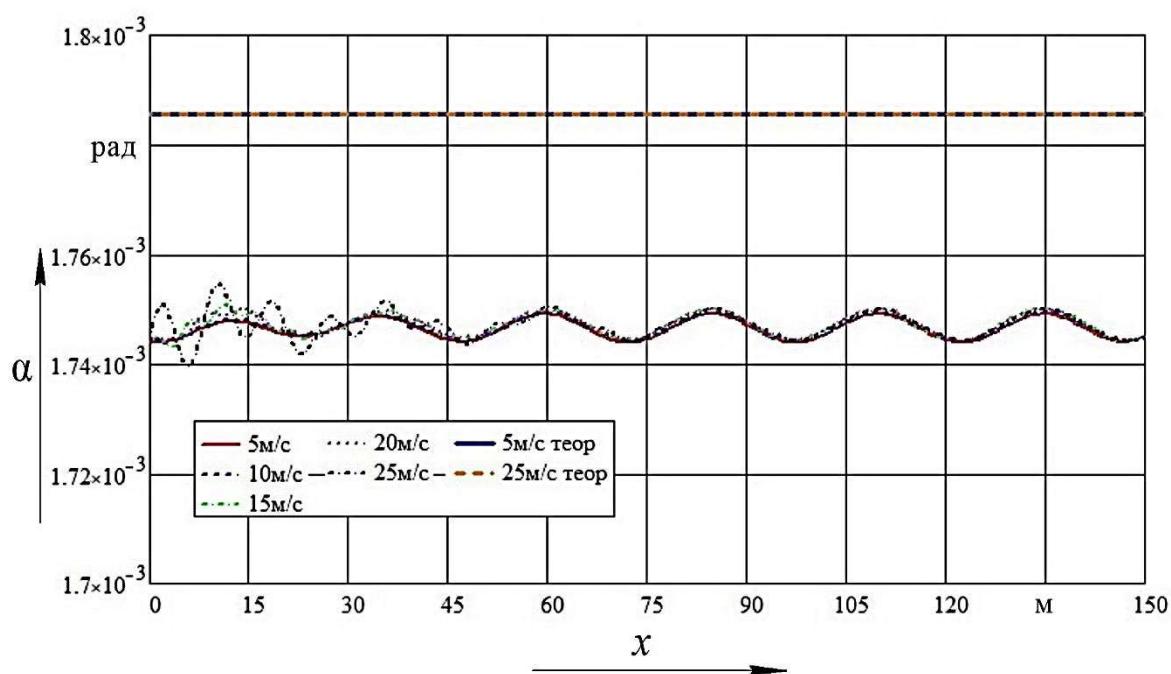


Рисунок 9 - Результаты моделирования угла наклона рамы тележки в поперечном профиле для различных скоростей движения вагона

Углы наклона  $\beta$  рамы тележки в продольном профиле для неровностей, описываемых выражениями (5), (6), средней загруженности грузового вагона (масса 55 тонн), полученные в результате моделирования, а также расчетным путем для различных скоростей движения вагона, представлены на рисунке 8. Расчетные значения обозначены как “5 м/с теор” и “25 м/с теор”, для значений, полученных в результате моделирования, в обозначении указано только скорость. Анализ теоретических графиков и результатов моделирования показывает, что все графики синфазны между собой, что говорит о том, что изменение скорости не приводит к ошибкам в определении пространственной координаты расположения неровности. Теоретические зависимости для разных скоростей совпадают между собой, а модельные между собой, расхождение между теоретическими и модельными зависимостями не превышает 5 % во всем диапазоне скоростей.

Результаты моделирования для угла наклона  $\alpha$  рамы тележки в поперечном профиле также показывает, что теоретические зависимости совпадают между собой, а модельные между собой, и разница между ними не превышает 2 % (рисунок 9). Таким образом, изменение скорости движения не приводит к амплитудным и фазовым искажениям определения угла наклона, пропорционального вертикальной неровности, а расхождение по амплитуде с расчетными значениями может быть скомпенсировано введением поправки.

### Заключение

Проведенные исследования показывают, что углы наклона элементов конструкции тележек вагона зависят от значений вертикальных неровностей пути в продольном и поперечном профилях, причем эти углы могут измеряться одновременно для оценки неровностей в этих двух профилях пути. При этом датчик угла наклона может быть установлен на любом элементе конструкции тележки (левой или правой раме или балке), поскольку их угловые колебания совпадают между собой.

Одновременное моделирование для передней и задней тележек грузового вагона показало, что амплитуды углов наклона в продольном и поперечном профилях совпадают между собой, имеется лишь фазовое смещение для характеристик в продольном профиле, которое может быть скомпенсировано, что позволяет использовать данные с обеих тележек для повышения точности определения неровностей.

Результаты моделирования углов наклона рамы тележки при прохождении неровностей для различных масс вагона показали, что значения углов практически прямо пропорционально зависят от массы вагона, таким образом, при определении неровностей для значений углов необходимо внести поправку, учитывающую массу вагона.

Моделирование углов наклона рамы тележки для различных скоростей средне загруженного вагона показало, что характеристики синфазны и совпадают между собой по амплитуде, для соответствия теоретическому значению необходимо внести поправку, зависящую в том числе от массы вагона. Синфазность получаемых характеристик позволяет сделать вывод о том, что наряду с величиной неровности имеется также возможность адекватного определения пространственной координаты расположения неровностей.

Таким образом, с помощью датчиков угла наклона, располагаемых на элементах конструкции тележек вагона, имеется возможность собирать информацию о вертикальных неровностях для цифровых двойников железнодорожного пути с целью более эффективного и оперативного планирования режимов движения на участках пути и ремонтно-восстановительных работ по предупреждению дальнейшей деградации строения пути.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Шевченко, Д.В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте /Д.В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТИК ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2 С. 91-99. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>.

2 Yuting, Wang. Track irregularities estimation based on acceleration measurements / Yuting Wang, Yong Qin, Xiukun Wei // Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control. Harbin, 2012. Pp. 83-87. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6273305>.

3 Odashima, M. Track geometry estimation of a conventional railway from car-body acceleration measurement / M. Odashima, Sh. Azami, Ya. Naganuma, H. Mori, H. Tsunashima // Mechanical Engineering Journal. 2017. Volume 4. Issue 1. Pp. 16-00498. <https://doi.org/10.1299/mej.16-00498>.

4 Незнанов, А.И. Бесхордовые методы измерения вертикальных неровностей железнодорожного пути / А.И. Незнанов, К.В. Подмастерьев, О.А. Суслов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. №3. С. 179-185.

5 Грязин, Д.Г. Разработка ЭКД на микромеханических датчиках, свободного от действия переносных ускорений / Д.Г. Грязин, Т.В. Падерина // Гирокопия и навигация. 2023. Т. 31. № 2 (121). С. 51-64.

6 Незнанов, А.И. Анализ возможности измерения волнообразных неровностей при контроле железнодорожного пути с помощью датчика угла, установленного на тележке вагона / А.И. Незнанов, К.В. Подмастерьев, О.А. Суслов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 5. С. 99-108.

7 Тележка 18-100 - устройство, характеристика. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.modelzd.ru/podvizhnoj-sostav-zhd/telezhka-18-100.html>. (Дата обращения: 6.12.2024).

8 Певзнер, В.О. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса / В.О. Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапелько, Е.А. Сидорова, А.Ю. Сластенин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 5. С. 271-275. <https://doi.org/10.21780/20223-9731-2020-79-5-271-275>.

9 Универсальный механизм - программный комплекс для моделирования динамики механических систем: UM Loco. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.umlabs.ru/plugins/catalogue/index.php?id=4>. (Дата обращения: 6.12.2024).

10 Характеристики грузовых вагонов, платформ и контейнеров. [Электронный ресурс]. URL: <https://vezemnegabarit.ru/information/reference/harakteristiki-gruzovyh-vagonov-platform-i-konteynerov>. (Дата обращения: 6.12.2024).

**Незнанов Александр Иванович**  
ФГБОУ ВО Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
К.т.н., старший преподаватель кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(960)641-45-92

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
ФГБОУ ВО Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Д.т.н., профессор, директор института приборостроения, автоматизации и информационных технологий  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(961)620-55-50

**Суслов Олег Александрович**  
АО «ВНИИЖТ»  
Д.т.н., главный научный сотрудник Научного центра «Инфраструктура»  
Г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10

NEZNANOV A.I., PODMASTEREV K.V., SUSLOV O.A.

## STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN INCLINATION ANGLES MEASURED ON THE FRAME OF A FREIGHT WAGON BOGIE AND THE VALUES OF CONTROLLED VERTICAL IRREGULARITIES OF THE RAILWAY

**Abstract.** The issue of relevance of measuring track irregularities using sensors installed on rolling stock is considered. Analytical expressions are given that relate vertical irregularities in the transverse and longitudinal profiles of the track with the values of the angles of inclination of the car bogie frame. The results of calculations and simulation modeling are given for the angles of inclination when a freight car passes a section of the track with transverse and longitudinal vertical irregularities, showing the adequacy of the calculated relationships. Modeling of the angle values is given for different masses and speeds of the car, as well as for both car bogies. The presented results show the possibility of measuring irregularities and coordinates of their location using angle sensors located on the car bogie, with different car loads and speeds.

**Keywords:** railway track, digital twin, track vertical irregularities, wagon bogie, angle sensor, modeling.

## BIBLIOGRAPHY

1. Shevchenko, D.V. Metodologiya postroeniya cifrovyyh dvojnikov na zheleznodorozhnom transporte. Vestnik Nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VESTNIK VNIIZHT). 2021. 2021. T. 80. № 2 S. 91-99. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>.
2. Yuting, Wang. Track irregularities estimation based on acceleration measurements / Yuting Wang, Yong Qin, Xiukun Wei // Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control. Harbin, 2012. Pp. 83-87. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6273305>.
3. Odashima, M. Track geometry estimation of a conventional railway from car-body acceleration measurement / M. Odashima, Sh. Azami, Ya. Naganuma, H. Mori, H. Tsunashima // Mechanical Engineering Journal. 2017. Volume 4. Issue 1. Pp. 16-00498. <https://doi.org/10.1299/mej.16-00498>.
4. Neznanov, A.I. Beskhordovye metody izmereniya vertikalnyh nerovnostej zheleznodorozhnogo puti / A.I. Neznanov, K.V. Podmasterov, O.A. Suslov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2022. №3. S. 179-185.
5. Gryazin, D.G., Paderina T.V. Razrabotka EKD na mikromekhanicheskikh datchikah, svobodnogo ot dejstviya perenosnyh uskorenij // Giroskopiya i navigaciya. T. 31. № 2 (121). S. 51-64.
6. Neznanov, A.I. Analiz vozmozhnosti izmereniya volnoobraznyh nerovnostej pri kontrole zheleznodorozhnogo puti s pomoshchyu datchika ugla, ustanovленnogo na telezhke vagona / A.I. Neznanov, K.V. Podmasterov, O.A. Suslov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2022. № 5. S. 99-108.
7. Telezhka 18-100 - ustrojstvo, harakteristika. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.modelzd.ru/podvzhnoj-sostav-zhd/telezhka-18-100.html>. (Data obrashcheniya: 6.12.2024).
8. Pevzner, V.O. Vliyanie dlinnyh nerovnostej prodolnogo profilya na bezopasnost dvizheniya v usloviyah intensifikacii perevozochnogo processa / V.O. Pevzner, A.I. Chechelnickij, K.V. SHapetko, E.A. Sidorova, A.YU. Slastenin // Vestnik Nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VESTNIK VNIIZHT). 2020. T. 79. № 5. S. 271-275. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-271-275>.
9. Universalnyj mekhanizm - programmnyj kompleks dlya modelirovaniya dinamiki mekhanicheskikh sistem: UM Loco. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.umlabs.ru/plugins/catalogue/index.php?id=4>. (Data obrashcheniya: 6.12.2024).
10. Harakteristiki gruzovyh vagonov, platform i kontejnerov. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://vezemnegabarit.ru/information/reference/harakteristiki-gruzovyh-vagonov-platform-i-konteynerov>. (Data obrashcheniya: 6.12.2024).

**Neznanov Alexander Ivanovich**

Oryol State University named after I.S. Turgenev  
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the  
Department of Instrument Engineering, Metrology and  
Certification  
302020, Orel, Naugorskoye highway, 29  
Tel. 8(960)641-45-92

**Podmasterov Konstantin Valentinovich**

Oryol State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the  
Institute of Instrument Engineering, Automation and  
Information Technology  
302020, Orel, Naugorskoye highway, 29  
Tel. 8(961)620-55-50

**Suslov Oleg Alexandrovich**

JSC «VNIIZHT»  
Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the  
Scientific Center «Infrastructure»  
Moscow, st. 3rd Mytishchinskaya, 10

© Незнанов А.И., Подмастерьев К.В., Суслов О.А., 2025

УДК 534.6.08

ЦАПЛЕВ В.М., КОНОВАЛОВ Р.С., КОНОВАЛОВ С.И.,  
ДЕМЕНТЬЕВ И.И., ЮЛДАШЕВ З.М.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

**Аннотация.** В статье исследуются параметры пленочных полимерных пьезоэлектрических материалов типа ПВДФ. Разработан метод измерения упругих и пьезоэлектрических параметров пьезоэлектрических материалов в области частот от нескольких герц до нескольких килогерц. Получены соотношения, позволяющие вычислить значения пьезоэлектрических модулей или упругих податливостей исследуемого образца путем сравнения выходных напряжений образца и эталонного пьезоэлемента. Полученные результаты предназначены для исследования электромеханических свойств пьезоматериалов в низкочастотном диапазоне.

**Ключевые слова:** пьезополимеры, упругая консоль, составной осциллятор, изгибные колебания, модули упругости, пьезомодули.

### Введение

Энергонезависимые автономные устройства, которые широко применяются для исследования и мониторинга окружающей среды, нуждаются в малогабаритных источниках энергии, которые извлекают энергию из различных природных источников и преобразуют ее в электрическую энергию. Такими природными источниками энергии могут быть ветер, водные потоки, волны на поверхности моря, озера или реки, и т.д. Для преобразования этой природной энергии в электрическую энергию в последнее время широко применяются пьезоэлектрические генераторы, осуществляющие прямое преобразование энергии. Разработке, исследованию и созданию таких генераторов посвящено огромное число научных и прикладных исследований [1, 2]. Особое место занимают работы, посвященные разработке устройств, в которых применяются пьезополимеры типа ПВДФ. Такие материалы обладают существенными преимуществами по сравнению с традиционными пьезокерамическими материалами. Они имеют также и определенные недостатки, среди которых основным является недостаточно высокая электромеханическая связь. Тем не менее, пьезополимеры следует считать весьма перспективным типом активных материалов, которые находят все более широкое применение. Это – относительно новый тип пьезоактивных материалов, физические и эксплуатационные свойства которых нуждаются в дальнейшем изучении.

Однако, исследование упругих и пьезоэлектрических постоянных таких материалов связано со значительными трудностями [3, 4]. Эти трудности обусловлены тем, что пьезогенераторы, в которых применяются эти материалы, работают в большинстве своем на низких звуковых, или инфразвуковых частотах, т. е. на частотах порядка единиц или десятков герц, и меньших, вплоть до долей герц. Поэтому и предварительные измерения свойств пьезополимеров предпочтительно выполнять в этом же диапазоне частот. Традиционные ультразвуковые методы, хорошо отработанные, обладающие высокой точностью, и описанные в многочисленной литературе [5–7], здесь не очень хорошо подходят, прежде всего, ввиду чрезвычайно малой толщины пьезополимерной пленки по сравнению с длиной волны ультразвука при измерениях. Кроме того, скорость упругих волн в полимерах обладает весьма высокой дисперсией, и поэтому результаты измерений модулей упругости, полученные ультразвуковыми методами, могут очень сильно отличаться от действительных значений. Более подходящими для этих целей являются методы изгибных низкочастотных колебаний, среди которых выделяется метод, предложенный недавно в [8] для исследования образцов в виде тонкой полосы, предназначенных для изготовления пьезогенераторов. Метод позволяет выполнять измерения низкочастотных колебаний с частотой порядка нескольких Герц.

Широкое применение находят также резонансные методы, которые обладают весьма высокой точностью. Однако, для исследований упругих и пьезоэлектрических свойств полимеров точность резонансных методов оказывается недостаточной. Это объясняется низкой добротностью образцов, поскольку полимерам свойственно высокое затухание колебаний. Резонансная кривая получается достаточно широкой, и точно настроиться на максимум амплитуды колебаний достаточно трудно. Адекватным методом здесь может быть метод составного осциллятора, первоначально разработанный Дж. Марксом [9]. Метод нашел

весьма широкое применение для различных классов материалов, правда, он ограничен использованием продольных колебаний. Для исследования сильно поглощающих материалов, к которым можно отнести полимеры, метод был усовершенствован, а для нелинейных исследований пьезокерамических стержневых образцов в диапазоне частот 20 – 250 кГц [10]. В дальнейшем этот метод был модифицирован применительно к изгибным колебаниям в диапазоне частот 1 – 1000 Гц [11].

Мы не рассматриваем здесь статические методы, которым также посвящено некоторое количество работ [12, 13], поскольку они выходят за рамки задачи, стоявшей перед нами. Однако, их, безусловно, следует учитывать при исследовании частотной дисперсии пьезополимерных материалов.

Однако, в области инфразвуковых частот, т. е. в диапазоне 0 – 20 кГц разработка динамических методов измерений представляется необходимой. Этой задаче и посвящена настоящая работа.

#### Метод сравнительного изгибного осциллятора

Колебательная система представляет собой тонкую упругую металлическую пластину 1, защемленную одним своим концом между опорами 2 (рисунок 1). Свободный конец консоли нагружен двумя грузами 3 с двух сторон. Две тонкие пьезоэлектрические пластины *a* и *b* помещены между каждым грузом и поверхностью консоли с каждой стороны.

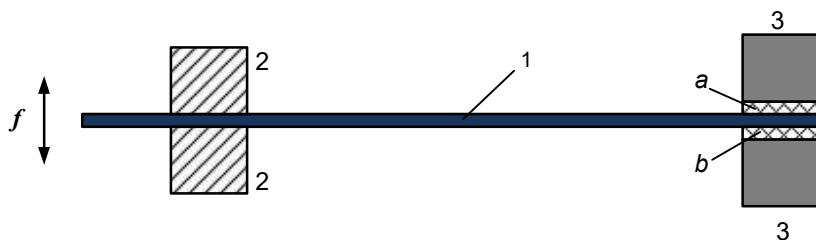


Рисунок 1 – Схема сравнительного изгибного осциллятора для измерения продольного пьезомодуля  $d_{33}$

Одна из пластин изготовлена из исследуемого полимерного материала и является исследуемым образцом, а другая служит эталоном и может быть изготовлена из любого пьезоматериала с известными параметрами. В описываемой установке консоль была изготовлена из бериллиевой бронзы толщиной 0,30 мм и шириной 15 мм. Длину консоли и массы грузов можно изменять в зависимости от требуемой частоты измерений. Все устройство помещается на вибростенд и приводится в движение переменной силой с частотой *f*. Измерение требуемого параметра образца выполняется путем сравнения напряжения на его электродах с напряжением на электродах эталонной пьезопластиинки. Электроды наносятся на поверхности образцов, расположенные параллельно плоскостям консоли (рисунок 2).

В установке исследуемым образцом была пьезопленка PVDF с размерами 15×15 мм и толщиной 0,15 мм, а эталоном служила пьезокерамическая пластиинка ЦТС-19 с такими же размерами. Эталонная пластиинка была изготовлена путем холодного шлифования поляризованной более толстой пластиинки с последующим напылением электродов.

Аналогичный метод измерений применяется в устройстве PiezoMeter System PM300, которое выпускается серийно фирмой «Piezotest Ltd» [14], однако отличается от него более широким диапазоном частот (0 – 100 Гц).

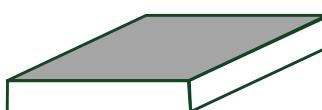


Рисунок 2 – Расположение электродов на образце и на эталоне

При внешнем воздействии на заданной частоте в результате прямого пьезоэффекта на электродах образцов возникает переменное электрическое напряжение. Модуль этого напряжения пропорционален квадратному корню из продольного пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$ . Тогда значение пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  пленки из пьезоэлектрического

полимерного материала определяется по соотношению электрических напряжений на образцах и известного значения пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  эталона.

При описанной конфигурации эталонного и исследуемого образцов в них реализуется толщинный коэффициент электромеханической связи:

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E}}, \quad (1)$$

где  $d_{33}$  – продольный пьезомодуль;

$\varepsilon_{33}^T$  – относительная диэлектрическая проницаемость, измеренная при постоянном механическом напряжении;

$s_{33}^E$  – механическая гибкость в постоянном электрическом поле.

Таким образом, предварительно необходимо измерить величины  $\varepsilon_{33}^T$  и  $s_{33}^E$ .

Измеренное соотношение электрических напряжений  $U_1/U_2$  на выходах пьезоэлементов позволяет определить пьезомодуль ПВДФ  $d_{33} = -033 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. При этом рабочая формула имеет вид:

$$(d_{33})_1 = (d_{33})_2 \cdot \frac{(\varepsilon_{33}^T)_1^{3/2}}{(\varepsilon_{33}^T)_2^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{(s_{33}^E)_2}}{\sqrt{(s_{33}^E)_1}} \cdot \frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{a_1}{a_2}, \quad (2)$$

где индекс 1 относится к исследуемому образцу, а индекс 2 – к эталонному образцу. Исследуемый образец и эталон имеют толщины  $a_1$  и  $a_2$  соответственно.

Измерение поперечного пьезомодуля  $d_{31}$  выполняется аналогичным образом, однако в этом случае образцы, как эталонный, так и исследуемый, наклеиваются не между поверхностью консоли и грузом, а на верхнюю, свободную плоскость груза (рисунок 3).

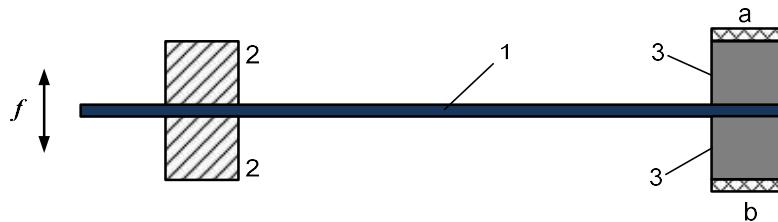


Рисунок 3 – Схема сравнительного изгибного осциллятора для измерения поперечного пьезомодуля  $d_{31}$

В этом случае пьезопластинки оказываются свободными, и реализуется планарный коэффициент электромеханической связи [5]:

$$k_p = k_{31} \cdot \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma^E}} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E}} \cdot \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma^E}}, \quad (3)$$

где  $\sigma^E$  – коэффициент Пуассона;

$k_{31}$  – поперечный коэффициент электромеханической связи;

$s_{11}^E$  – упругая гибкость при постоянном электрическом поле.

Его, однако, не требуется предварительно измерять, поскольку при выводе рабочей формулы часть выражения (3), содержащая  $\sigma^E$ , сокращается. Рабочая формула выглядит в этом случае полностью аналогично:

$$(d_{31})_1 = (d_{31})_2 \cdot \frac{(\varepsilon_{33}^T)_1^{3/2}}{(\varepsilon_{33}^T)_2^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{(s_{11}^E)_2}}{\sqrt{(s_{11}^E)_1}} \cdot \frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{a_1}{a_2} \quad (4)$$

Для проверки полученных соотношений (2), (4) было выполнено имитационное численное моделирование методом конечных элементов в пакете COMSOL 6.2. Результаты моделирования полностью подтвердили правильность приведенных соотношений.

#### Метод составного осциллятора

Как видно из формул, приведенных выше, для расчета пьезомолулей необходимо предварительно измерить значение обратной продольной гибкости исследуемого пьезоматериала, т. е. PVDF. Принципиально возможно измерить его тем же способом, т. е. с помощью консоли, совершающей изгибные колебания. Однако, более удобным оказывается применение модифицированного метода A.W. Nolle [15]. Суть метода поясняется рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема составного осциллятора

Образец 1 из полимерного материала (в нашем случае пленка PVDF) толщиной 0,15 мм помещается между двумя кварцевыми стержнями 2 и 3 сечениями 5 × 5 мм. Длина стержня 2 равна 37 мм, длина стержня 3 – 18,5 мм. Таким образом, волновая длина резонансного стержня 2 составляет половину длины волны, а антирезонансного стержня 3 – четверть длины волны. Если площадь поперечного сечения стержня равна  $A$ , длина стержня равна  $l$ , а сила, приложенная со стороны образца, равна  $F$ , то входной импеданс стержня будет равен сумме полного импеданса стержня и полного импеданса полимерного образца. Поэтому, колебательная скорость нагруженного конца стержня равна

$$\xi = \frac{F}{Z_m} = \frac{F}{-iA\rho c \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} + i(E_1 - E_2) \frac{A}{\omega t}}, \quad (5)$$

где

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = \operatorname{tg} \frac{\pi(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \approx \frac{\pi(\omega - \omega_0)}{\omega_0}. \quad (6)$$

Здесь  $Z_m$  – суммарный импеданс стержня и импеданса образца,  $i$  – мнимая единица,  $\rho c$  – удельный акустический импеданс стержня, равный произведению его плотности на скорость звука в нем,  $E_1$  и  $E_2$  – действительная и мнимая части модуля Юнга, соответственно,  $\lambda$  – длина упругой волны в материале стержня,  $t$  – толщина образца,  $\omega$  – частота колебаний под нагрузкой и  $\omega_0$  – частота резонанса свободного стержня. Соотношения (5), (6) справедливы также и по отношению к  $n$ -й нечетной mode колебаний ( $n = 1, 3, 5$ ).

Предполагается, что фактическая частота не более чем на несколько процентов отличается от частоты свободных колебаний. При таком упрощении модуль (5) принимает вид

$$|\xi| = \frac{|\xi|}{\omega} = \left| \frac{\frac{tF}{A}}{E_2 - i\omega \left( \rho c \pi + \left[ \frac{(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \right] t - \frac{E_1}{\omega} \right)} \right|. \quad (7)$$

Если считать, что  $E_2$  практически не зависит от частоты в небольшом диапазоне, то амплитуда будет максимальной на частоте, для которой второй член в знаменателе равен нулю, т. е.

$$i\omega \left( \rho c \pi + \left[ \frac{(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \right] t - \frac{E_1}{\omega} \right) = 0, \quad (8)$$

или

$$E_1 = t\rho c \pi \cdot \frac{\omega_c \cdot (\omega_c - \omega_0)}{\omega_0}. \quad (9)$$

где  $\omega_c$  – частота, на которой наблюдается максимальное значение амплитуды колебаний стержня, нагруженного образцом полимера.

Можно считать шириной полосы частот разность значений, при которых действительный и мнимый члены в знаменателе (7) равны. Эта разность равна  $\Delta\omega$ . Тогда из выражений (7)–(9) получим:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{2} \left( \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{E_1 + E_2}{t\rho\pi\omega_0}} - \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{E_1 - E_2}{t\rho\pi\omega_0}} \right). \quad (10)$$

Если вторые члены под радикалами малы по сравнению с единицей то из (10) с учетом (9) можно получить:

$$E_2 = t\rho\pi \left( 1 + 2 \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} \right) \cdot \frac{\Delta\omega}{2}. \quad (11)$$

Тогда, поскольку скорость звука в стержнях равна  $c = 2f_0l$ , из (9) и (11) получаем:

$$E_1 = 4t\pi^2 \rho l f_c (f_c - f_0), \quad (12)$$

$$E_2 = 4t\pi^2 \rho l f_c \cdot \frac{(\Delta f_c - \Delta f_0)}{2}, \quad (13)$$

где  $f_c$  – частота основного резонанса стержня, нагруженного на образец;

$f_0$  – частота основного резонанса свободно колеблющегося стержня;

$\rho$  – плотность материала стержня и  $l$  – его длина;

$\Delta f_c$  – ширина резонансного пика системы, нагруженной на образец;

$\Delta f_0$  – ширина резонансного пика свободно колеблющегося резонансного стержня.

Таким образом, входной импеданс четвертьволнового стержня можно считать бесконечным, и образец зажат между свободной торцевой поверхностью резонансного стержня 2 и абсолютно жесткой торцевой поверхностью антрезонансного стержня 3.

Обратная продольная гибкость образца  $(s_{33}^E)^{-1}$  представляет собой модуль Юнга и из (12) определяется выражением [15]:

$$(s_{33}^E)^{-1} = E_1 = t(4\pi^2 \rho l) f_c (f_c - f_0), \quad (14)$$

В эксперименте использовались кварцевые стержни с длинами  $l = 37$  мм (резонансный стержень) и  $l/2 = 18,5$  мм. Плотность  $\rho = 2203$  кг/м<sup>3</sup>. Измерения выполнялись при значениях толщин образцов в интервале 0,15–2 мм. Значение продольной гибкости оказалось равным  $s_{33}^E = 9,65 \times 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup> с относительной неопределенностью 0,001. Следует отметить, что сама пленка PVDF имела толщину 0,15 мм, поэтому образцы с большей толщиной были многослойными.

Поскольку обратная продольная гибкость (т. е. модуль Юнга) – величина комплексная, то из (13) можно исследовать также мнимую часть этого модуля  $E_2$ . Значение этой величины оказалось равным 1130 с относительной неопределенностью 5%. Однако, эта величина говорит лишь о фазовом сдвиге между напряжением и деформацией образца. Что же касается механических потерь в образце, т. е. обратной добротности исследуемого материала, то она определяется обычной формулой для составного осциллятора [9], каким, по существу, и является описываемая система. Отличие состоит лишь в том, что антрезонансный стержень 3 является практически абсолютно жестким элементом системы и не участвует в колебаниях. Поэтому, формула, определяющая обратную добротность (потери) образца, выглядит следующим образом:

$$Q_l^{-1} = Q_c^{-1} + \left( Q_0^{-1} + \frac{m_1}{m_2} Q_0^{-1} \right), \quad (15)$$

где  $Q_l$  – добротность образца;

$Q_c$  – добротность нагруженной системы;

$Q_0$  – добротность свободного стержня 2,  $m_1$  и  $m_2$  – массы образца и резонансного стержня соответственно.

Обратные добротности выражаются через относительные резонансные промежутки свободного и нагруженного стержней:

$$Q_0^{-1} = \frac{\Delta f_0}{f_0} \quad \text{и} \quad Q_c^{-1} = \frac{\Delta f_c}{f_c}.$$

После вычислений получаем  $Q_l = 575$  с точностью около 5%.

### Нагруженный составной осциллятор

Метод составного осциллятора, рассмотренный выше, можно использовать также для исследований в статическом или квазистатическом режиме. В этом случае схема составного осциллятора будет иметь вид, показанный на рисунке 5.

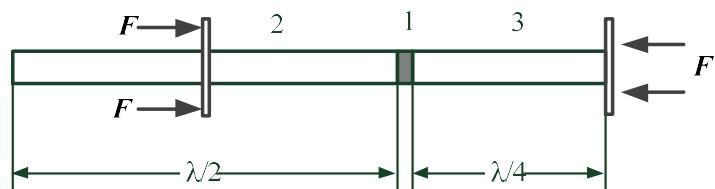


Рисунок 5 – Схема нагруженного составного осциллятора

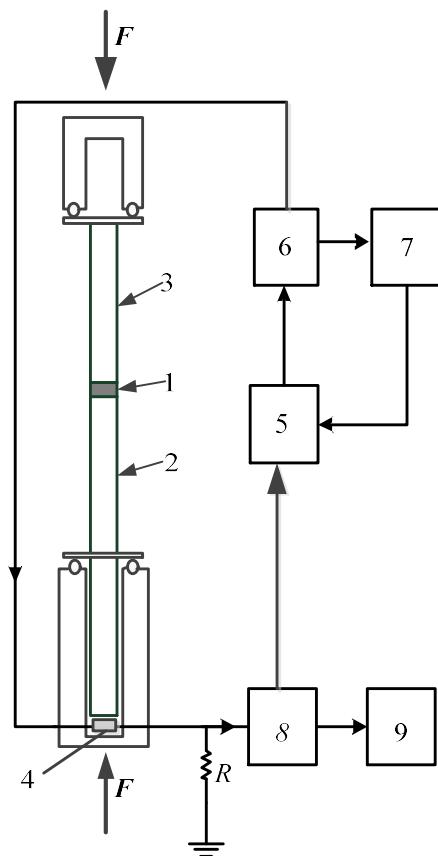


Рисунок 6 – Общая измерительная схема нагруженного составного осциллятора

Для передачи осевого усилия сжатия стержни осциллятора снабжены опорными фланцами, на которые и воздействует сила  $F$ . Резонансный стержень 2, а также антирезонансный стержень 3 должны быть изготовлены не из кварца, а из металла как единое целое с опорными фланцами.

Общая измерительная схема показана на рисунке 6. Образец 1 зажимается между резонансным 2 и антирезонансным титановыми стержнями. Вся колебательная система возбуждается при помощи неконтактного электродинамического преобразователя 4 задающим генератором 5 и усилителем мощности 6. Частота регистрируется частотомером 7. Принятый сигнал снимается с малого сопротивления  $R$ , усиливается микровольтметром 8 визуально наблюдается на экране запоминающего осциллографа 9.

Для поддержания соосности элементов колебательной системы и во избежание перекосов усилие на стержни передается при помощи трехточечной опоры в виде стальных шариков [9].

Измерения могут выполняться в одном из двух режимов. Динамический режим реализуется путем регистрации колебаний системы на частоте резонанса, и обратная продольная гибкость вычисляется затем по формуле (14). Добротность вычисляется по формуле (15). В статическом режиме колебаний не происходит, стержни выполняют роль пьесонов, а статическая гибкость вычисляется по данным измерений усилия сжатия и деформации образца.

### Заключение

В работе предложен сравнительный метод измерения упругих и пьезоэлектрических параметров пьезоэлектрических полимерных материалов в диапазонах частот 1–1000 Гц и 20–100 кГц. В качестве метода измерения пьезомодуля использовалась нагруженная консоль, содержащая два пьезоэлемента – один – исследуемый образец, а второй – эталонный. Для измерения продольной гибкости предложена разновидность составного осциллятора, включающего исследуемый пьезоэлемент и два эталонных стержня – резонансный и антирезонансный. Полученные соотношения, аналогичные продольному составному осциллятору, позволяют вычислить величину продольной гибкости исследуемого образца пьезопленки по данным измерений основной частоты эталонного стержня и всего осциллятора в целом. Предложен также метод измерения внутреннего трения пьезопленки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system / Mahidur R. Sarker, Sabariah Julai, Mohd Faizul Mohd Sabri, Suhana Mohd Said, Md. Mainul Islam, Muhammad Tahir/ Sensors and Actuators: A. Physical, 300(14):111634.
2. D. Maurya, A. Pramanick, D. Viehland (Eds). Ferroelectric Materials for Energy Harvesting and Storage. 2021 Elsevier Ltd, UK, 362 pp.
3. Mechanical analysis of polymers / Kalim Deshmukh, Tomas Kovarik, Aqib Muzaffar, M. Basheer Ahamed, S.K. Khadheer Pasha / Polymer Science and Innovative Applications, 2020, Elsevier Inc., pp.117–152.
4. E. Gusalova, B. Gusalov, D. Zakharov, M. Bousquet, B. Viala, O. Cugat, J. Delamare, L. Gimeno, An improved method for piezoelectric characterization of polymers for energy harvesting applications, J. Phys. Conf. Ser. 476 (1) (2013) 012061.
5. Markys G. Cain (Ed.) Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films. N. Y. London : Springer , 2014, – 280 p.
6. Y. Roh, V. Varadan, V. K. Varadan. Characterization of All the Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants of Uniaxially Oriented Poled PVDF Films // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2002, V. 49, № 6, pp. 836-847..
7. K. Deshmukh, Tomas Kovarik, A. Muzaffar, M. Basheer Ahamed, S.K. Khadheer Pasha. Mechanical Analysis of Polymers (in Polymer Science and Innovative Applications). 2020, Elsevier. pp. 117-152.
8. M. G. González, P. A. Sorichetti, L. Ciocci Brazzano, G. D. Santiago. Electromechanical Characterization of Piezoelectric Polymer Thin Films in a Broad Frequency Range // Polymer Testing. 2014, V.37 , pp. 163-169
9. J. Marx. Use of the Piezoelectric Gauge for Internal Friction Measurements // Review of Scientific Instruments, 1951, Vol. 22, no.7, pp.503–509.
10. V. Tsaplev, R. Konovalov, S. Konovalov. Ultrasonic study of the higher order constants of the piezoelectric ceramics under high electric and mechanical stresses // Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 38, 045016 (2020)
11. В.М. Цаплев, Р.С. Коновалов, С.И. Коновалов, А.Д. Соловьева. Метод составного осциллятора для изгибных колебаний // Известия СПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. Т.17, №9. С.5-11.
12. E. L. Nix. M. Ward (1986) The measurement of the shear piezoelectric coefficients of polyvinylidene fluoride // Ferroelectrics, 1986. V. 67, №1, pp. 137-141.
13. Lucia Seminaraa, Marco Capurrob, Paolo Cirillo, Giorgio Cannatac, Maurizio Vallea. Electromechanical characterization of piezoelectric PVDF polymer films for tactile sensors in robotics applications // Sensors and Actuators A 169, 2011. pp. 49– 58.
14. [https://www.piezotest.com/d33\\_piezometer.php](https://www.piezotest.com/d33_piezometer.php).
15. A. W. Nolle. Methods for Measuring Dynamic Mechanical Properties of Rubber-Like Materials // Journal of Applied Physics, 1948, V. 19, August, pp. 753 – 774.

**Цаплев Валерий Михайлович**  
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.  
Санкт-Петербург  
д.т.н., профессор кафедры  
электроакустики и ультразвуковой  
техники  
197022, г. Санкт-Петербург, ул.  
Профессора Попова, д. 5, лит. Ф  
E-mail: valery@convergences-fr.ru

**Коновалов Роман Сергеевич**  
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.  
Санкт-Петербург  
к.т.н., зав. кафедрой  
электроакустики и ультразвуковой  
техники  
197022, г. Санкт-Петербург, ул.  
Профессора Попова, д. 5, лит. Ф  
ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-  
Петербург  
к.т.н., доцент кафедры «Наземные  
транспортно-технологические  
комплексы»  
190031, г. Санкт-Петербург,  
Московский пр., д. 9  
E-mail: rskonovalov@etu.ru

**Коновалов Сергей Ильич**  
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.  
Санкт-Петербург  
д.т.н., профессор кафедры  
электроакустики и ультразвуковой  
техники  
197022, г. Санкт-Петербург, ул.  
Профессора Попова, д. 5, лит. Ф  
E-mail: sikonalov.eut@gmail.com

**Дементьев Илья Игоревич**  
АО «Концерн «Океанприбор», г.  
Санкт-Петербург  
к.т.н., начальник учебно-  
методического центра  
197376, г. Санкт-Петербург,  
Чкаловский пр., д. 46  
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.  
Устинова, г. Санкт-Петербург  
к.т.н., доцент кафедры  
«Информационные системы и  
программная инженерия»  
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я  
Красноармейская, д. 1  
E-mail: mail@oceanprigor.ru

**Юлдашев Зафар Мухамедович**  
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.  
Санкт-Петербург  
д.т.н., зав. кафедрой  
биотехнических систем  
197022, г. Санкт-Петербург, ул.  
Профессора Попова, д. 5, лит. Ф  
E-mail: yuld@mail.ru

---

TSAPLEV V.M., KONOVALOV R.S., KONOVALOV S.I., DEMENTEV I.I., YULDASHEV Z.M.

## COMPARATIVE METHOD OF MEASURING ELECTROMECHANICAL PARAMETERS OF POLYMER PIEZOELECTRIC FILMS

**Abstract.** The article studies the parameters of film polymer piezoelectric materials of PVDF type. To develop a method for measuring the elastic and piezoelectric properties of piezoelectric polymer film materials within frequency range from a few Hertz to a few kilohertz. We obtained relationships that allowed us to calculate the values of the piezoelectric moduli or the elastic moduli of the specimen by comparing its output voltage with that from the reference piezoelectric element. The results obtained can be used to study the electromechanical properties of nanomaterials within the low-frequency range.

**Keywords:** piezopolymers, elastic console, composite oscillator, bending vibrations, elastic moduli, piezomodulus

## BIBLIOGRAPHY

1. Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system / Mahidur R. Sarker, Sabariah Julai, Mohd Faizul Mohd Sabri, Suhana Mohd Said, Md. Mainul Islam, Muhammad Tahir/ Sensors and Actuators: A. Physical, 300(14):111634.
2. D. Maurya, A. Pramanick, D. Viehland (Eds). Ferroelectric Materials for Energy Harvesting and Storage. 2021 Elsevier Ltd, UK, 362 pp.
3. Mechanical analysis of polymers / Kalim Deshmukh, Tomas Kovarik, Aqib Muzaffar, M. Basheer Ahamed, S.K. Khadheer Pasha / Polymer Science and Innovative Applications, 2020, Elsevier Inc., pp.117–152.
4. E. Gusalova, B. Gusalov, D. Zakharov, M. Bousquet, B. Viala, O. Cugat, J. Delamare, L. Gimeno, An improved method for piezoelectric characterization of polymers for energy harvesting applications, J. Phys. Conf. Ser. 476 (1) (2013) 012061.
5. Markys G. Cain (Ed.) Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films. N. Y. London : Springer , 2014, – 280 p.
6. Y. Roh, V. Varadan, V. K. Varadan. Characterization of All the Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants of Uniaxially Oriented Poled PVDF Films // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2002, V. 49, № 6, pp. 836-847.

7. K. Deshmukh, Tomas Kovarik, A. Muzaffar, M. Basheer Ahamed, S.K. Khadheer Pasha. Mechanical Analysis of Polymers (in Polymer Science and Innovative Applications). 2020, Elsevier. pp. 117-152.

8. M. G. González, P. A. Sorichetti, L. Ciocci Brazzano, G. D. Santiago. Electromechanical Characterization of Piezoelectric Polymer Thin Films in a Broad Frequency Range // Polymer Testing. 2014, V.37 , pp. 163-169

9. J. Marx. Use of the Piezoelectric Gauge for Internal Friction Measurements // Review of Scientific Instruments, 1951, Vol. 22, no.7, pp.503–509.

10. V. Tsaplev, R. Konovalov, S. Konovalov. Ultrasonic study of the higher order constants of the piezoelectric ceramics under high electric and mechanical stresses // Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 38, 045016 (2020)

11. The Complex Oscillator Method for Bending Vibrations / V. M. Tsaplev, R. S. Konovalov, S. I. Konovalov, A. D. Soloveva // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 9. P. 5–11.

12. E. L. Nix. M. Ward (1986) The measurement of the shear piezoelectric coefficients of polyvinylidene fluoride // Ferroelectrics, 1986. V. 67, №1, pp. 137-141.

13. Lucia Seminaraa, Marco Capurrob, Paolo Cirillo, Giorgio Cannatac, Maurizio Vallea. Electromechanical characterization of piezoelectric PVDF polymer films for tactile sensors in robotics applications // Sensors and Actuators A 169, 2011. pp. 49– 58.

14. <https://www.piezotest.com/d33 piezometer.php>

15. A. W. Nolle. Methods for Measuring Dynamic Mechanical Properties of Rubber-Like Materials // Journal of Applied Physics, 1948, V. 19, August, pp. 753 – 774

**Tsaplev Valery Mikhailovich**

Saint Petersburg Electrotechnical University  
Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology  
197022, St. Petersburg, 5 ul. Professora Popova  
E-mail: valery@convergences-fr.ru

**Konovalov Roman Sergeevich**

Saint Petersburg Electrotechnical University  
Cand. Sci. (Eng.), The Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology  
197022, St. Petersburg, ul. Professora Popova 5  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department Ground Transport and Technological Complexes  
190031, St. Petersburg, Moskovsky pr. 9  
E-mail: rskonovalov@etu.ru

**Konovalov Sergey Ilich**

Saint Petersburg Electrotechnical University  
Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology  
197022, St. Petersburg, ul. Professora Popova 5  
E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

**Dementev Ilya Igorevich**

JSC «Concern «Oceanpribor»  
Cand. Sci. (Eng.), Chief of Educational Center  
197376, St. Petersburg, Chkalovsky pr., 46  
BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department «Information Systems and Program Engineering»  
190005, St. Petersburg, 1-ya Krasnoarmeyskaya ul., 1  
E-mail: mail@oceanpribor.ru

**Yuldashev Zafar Muhamedovich**

Saint Petersburg Electrotechnical University  
Dr Sci. (Eng.), The Head of the Department of Biotechnical Systems  
197022, St. Petersburg, ul. Professora Popova 5  
E-mail: yuld@mail.ru

СИДОРИН В.В., ХАЛИЛЮЛИНА Н.Б.

## МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО АНАЛИЗА

**Аннотация.** В статье представлен метод управления научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, аванпроектами и другими видами проектной деятельности на основе поэтапного прогнозирования возможности получения запланированных результатов. В основе метода – Байесовская сеть, моделирующая процессы проектной деятельности. Её анализ с использованием априорной и апостериорной информации позволяет оценить вероятность получения требуемых результатов проекта и каждого из его этапов. Метод включает разработку Байесовской сети проекта и циклически повторяемую оценку вероятности выполнения последовательности его взаимозависимых этапов и проекта в целом. Применение метода поэтапного прогнозирования результатов обеспечит эффективность выполнения различных видов проектной деятельности.

**Ключевые слова:** проект, научно-исследовательская работа, опытно-конструкторская работа, аванпроект, прогнозирование результатов, Байесовская сеть, априорная вероятность, условная вероятность, апостериорная информация.

### Введение

Проектирование и разработка продукции как одна из стадий жизненного цикла имеет свои особенности в методах обеспечения качества [1,2,3]. Проектная деятельность, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИР и ОКР, соответственно), аванпроекты (АП), имеющие цель получения нового конкурентоспособного продукта, не повторяющего и не использующие результаты ранее выполненных работ, характеризуются высокой степенью творческой составляющей, направленной на поиск и реализацию оригинальных решений. При создании наукоёмкой высокотехнологичной продукции методы управления проектной деятельностью на основе организационно-методических и распорядительных документов становятся неэффективными. Необходимость минимизации рисков, повышения скорости получения и анализа больших объёмов информации для принятия обоснованных решений в реальном времени обуславливают актуальность разработки аналитических инструментов управления проектной деятельностью и соответствующих цифровых технологий их реализации.

Тенденции в смене концепций менеджмента качества указывают на перспективность ориентации в проектной деятельности на концепцию опережающего развития, ориентацию на создание нового конкурентоспособного продукта и его активное внедрение в потребительскую среду. Эффективная реализация этой концепции возможна путём объединения новых производственных технологий с технологиями управления методами и средствами искусственного интеллекта (ИИ). Инструменты для обоснованного принятия решений в технологиях искусственного интеллекта – получение и обработка цифровыми информационными технологиями больших объёмов данных, а также различные технологии и методы прогнозирования [4].

Это обуславливает актуальность поиска и разработки методов прогнозирования и оценки возможности достижения целей на различных этапах проектной деятельности для выбора оптимального из возможных вариантов решения задач.

Постановке и выполнению проекта – НИР ОКР, АП предшествует установление взаимоотношений с заказчиком, анализ его требований и возможностей исполнителя их выполнить, определение потребности в ресурсах для его выполнения [5,6,7,8]. После принятия организацией-исполнителем решения о готовности выполнить принятые обязательства по выполнению НИР, ОКР или АП в соответствии с контрактом (договором) и ТТЗ (ТЗ) последующая деятельность исполнителей состоит из поэтапного продвижения к цели, характеризующегося на каждом этапе значительной степенью неопределённости, т.е. риска. Поэтому в отличие от операционной деятельности, в основе управления которой – обеспечение стабильности системы процессов с целью обеспечения многократной воспроизводимости их результатов и постоянное улучшение [10], управление проектом, т.е. получением впервые нового уникального результата с ограниченными ресурсами [11-15], определяется также и результативностью прогнозирования возможности достижения поставленной цели. В связи с этим актуальной задачей является поиск и разработка методов,

обеспечивающих наиболее высокую степень достоверности прогнозирования результатов проектной деятельности.

Цель настоящей работы разработка метода повышения эффективности прогнозирования результатов при выполнении НИР, ОКР, АП. В его основе две составляющие. Первая из них - использование в прогнозировании как априорной экспертной оценки вероятности получения запланированного результата, так и детерминированной апостериорной информации проекта в целом. Вторая – поэтапное прогнозирование вероятности получения запланированных результатов на каждом из этапов проекта и выбор на основании прогноза оптимального способа его выполнения. Такой подход реализуется Байесовским анализом взаимосвязанных этапов проектной деятельности и Байесовской сетью (БС) – моделью функциональной структуры проекта.

С этой целью поставлены и решены с учётом современных подходов к обеспечению качества проектной деятельности следующие задачи:

- разработка графической модели в виде Байесовской сети проектной деятельности – функциональной структуры процессов, объединённых общей целью: выполнить требования заказчика;
- оценка априорной вероятности достижения целей каждого из узлов Байесовской сети – этапов моделируемого объекта.
- оценка условной вероятности достижения целей на каждом из этапов моделируемого объекта в предположении выполнения связанных с ними предшествующих и последующих этапов, другой апостериорной информации.
- последовательный расчёт вероятности выполнения и достижения целей совокупности связанных этапов в Байесовской сети и получение результатов прогнозирования как для каждого из них, так и для проекта в целом.

### 1. Байесовская сеть – функциональная структура проекта

Прогнозирование в проектной деятельности, НИР, ОКР, АП, основанное на Байесовском анализе, использует сочетание априорной вероятности оцениваемого события и апостериорную информацию, имеющую к нему отношение. В прогнозировании результатов проекта, НИР, ОКР или, аванпроекта - это поэтапный анализ вероятности выполнения заданных требований по их функциональной структуре. Теоретическая основа анализа - теорема Байеса о соотношении априорной и условной вероятности реализации оцениваемого прогнозируемого события. Анализ позволяет количественно оценить параметры функциональной структуры проекта, НИР, ОКР или аванпроекта, вероятность достижения целей их этапов, дополняя и уточняя априорную экспертную их оценку эмпирической, апостериорной информацией, данными предшествующих аналогичных работ и опытом в смежных видах деятельности.

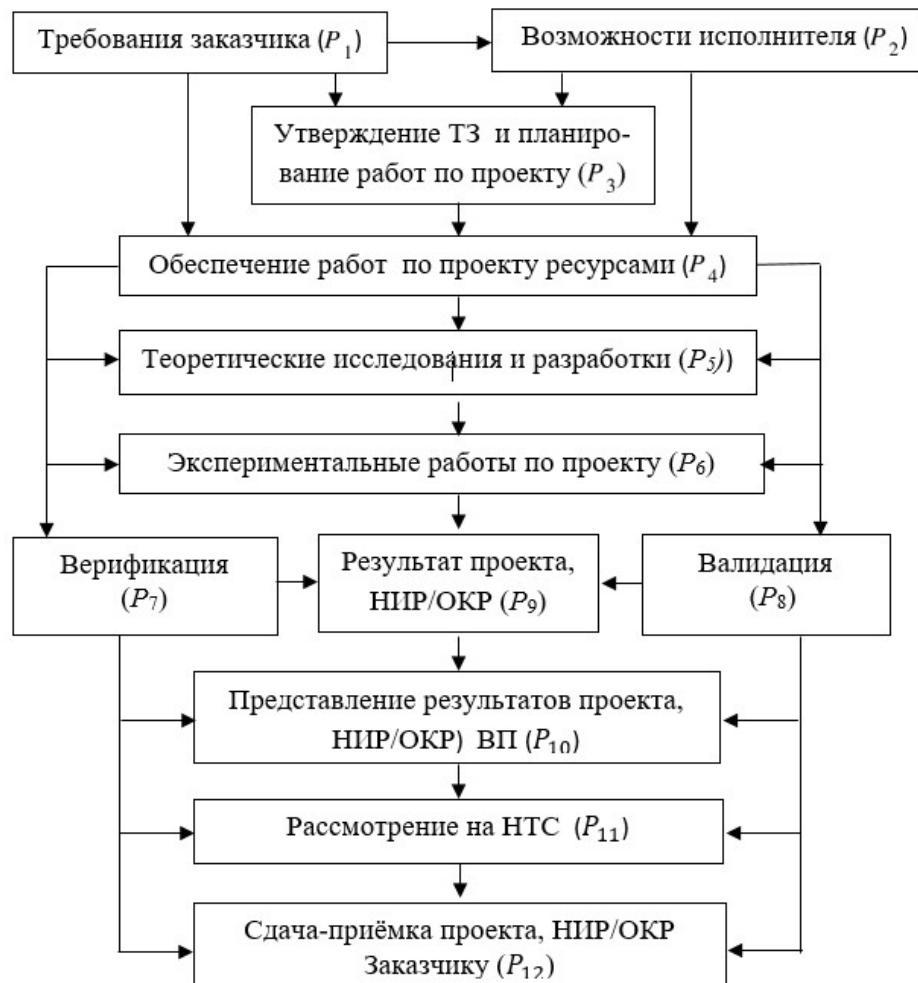
Функциональная структура проекта, НИР, ОКР или аванпроекта в таком подходе к прогнозированию их результатов моделируется Байесовской сетью (рисунок 1).

Байесовская сеть представляет собой функциональную структуру проектной деятельности – НИР, ОКР, аванпроекта с вероятностью выполнения требований и достижения целей на каждом из её этапов. Графическая модель проекта - Байесовская сеть визуализирует причинно-следственные связи его этапов, количественно оценивая их вероятностью выполнения своих функций. Вариант Байесовской сети в виде диаграммы влияния использует для прогнозирования возможности достижения поставленных целей переменные значения образующих её элементов - этапов проекта, НИР, ОКР, представляющие собой неопределенности, ожидаемые результаты и ведущие к ним действия.

Действия необходимые для выполнения работ по проекту, НИР, ОКР, АП, моделируются Байесовской сетью, узлы в которой – этапы работы, оцениваемые вероятностью выполнения установленных для них требований. Связи узлов между собой обозначают влияния предшествующих узлов на последующие, что оценивается значением условной вероятности их выполнения в зависимости от рисков и вероятности реализации предшествующих этапов.

Так, вероятность ( $P_1$ ) получить от заказчика в полном объёме и в установленный срок требования к планируемому к постановке проекту, НИР, ОКР, АП определяет возможность для организации-исполнителя своевременно приступить к его выполнению. Для этого ей потребуется проанализировать свои возможности выполнить требования заказчика, сопоставив свой потенциал с требованиями к проекту и оценить степень своей готовности

условной вероятностью ( $P_2$ ) с учётом её апостериорной вероятности ( $P_{2|1}$ ). Следующий этап – разработка, согласование и утверждение тактико-технического (технического) задания (ТТЗ, ТЗ) на выполнение работ по проекту, НИР, ОКР, АП оценивается значением вероятности ( $P_3$ ) и зависит как от получения от заказчика требований с вероятностью ( $P_1$ ), так и от оценки возможностей организации-исполнителя эти требования выполнить – априорная вероятность ( $P_2$ ).



*Рисунок 1 - Байесовская сеть – графическая модель проектной деятельности с оценкой вероятности достижения установленных целей на каждом из её этапов*

Выполнению работ по проекту в соответствии с ТТЗ (ТЗ) предшествует обеспечение их необходимыми ресурсами и зависит как от требований заказчика, так и от возможностей исполнителя. Обеспечение необходимыми ресурсами для выполнения требований заказчика включает удовлетворение требований исполнителей к номенклатуре, качеству и своевременности поставки ресурсов. Вместе с зависимостью от этих факторов, а также с учётом рисков, связанных с деятельностью по обеспечению ресурсами, выполнение требований по обеспечению работ по проекту необходимыми ресурсами оценивается значением вероятности ( $P_4$ ) достижения цели на этом этапе.

Результативность теоретической части работы по проекту, НИР, ОКР, АП зависит не только от правильности выбранного направления и методов исследования и разработки, а также ряда других влияющих факторов, но и от результатов предшествующих этапов – утверждения ТТЗ (ТЗ) и обеспечения соответствующими ресурсами, что и оценивается в совокупности значением вероятности ( $P_5$ ) получения требуемого результата. Теоретические исследования могут выполняться как собственными силами организации-исполнителя, так и с привлечением сторонних организаций.

Это относиться и к экспериментальной части проекта. Зависимость от предшествующих процессов и рисков, связанных с постановкой и выполнением экспериментальных работ, оценивается значением вероятности ( $P_6$ ) получения запланированных результатов.

Степень соответствия полученных результатов установленным требованиям к проекту оценивается процессами верификации, требующими для этого соответствующих методов и средств, компетентного персонала и условий для получения информации о результатах разработки. Их виды, метрологические, технические и эксплуатационные характеристики определяются потребностями организации-исполнителя проекта, а также требованиями к ресурсному обеспечению проекта. А возможность достижения целей верификации оценивается в Байесовской сети значением условной вероятности ( $P_7$ ).

Подобно верификации, установление соответствия полученных результатов в проекте требованиям для конкретного применения, устанавливается процессами валидации. Возможность достижения целей валидации оценивается значением вероятности ( $P_8$ ).

Верификацией и валидацией получение требуемых результатов проекта, НИР, ОКР, АП, устанавливается с вероятностью ( $P_9$ ).

Результаты разработки, а также данные верификации и валидации являются необходимыми и достаточными условиями для принятия результатов проекта, НИР, ОКР, АП отделом технического контроля (ОТК) организации-исполнителя и представителем государственного заказчика – военным представительством (ВП) в случае выполнения работ по государственному оборонному заказу (ГОЗ). Вместе с ними, а также с учётом рисков и других влияющих факторов вероятность принятия результатов разработки ОТК и ВП оценивается значением вероятности ( $P_{10}$ ).

Последующие этапы – это рассмотрение результатов проекта, НИР, ОКР, АП на коллегиальном органе организации-разработчика, научно-техническом совете, в частности (НТС) для принятия решения о возможности представления результатов разработки заказчику. Вероятность положительной оценки результатов рассмотрения ( $P_{11}$ ) зависит от результатов предшествующих процессов - верификации, валидации и приемки проекта ОТК и ВП.

Представление результатов проекта заказчику, как и в предшествующих этапах, осуществляется при условии выполнения следующих условий: положительные результаты верификации, валидации и приемки работы ОТК и ВП, что в совокупности оценивается значением условной вероятности ( $P_{12}$ ).

Анализ проектной деятельности по её модели - Байесовской сети (БС) включает определение априорных значений вероятности событий экспертной оценкой или по имеющимся данным о предыдущей или аналогичной деятельности, получение апостериорной информации и расчёт условной вероятности получения запланированного результата на каждом из этапов проекта.

## 2. Управление проектом на основе прогнозирования и поэтапной оценки вероятности выполнения заданных требований

Своевременной принятие и реализация управленческих решений для достижения поставленной цели на каждом этапе выполнения работ по проекту, в НИР, ОКР, АП требует соответствующего информационного сопровождения. В его составе достоверная своевременная и объективная оценка состояния выполняемых работ с учётом влияющих факторов и прогноз вероятности получения запланированных результатов. Оценить вероятность выполнения установленных требований по априорной, а также апостериорной, полученной в аналогичных или выполняемых ранее подобных работах, информации как последовательности зависимых событий позволяет Байесовский анализ и Байесовская модель процесса (рисунок1). Функциональная структура проектной деятельности, НИР, ОКР, АП в их укрупнённом варианте в виде Байесовской сети представляет собой последовательность зависимых событий, вероятность реализации каждого из которых определяется произведением безусловной (априорной) вероятности одного из них на условные вероятности остальных. Значения условных вероятностей каждого последующего из совокупности этих событий вычисляются в предположении того, что все предыдущие связанные с ними события уже состоялись [15].

$$(P_{n, m, k, \dots l}) = (P_n) (P_{m|n}) (P_{k|m}) \dots (P_{l|n, m, l+1, n+2}) \dots (P_{n+m|n, n+1, n+2, \dots n+m-1}), \quad (1)$$

где  $m, n, k \dots l$  – последовательность зависимых событий – этапов проектной деятельности – НИР, ОКР, АП, моделируемых Байесовской сетью.

Так, вероятность ( $P_3$ ) согласования и утверждения ТТЗ (ТЗ) на работы по проекту зависит от выполнения двух предшествующих событий – своевременного получения в полном объёме требований на планируемую работу от заказчика с вероятностью ( $P_1$ ) и положительной оценки с вероятностью ( $P_2$ ) организацией-исполнителем своих возможностей для принятия на себя обязательств по её выполнению. Вероятность ( $P_{3|2,1}$ ) и представления заказчиком требований, и анализа исполнителем готовности их выполнить, и согласования ТТЗ (ТЗ), рассчитывается как вероятность трех зависимых событий, одно из которых приводит к реализации двух других, т.е. как произведение априорной вероятности одного из событий на условные вероятности двух других, при условии, что каждое из предшествующих уже произошло:

$$(P_{3|2,1}) = (P_1) (P_{2|1}) (P_{3|2,1}), \quad (2)$$

где ( $P_{3|2,1}$ ) - условная вероятность согласования ТТЗ (ТЗ) как следствие состоявшихся двух предшествующих событий с вероятностью ( $P_1$ ) и ( $P_2$ ), соответственно. Первое из них - представленные с вероятностью ( $P_1$ ) заказчиком в полном объёме и в установленные сроки требования к проекту, НИР, ОКР, АП. Второе – положительное решение по результатам анализа организацией-исполнителем возможности выполнить с условной вероятностью ( $P_{2|1}$ ) представленные заказчиком требования. Эта условная вероятность, с которой организация-исполнитель оценивает свои возможности выполнить представленные заказчиком требования к проекту, рассчитывается по формуле:

$$(P_{2|1}) = \frac{(P_2)}{(P_1)} (P_{1|2}), \quad (3)$$

где ( $P_2$ ) – безусловная (априорная) вероятность проведения организацией -разработчиком оценки с положительным результатом своих возможностей выполнить требования заказчика; ( $P_{1|2}$ ) – оценка вероятности представления заказчиком требований к проекту в полном объёме и в установленные сроки после того, как организация-исполнитель в результате анализа дала положительную оценку своим возможностям их выполнить.

Если оценить безусловную (априорную) вероятность получения организацией-исполнителем от заказчика требований как ( $P_1$ ) = 0,70, априорную вероятность положительной оценки готовности организацией-исполнителем их выполнить значением ( $P_2$ ) = 0,60, а вероятность того, что требования заказчиком были представлены, т.к. организация-исполнитель выполнила анализ своих возможностей, могут быть оценены значением ( $P_{1|2}$ ) = 0,90, то условная вероятность, с которой организация-исполнитель положительно оценивает свои возможности выполнить проекту, рассчитанное по формуле (2), составит: ( $P_{2|1}$ ) = 0,77.

Аналогично определяется условная вероятность ( $P_{3|2,1}$ ) согласования ТТЗ (ТЗ) как следствие состоявшихся с соответствующими вероятностями двух предшествующих событий:

$$(P_{3|1,2}) = (P_3) \frac{(P_{1,2|2})}{(P_{1,2})}, \quad (4)$$

где ( $P_3$ ) – безусловная (априорная) вероятность согласования ТТЗ (ТЗ); ( $P_{1,2}$ ) – вероятность реализации последовательности двух событий - представления заказчиком своих требований к проекту с вероятностью ( $P_1$ ) и положительная оценка готовности исполнителя выполнить требования заказчика с вероятностью ( $P_2$ ):

$$(P_{1,2}) = (P_1) \frac{(P_{2|1})}{(P_{1|2})} \quad (5)$$

С учётом приведённого выше расчёта ( $P_{2|1}$ ) = 0,77 значение ( $P_{1,2}$ ) оказывается равным 0,60.

Априорные вероятности каждого из трёх событий определяются экспертым методом с учётом предшествующего опыта, анализа рисков, опыта аналогичной деятельности, включая информацию как внешнего, так и внутреннего происхождения. Апостериорные вероятности, оцениваемые на основе данных уже состоявшихся событий или предшествующего аналогичного опыта, позволяют уточнить априорные оценки вероятностей каждого из трёх событий. Так, например, экспертная оценка априорной вероятности согласования ТТЗ (ТЗ) до получения требований от заказчика обоснованно невысока из-за значительной

неопределённости в положительном исходе предшествующих событий – получения от заказчика требований к проекту и положительной оценки исполнителем их выполнить и может быть и менее ( $P_3$ ) = 0,50. На основании того, что произошло согласование и утверждение ТТЗ (ТЗ), оценка вероятности ( $P_{1,2|3}$ ) представления заказчиком своих требований и вероятности принятия положительного решения исполнителя о готовности их выполнить может дать высокую оценку порядка 0,9. Тогда вероятность согласования и утверждения ТТЗ (ТЗ), рассчитанная по формуле (3), составит ( $P_{3|1,2}$ ) = 0,75.

С учётом полученных значений расчёт по формуле (1) вероятности реализации трех этапов в проекте, включая этап согласования ТТЗ (ТЗ) даст следующий результат:

$$(P_{3,2,1}) = (P_1) (P_{2|1}) (P_{3|2,1}) = 0,40 \quad (6)$$

По той же схеме прогнозируется обеспечение проекта, НИР, ОКР, АП ресурсами с учётом реализации влияющих на него предшествующих событий. Вероятность ( $P_{4,3,2}$ ) реализации последовательности выполнения этих зависимых событий оценивается произведением безусловной вероятности обеспечения проекта ресурсами ( $P_4$ ) и условными вероятностями выполнения предшествующих этапов в предположении, что обеспечение проекта ресурсами состоялось:

$$(P_{4,3,2}) = (P_2) (P_{3|2}) (P_{4|3,2}), \quad (7)$$

где ( $P_{4|3,2}$ ) - вероятность того, что проект будет обеспечен ресурсами при условии выполнения двух предшествующих этапов, один из которых - разработка и утверждение организацией-исполнителем ТТЗ (ТЗ) с вероятностью ( $P_3$ ), а второй - оценка исполнителем возможностей выполнить требования заказчика с вероятностью ( $P_2$ ). Её значение может быть рассчитано по формуле теоремы Байеса:

$$(P_{4|3,2}) = (P_4) \frac{(P_{3,2|4})}{(P_{2,3})} \quad (8)$$

В основе оценки апостериорной вероятности ( $P_4$ ) экспертным методом - значительная степень неопределённости, обусловленная отсутствием достоверной информации о требованиях заказчика к проекту и о результатах анализа готовности организаций-исполнителя их выполнить до их получения. С учётом этого её экспертная оценка может быть не более 0,60.

Вероятность выполнения последовательности второго и третьего этапов определяется как ( $P_{2,3}$ ) = ( $P_2$ ) ( $P_{3|2}$ ), где ( $P_{3|2}$ ) – оценка условной вероятности исполнителя выполнить требования заказчика, т.е. когда согласование и утверждение ТТЗ (ТЗ) состоялось. Её значение может составить не менее 0,90. С учётом ( $P_2$ ) = 0,60 вероятность  $P_{2,3}$  выполнения последовательности второго и третьего этапов оказывается равной 0,54.

Вместе с ранее рассчитанной условной вероятностью согласования ТТЗ (ТЗ) ( $P_{3|1,2}$ ) = 0,75 и оценкой условной вероятности реализации трех предшествующих этапов ( $P_{3,2|4}$ ) = 0,65, полученной как на основе результатах их выполнения, так и на основе предшествующего опыта, уточнённая оценка условной вероятности ( $P_{4|3,2}$ ) обеспечения проекта необходимыми ресурсами согласно (6), составит 0,72.

Достижение поставленных целей при выполнении теоретических исследований в проекте, НИР/ОКР оценивается значением априорной вероятности ( $P_5$ ). А условная вероятность их выполнения, зависящая от предшествующих процессов: утверждения ТТЗ (ТЗ) с вероятностью ( $P_3$ ) и обеспечения ресурсами с вероятностью ( $P_4$ ) вычисляется по формуле теоремы Байеса:

$$(P_{5|3,4}) = (P_5) \frac{(P_{3,4|5})}{(P_{3,4})} \quad (9)$$

Априорная вероятность ( $P_5$ ) устанавливается организацией экспертным методом с учётом накопленного опыта, научно-технического задела, рисков, связанных с новыми требованиями к проекту, потенциала исполнителей и рядом других факторов. Для примерного расчёта её значение может быть принято равным 0,70.

Вероятность выполнения последовательности третьего и четвёртого этапов определяется как ( $P_{3,4}$ ) = ( $P_3$ ) ( $P_{4|3}$ ), где ( $P_{4|3}$ ) – оценка вероятности обеспечения работ по проекту ресурсами, состоявшейся после согласования и утверждения ТТЗ (ТЗ). Её значение может оценено на уровне 0,80. С учётом ( $P_3$ ) = 0,50 вероятность выполнения последовательности третьего и четвёртого этапов оказывается равной ( $P_{3,4}$ ) = 0,40. Значение условной вероятности ( $P_{3,4|5}$ ) - согласования ТТЗ (ТЗ) и обеспечения работ по проекту

ресурсами по данным о состоявшемся результативном выполнении теоретической части работы может быть оценено выше значением порядка 0,85.

Рассчитанное по формуле (8) значение условной вероятности ( $P_{5|3,4}$ ) выполнения теоретической части работ по проекту составит 0,79.

Вероятность выполнения последовательности трёх зависимых процессов - утверждения ТТЗ (ТЗ) с вероятностью ( $P_3$ ), обеспечения ресурсами с вероятностью ( $P_4$ ) и выполнения теоретических исследований с вероятностью ( $P_5$ ) определяется произведением априорной вероятности одного из событий на условные вероятности остальных и составляет:

$$(P_{5,4,3}) = (P_5) (P_{4|5}) (P_{3,4|5}) \quad (10)$$

Условная вероятность ( $P_{4|5}$ ) обеспечения работ по проекту ресурсами, оцениваемая после получения информации о выполнении теоретической части проекта, рассчитывается по значениям априорной вероятности ( $P_4$ ) обеспечения ресурсами работ по проекту, априорной вероятности ( $P_5$ ) выполнения теоретических исследований по проекту и условной вероятности выполнения теоретической части проекта при условии обеспечении их требуемыми ресурсами ( $P_{5|4}$ ):

$$(P_{4|5}) = (P_4) \frac{(P_{5|4})}{(P_5)}.$$

Аналогично рассчитываются значения вероятностей выполнения требований на всех этапах проекта, НИР, ОКР, АП. Вычисления усложняются при большом числе причинно-следственных связей на этапах проекта, определяющих условия их реализации, что указывает на необходимость обращения к цифровым информационным технологиям с соответствующим программным обеспечением для обработки большого количества данных.

### 3. Байесовский прогноз как метод управление проектом

Рассмотренный выше подход к прогнозированию результатов проектов, НИР, ОКР, АП и другой впервые выполняемой деятельности в целесообразно применять, последовательно осуществляя декомпозицию укрупнённой исходной Байесовской сети проекта на фрагментарные Байесовские сети его этапов и отдельных работ в них (рисунок 2). Составляя единое целое для последовательного прогнозирования проектной деятельности, общая Байесовская сеть выявляет проблемные этапы по меньшим значениям оценки вероятности достижения поставленных для них целей, чем для других этапов. Устанавливая таким образом очерёдность в решении проблем, метод позволяет последовательно управлять всеми видами работ в проектной деятельности, включая взаимодействие с заказчиками, заинтересованными сторонами, поставщиками, переданными процессами, персоналом, всеми видами ресурсов.

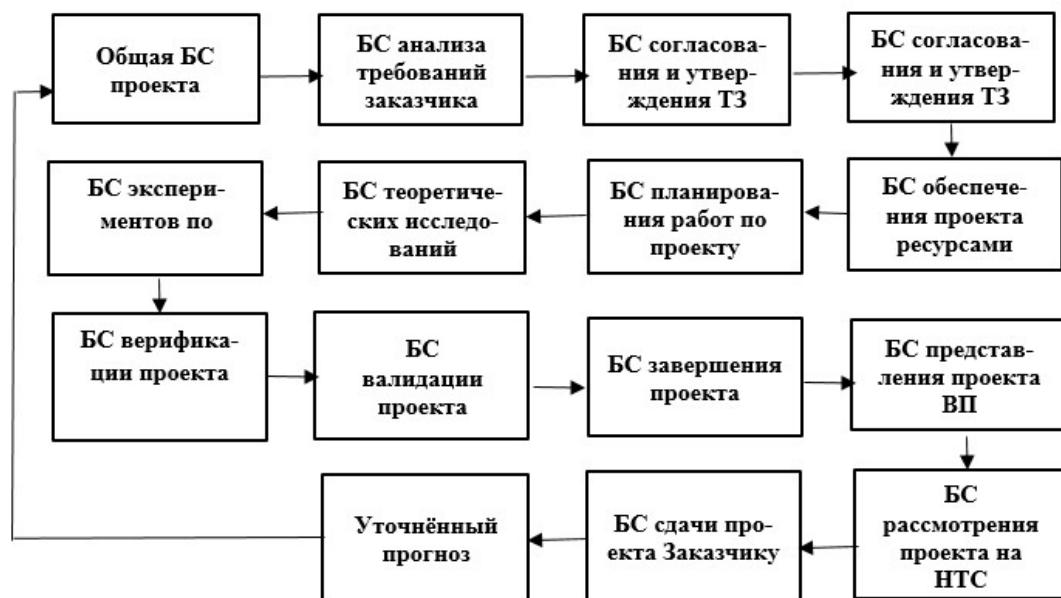


Рисунок 2 - Процесс последовательного уточнения результатов прогнозов проектной деятельности анализом их Байесовских сетей на этапах его выполнения

В качестве примера разукрупнение общей Байесовской сети проекта представлено для этапа выполнения работ по выполнению требований заказчика. Этап детализируется на такие

составляющие как: планирование, теоретические и экспериментальные исследования, причём выполняемые как собственными силами организации-исполнителя, так и сторонними организациями. Модель этого этапа, связанного с предшествующими и последующими процессами проекта, в виде детализированной Байесовской сети представлена на рисунке 3 как фрагмент общей сети проекта.

Байесовский прогноз вероятности эффективного планирования работ по проекту на этом разуточнённом этапе оценивается как значением априорной вероятности ( $P_{3-1}$ ), так и значениями его условной вероятности, определяемыми в предположении о состоявшихся предшествующих и последующих процессах. Предшествующие процессы – это утверждение ТЗ с вероятностью ( $P_3$ ) и обеспечение ресурсами с вероятностью ( $P_4$ ). Последующие процессы – это достигшие своих целей с вероятностью ( $P_{3-2}$ ) переданные (аутсорсинговые) процессы и с вероятностью ( $P_{3-3}$ ) собственные процессы организации-исполнителя теоретических и экспериментальных исследований. Вероятность достижения цели планирования в совокупности предшествующих и последующих процессов определяется как:

$$(P_{3-1,4,3-2,3-3}) = (P_{3-1}) (P_{3|3-1}) (P_{4|3,3-1}) (P_{3-2|3,3-1,4,3-2}), \quad (11)$$

Выполнение теоретической и экспериментальной части проекта возможно как собственными силами – процессами организации-исполнителя, так и с привлечением сторонних организаций. Соответственно, деятельность каждого из исполнителей зависит от результатов предшествующих этапов – выполняемых ими теоретических и экспериментальных исследований, а также от свойственных их деятельности рисков. С учётом влияния этих факторов вероятность достижения поставленной цели в собственных процессах организации-исполнителя и аутсорсинговых процессах оценивается значениями как априорной ( $P_7$ ) и ( $P_8$ ), соответственно, так и их условных вероятности, оцениваемых с учётом апостериорной информации. Вероятность достижения поставленной цели этого и всех других процессов в Байесовской сети рассчитываются аналогично.

Детализация каждого из последующих этапов проекта, моделирование их деятельности Байесовской сетью с соответствующими видами деятельности и её анализ позволяет получить прогноз их результатов, а в совокупности – уточнённый прогноз результатов всего этапа.

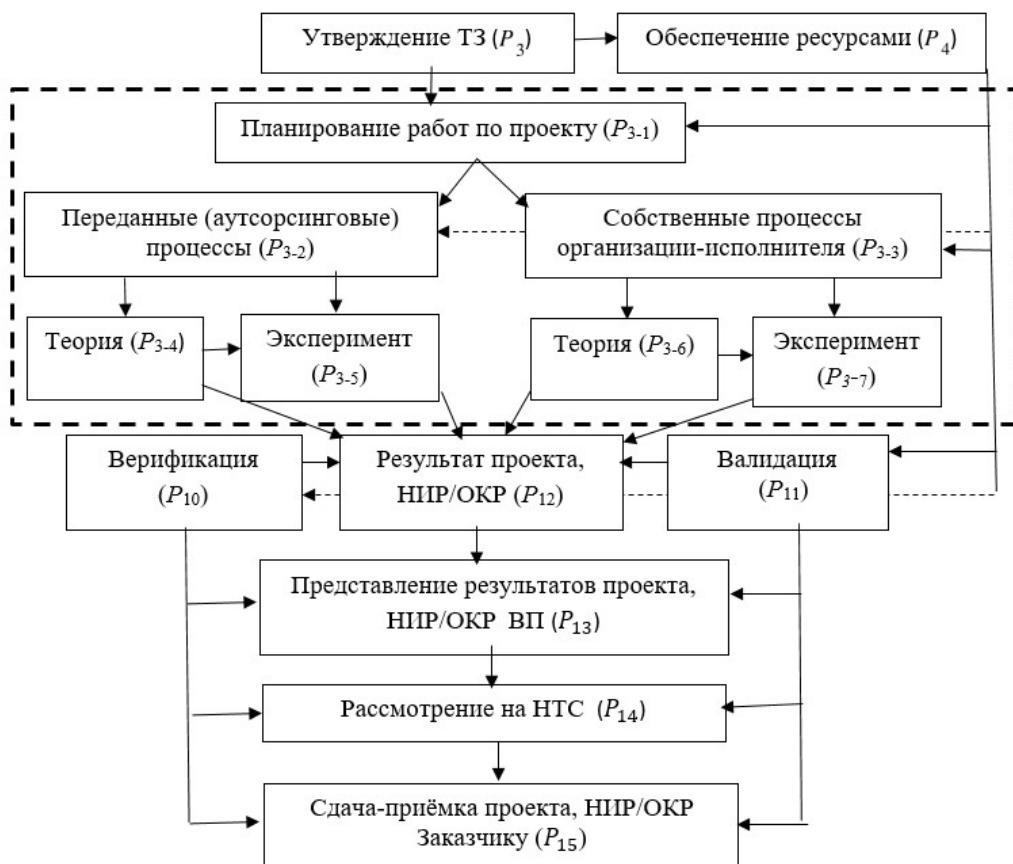


Рисунок 3 - Байесовская сеть этапа теоретических и экспериментальных работ – элемента укрупненной Байесовской сети проекта (выделена штриховой линией)

Принципиальными основами и алгоритмом реализации представленного метода являются следующие его основные положения.

1. Моделирование Байесовской сетью объекта прогнозирования результатов – проекта, НИР, ОКР, АП, или иной деятельности по получению впервые нового оригинального результата.

2. Идентификация данных для определения состояния деятельности системы, получение априорных данных о деятельности системы и её процессов

3. Оценка априорной вероятности достижения целей каждого из узлов Байесовской сети – этапов моделируемого объекта.

4. Оценка условной вероятности достижения целей на каждом из этапов моделируемого объекта в предположении выполнения связанных с ними предшествующих и последующих этапов, другой апостериорной информации.

5. Планирование выполнения действий по проекту с поэтапным их распределением по срокам и ожидаемым результатам на основе оценки условной вероятности достижения поставленных целей по априорной вероятности и апостериорным данным;

6. Оценка полученных результатов на каждом из этапов, разработка и внесение изменений в него и в полученные результаты (в случае обоснованной необходимости);

7. Оценка вероятности достижения поставленной цели на каждом следующем этапе проекта по априорной вероятности получения запланированных результатов и апостериорным данным, принятие решения о его выполнении;

8. Последовательный расчёт вероятности выполнения и достижения целей совокупности связанных этапов в Байесовской сети и получение результатов прогнозирования как для каждого из них, так и для проекта в целом.

9. Выявление проблемных этапов проекта по значению вероятности достижения их целей, меньших установленного уровня.

10. Разукрупнение Байесовской сети объекта прогнозирования в отношении проблемных этапов и детализированное их моделирование фрагментарными Байесовскими сетями.

11. Выполнение в отношении фрагментарных Байесовских сетей действий, представленных выше в п.п.2-6.

12. Принятие решения о итерации прогнозирования до достижения уровня соответствия установленным критериям на основании оценки вероятности и прогнозирования результатов по общей и фрагментарным Байесовским сетям решения о итерации прогнозирования до достижения уровня соответствия установленным критериям.

13. Оценка вероятности выполнения проекта в целом и сдачи работы заказчику;

14. Выполнение работ по проекту, накопление данных и повторение цикла анализа с дополненными и уточнёнными данными в процессе выполнения работ по проекту (при необходимости).

15. Сбор, анализ, структурирование информации по результатам прогнозирования, формирование базы данных для использования в качестве апостериорной информации в последующих прогнозах.

### **Заключение.**

Представленный метод является первым этапом в реализации концепции системного управления проектной деятельностью с применением технологий искусственного интеллекта [4]. Его реализация средствами цифровых технологий позволит затем подойти к его применению для прогнозирования результатов НИР, ОКР, АП и других видов проектной деятельности, а также оптимизации процессов в системах менеджмента качества с нейросетью и другими технологиями искусственного интеллекта.

Это потребует разработки соответствующих средств программной и аппаратной поддержки представленного метода. Прогнозируя результаты, метод является инструментом управление проектом при его выполнении адекватным и своевременным реагированием на существующие и предполагаемых воздействия различных влияющих факторов.

Перспективы применения метода просматриваются в связи с целесообразностью и возможностью его распространении и на другие стадии жизненного цикла в системном подходе к менеджменту качества создаваемой продукции. Факторы риска на этих стадиях создают состояние неопределенности в получении запланированных результатов, достижении поставленных целей. Эта проблема может быть решена прогнозированием результатов и

управлением процессами на всех стадиях жизненного цикла с учётом результатов прогнозирования внедрением представленного метода в систему менеджмента качества организаций.

Последующее применение метода в системах менеджмента качества всех входящих в цепочку поставок организаций обеспечит эффективность управления качеством на всех стадиях жизненного цикла создаваемой и применяемой финальной продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
2. ГОСТ РВ 0015-002-2020 Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Требования.
3. ГОСТ Р 58876-2020 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования. М.: Стандартинформ, 2020.
4. Сидорин В.В. Система менеджмента качества организации с технологиями искусственного интеллекта//Организатор производства, Т 32 №1 2024, С 54-70.
5. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 16 с.
6. ГОСТ Р 15.101-2021 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ. М.: ФГУП «Стандартинформ», 14 с.
7. ГОСТ Р 15.301-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство, М.: ФГУП «Стандартинформ», 15 с.
8. ГОСТ РВ 15.203-2001 Система разработки и постановки продукции. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения. М.: 130 с.
9. ГОСТ РВ 15.103-2004 Система разработки и постановки продукции на производство военная техника порядок выполнения аванпроекта и его составных частей Основные положения. М.: 41 с.
10. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.
11. ГОСТ Р ИСО 10006-2019 Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах. М.: ФГУП «Стандартинформ», 32 с.
12. ГОСТ Р 54869-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом М.: ФГУП «Стандартинформ», 9 с.
13. ГОСТ Р 54870-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов М.: ФГУП «Стандартинформ», 8 с.
14. ГОСТ Р 54871-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению программой. М.: ФГУП «Стандартинформ», 8 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М: «НАУКА». 1969. 567 с.

**Сидорин Виктор Викторович**

Руководитель Учебного центра Автономной некоммерческой организации «Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники» (АНО «ИнИС ВВТ»), доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Автономная некоммерческая организация «Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники» (АНО «ИнИС ВВТ»), 111524, Москва, Электродная улица, д.10, E-mail: wwsid@yandex.ru

**Халилюлина Надежда Борисовна**

Заведующая сектором системы менеджмента качества ИПФ РАН, аспирант кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, E-mail: nbh@ipfran.ru

SIDORIN V.V., KHALILULINA N.B.

## THE METHOD OF FORECASTING AND PROJECT MANAGEMENT BASED ON BAYESIAN ANALYSIS

**Abstract.** The article presents a method for managing research and development work, advance projects and other types of project activities based on step-by-step forecasting of the possibility of obtaining planned results. The method is based on a Bayesian network that models the processes of project activity. Its analysis using a priori and a posteriori information allows us to assess the probability of obtaining the required results of the project and each of its stages. The method includes the development of a Bayesian network of the project and a cyclically repeated assessment

of the likelihood of completing a sequence of its interdependent stages and the project as a whole. The application of the method of step-by-step forecasting of results will ensure the effectiveness of various types of project activities.

**Keywords:** project, research work, development work, advance design, forecasting of results, Bayesian network, a priori probability, conditional probability, a priori information.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. M.: Stan-dartinform, 2015. 18 p.
2. GOST RV 0015-002-2020 System for the development and commissioning of military equipment. Quality management systems. Requirements.
3. GOST R 58876-2020 Quality management systems of organizations of the aviation, space and defense industries. Requirements. M.: Standartinform, 2020.
4. Sidorin V.V. Quality management system of an organization with artificial intelligence technologies//Production organizer, T 32 No. 1 2024, From 54-70.
5. GOST R 15.000-2016 System of product development and commissioning. The main provisions. M.: FSUE "Standartinform", 16 p.
6. GOST R 15.101-2021 System of product development and commissioning. The procedure for carrying out research work. M.: FSUE "Standartinform", 14 p.
7. GOST R 15.301-2016 System of product development and commissioning. Products for industrial and technical purposes
8. GOST RV 15.203-2001 Product development and production system. Military technology. The procedure for performing development work on the creation of products and their components. Basic provisions. M.: 130 p.
9. GOST RV 15.103-2004 System for the development and production of military equipment, the procedure for the implementation of an advance project and its components, Basic provisions. M.: 41 p.
10. GOST R ISO 9000-2015 Quality management systems. Basic provisions and dictionary. M.: Standartinform, 2015. 48 p.
11. GOST R ISO 10006-2019 Quality management. Guidelines on quality management in projects. Moscow: FSUE "Standartinform", 32 p.
12. GOST R 54869-2011 Project management. Requirements for project management M.: FSUE "Standartinform", 9 p.
13. GOST R 54870-2011 Project management. Requirements for project portfolio management M.: FSUE "Standartinform", 8 p.
14. GOST R 54871-2011 Project management. Requirements for program management-my. M.: FSUE "Standartinform", 8 p.
15. Wentzel E.S. Probability theory. Moscow: NAUKA. 1969. 567 p.

**Sidorin Victor Victorovich**

Head of the Training Center of the Autonomous Non-profit Organization "Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment"(ANO "InIS VVT"), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electronics at the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA, 111524, Moscow, Electrode Street, 10  
E-mail: wwsid@yandex.ru

**Khalilulina Nadezhda Borisovna**

Head of the Quality Management System Sector of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate student of the Electronics Department of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA RTU MIREA Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center Institute of Applied Physics named after A.V. Gaponov-Grekhov Russian Academy of Sciences", Nizhny Novgorod, Ulyanova str., 46, E-mail: nbh@ipfran.ru

© Сидорин В.В., Халилуллина Н.Б., 2025

УШАКОВ М.В., ВОРОБЬЕВ И.А., НИКОЛЬСКИЙ С.М.

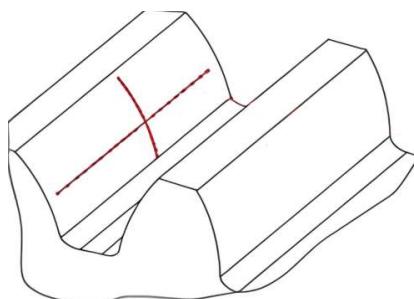
## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Аннотация.** В настоящей статье рассмотрена возможность использования метода координатного контроля при проведении оценки качества изготовления зубчатых колес. Приведено обоснование выбора минимально необходимого числа и расположения контрольных точек на боковой поверхности зубчатых колес. Рассмотрены основные виды погрешностей боковых поверхностей зубчатых колес, приведены их возможные источники возникновения. Представлены формулы и системы уравнений, описывающие аналитические модели аппроксимирующих поверхностей зубьев. На основе зубчатых колес с разным значением модуля и числом зубьев приведены расчеты по определению числа резов при зубообработке и величины их шагов. Приведена зависимость, отсылающая размер шага между резами на разных участках эвольвенты зубчатого колеса. Даны рекомендации по расположению и количеству точек контроля в зависимости от вида погрешности зуба колеса.

**Ключевые слова:** Координатные измерения, точки контроля, сетка погрешностей, зубчатое колесо, зубообработка, КИМ.

### Введение

При контроле параметров зубчатых колес следует учитывать, что представляемыми результатами контроля являются комплексные показатели, относящиеся ко всей поверхности зуба или центра его расположения [1]. Ввиду регулярности контролируемых поверхностей оценка данных параметров может проводиться по «частным» замерам. Так для определения поверхности зуба достаточно измерить его направляющую и образующую по центру поверхности (рисунок 1), проделав при этом до 150 замеров [2]. При этом вся поверхность зуба не охватывается измерением. При недостатке данных рекомендуется дополнительно провести измерения по краям поверхности зуба. Однако это не охватывает всю его боковую поверхность.



*Рисунок 1 – Стандартная стратегия измерения боковой поверхности зуба по стандартам серии ISO*

Наиболее рационально проводить контроль боковой поверхности зубьев особенно на КИМ по измерению координат точек, расположенных в виде сетки. Для этого необходимо определить шаг сетки, в пределах которого не ожидается резкого изменения параметров. В этом случае число измерений может обладать достаточной достоверностью и принято за генеральную совокупность [3].

Согласно [4], современное состояние производственных процессов позволяет говорить о возможности обеспечения их высокой стабильности. Они дают соответствующие характерные отклонения формы и расположения поверхностей, что позволяет перейти к разработке на основе теории вероятности конкретных для контроля каждой поверхности метрологических моделей и оптимизации на их основе методов контроля.

Указанное выше обеспечивается единообразием качественных характеристик поверхностей деталей, получаемых при использовании однотипных технологических процессов (выполняемых на единообразном технологическом оборудовании с использованием однотипных приспособлений) понимается получение однородной совокупности получающихся профилей, отклонений формы, расположения и рельефов

микро – геометрии обрабатываемых поверхностей. Это позволяет на основе теории вероятности обосновать минимально необходимое число и расположение контрольных точек [5].

#### Основная часть

Для определения номинальной боковой поверхности зуба относительно локальной системы координат (рисунок 2) необходимо задаться следующей системой уравнений [6]:

$$\begin{cases} X_i = r_i \cos(\varphi_{0i} + \delta_i) \\ Y_i = r_i \sin(\varphi_{0i} + \delta_i) \\ Z_i = \text{var} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \frac{\alpha_i}{r} \quad (2)$$

$$\cos \alpha_i = \frac{r}{r_b} \quad (3)$$

$$r_b = m_n \cdot Z \cos \alpha_n \quad (4)$$

$$\varphi_{0i} = \varphi_{0z} \quad (5)$$

где  $\alpha_n = 20^\circ$ ;

$m_n$  – модуль зубьев;

$Z$  – число зубьев колеса;

$r_i$  – радиус – вектор  $i$  – ой точки профиля зуба;

$\varphi_{0z}$  – угол начала построения эвольвенты зуба  $z$

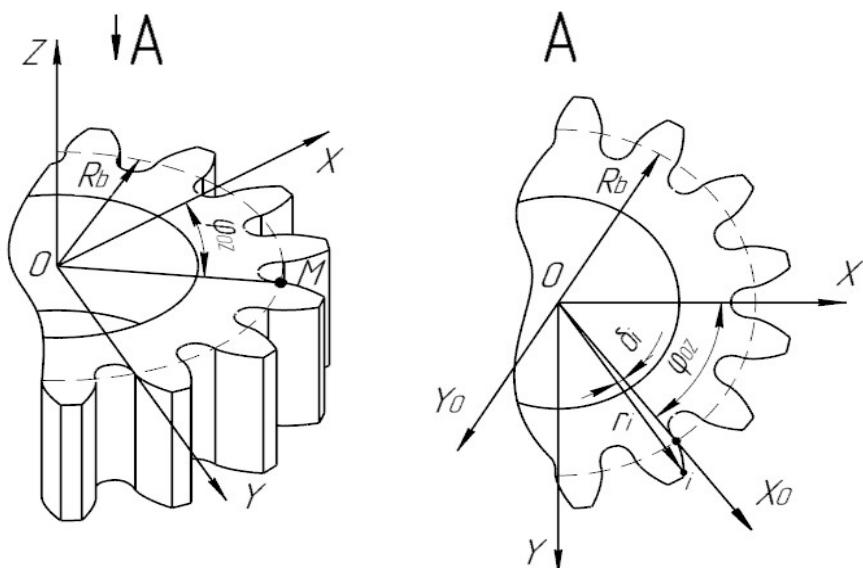


Рисунок 2 – Локальная система координат и основные показатели боковой поверхности зубьев

Как видно из (1), математически поперечная и продольная форма зубьев не связаны между собой. В техническом варианте на станке за формирование данных направлений отвечают разные механизмы, жесткость которых реализуется в различных направлениях, поэтому возникающие в процессе изготовления искажения по разным направлениям также мало зависимы. Это с достаточной вероятностью позволяет рассматривать эти искажения как независимые.

В [7] указывалось, что искажение контролируемой поверхности является результатом суммарного воздействия различных факторов, имеющих различную интенсивность и частоту проявления, что позволяет произвести его спектральное разложение. Анализ литературных данных показывает, что погрешности боковой поверхности зубьев, если не рассматривать погрешности изношенного оборудования и не учитывать случайные выбросы, условно можно представить в виде совокупности трех групп:

- низкочастотных;
- среднечастотных;
- высокочастотных.

При изготовлении зубчатых колес такими способами как зубодолбление, зубоффрезерование либо же зубошлифование, проявляются все виды погрешностей, различием является лишь уровень проявления каждой из составляющих.

Низкочастотными погрешностями (рисунок 3а) в поперечном сечении зуба следует считать погрешности, отклонения формы эвольвенты, связанного с: колебанием диаметра начальной окружности, неправильной настройки станка, погрешностью заточки (правки) и установки инструмента. В продольном направлении данной погрешностью будет являться погрешность направления зуба.

Среднечастотных погрешностей (рисунок 3б) наиболее часто встречаются такие разновидности, как: изменение формы эвольвенты по отношению к эталонной (выпуклые и вогнутые участки); изменение положения зуба относительно оси колеса; совокупное проявление изменения формы эвольвенты и положения зуба относительно оси зубчатого колеса, колебание направляющей зуба вдоль оси колеса. Причины возникновения среднечастотных погрешностей связаны с малой жесткостью, неправильной настройкой станка, его точностью, износом основных элементов и отклонением формы зуба инструмента от заданной.

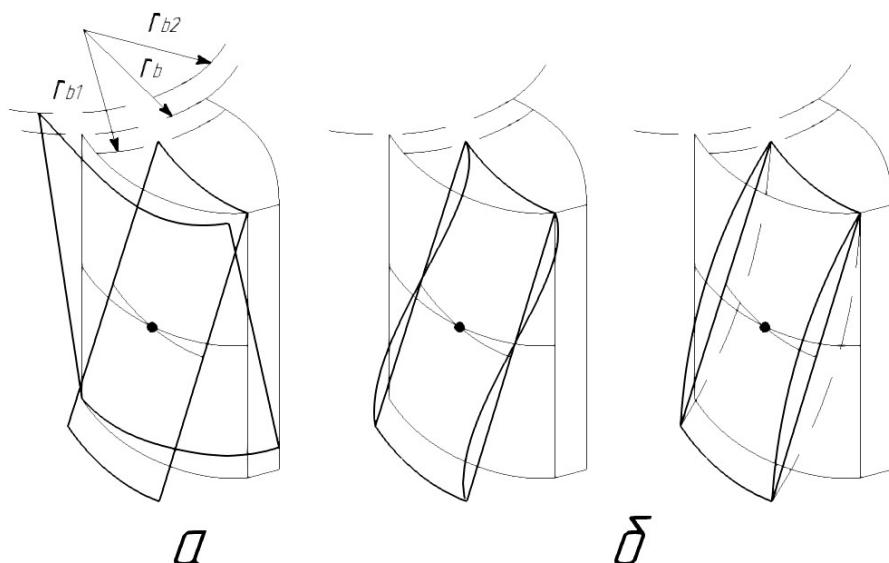


Рисунок 3 – Формы основных погрешностей зубообработки  
а – низкочастотные погрешности; б – среднечастотные погрешности

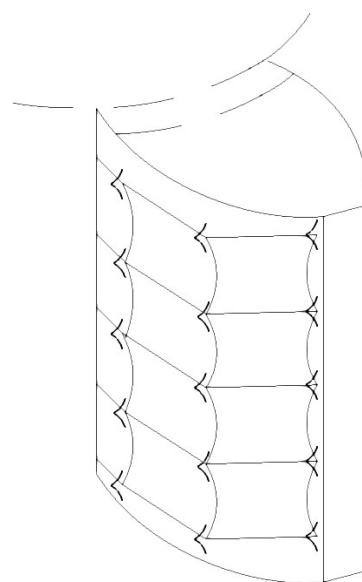


Рисунок 3в – Форма высокочастотной погрешности зубообработки

К высокочастотным погрешностям (рисунок 3в) относят погрешности, возникающие из – за так называемых следов остатков резов (огранка, «крябь») при обработке зубьев. В данном случае, качество изготовления боковых поверхностей зубчатых колес зависит от количества резов и величиной вертикальной подачи зуборезной фрезы вдоль оси колеса. Однако, такие погрешности встречаются далеко не всегда. Так, процедурой шлифования достигается минимизация влияния высокочастотных погрешностей, ввиду «доводки» поверхности зубчатого колеса до качества, соответствующей той или иной степени точности [8].

Низкочастотная погрешность характеризуется постоянным нарастанием или убыванием вдоль профиля зуба, причем характер реального профиля близок к эвольвенте с измененным радиусом основной окружности  $r_b$ . Поэтому для ее определения в одном сечении не требуется большого количества замеров.

Среднечастотные погрешности являются циклическими по отношению к профилю зуба и содержат не более 2 – х периодов, форму которых можно условно принять как синусоидальную кривую. Это также требует ограниченного числа замеров.

Высокочастотные погрешности, являющиеся результатом действия отдельных резов и уровня осевой подачи инструмента при обработке, являются регулярными с регламентированными шагами. Практически они образуют сетку с близкими по высоте выступами (рисунок 3в).

Для определения указанных выше погрешностей по всей поверхности зуба следует также задать координатную сетку замеров, которая позволит получить при минимальном их количестве достоверные сведения о качестве поверхности зубьев с заданным уровнем вероятности.

Низкочастотные погрешности можно представить как результат изменения параметров:  $\varphi_{0z}$ ,  $\alpha_n$  и установления взаимосвязи между параметром  $z$  и приращением угла  $\varphi_{0z}$

$$\varphi_{0i} = \varphi_{0z} + \varphi_{00} + z_j \cdot \operatorname{tg} \beta_z, \quad (6)$$

где  $\varphi_{00}$  – начальное угловое отклонение положения боковой поверхности зуба от номинального  $\varphi_{0z}$ ;

$\beta_z$  – угол наклона зуба

В системе (1), (6) неизвестными являются 3 параметра:  $\alpha_n$ ,  $\varphi_{00}$  и  $\beta_z$ , которые могут быть определены измерением координат 4 точек ( $X_i, Y_i, Z_i, i = 1 \dots 4$ ), близких по расположению к краям контролируемой поверхности, при этом каждые две точки, различные по высоте должны лежать на одном радиусе. Определение вышеуказанных параметров производится по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} \varphi_{0z} + \varphi_{00} + \delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_1} \\ \varphi_{0z} + \varphi_{00} + \delta_2 = \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_2} - \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_1} = \delta_2 - \delta_1 \quad (8)$$

$$\delta_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1; \quad \delta_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2 \quad (9)$$

$$r_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}; \quad r_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \quad (10)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{r_1}{r_b}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{r_2}{r_b} \quad (11)$$

Представленная система уравнений является трансцендентной и уравнение (7) может быть определено методом подбора, начиная с  $r_b$ , определенного по (1). Фактическое же значение  $\alpha_{n\phi}$  может быть определено:

$$\alpha_{n\phi} = \arccos \frac{r_b}{m_n Z} \quad (12)$$

После определения  $r_b$  и  $\delta_1$ , зная исходное значение  $\varphi_{0z}$ , из (7) можно определить  $\varphi_{00}$ .

Угол наклона зуба  $\beta_z$  определится по координатам двух точек ( $i = 1, 3$ ), лежащих на разных уровнях, но имеющих близкие радиусы

$$tg\beta_z = \frac{m_n Z}{2} \cdot \frac{(arctg \frac{Y_3}{X_3} - arctg \frac{Y_1}{X_1})}{Z_3 - Z_1} \quad (13)$$

Подставив найденные параметры в (1) можно построить аналитическую модель аппроксимирующей поверхности. Сравнив ее с номинальной, можно определить величину погрешностей, максимальное значение ввиду формы принятой модели контроля будет находиться на краях профиля зуба. Так как обычно отклонения определяются по нормали к номинальной поверхности, а номинальная боковая поверхность зуба принята параллельной оси, то отклонения профиля будут лежать в нормальных к оси колеса сечениях с координатами  $Z_{1K} = 0$  и  $Z_{1K} = h_3$ , где  $h_3$  – высота зуба колеса. Погрешность будет определяться перпендикулярно профилю эвольвенты зуба по направлению радиуса кривизны.

Проведя оценку среднечастотных отклонений относительно формы зуба с низкочастотными погрешностями можно сделать следующее заключение:

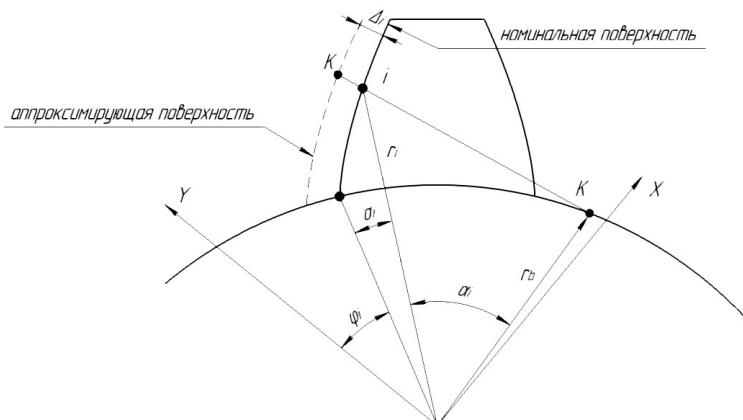
- в случае, когда низкочастотная поверхность перекрывается полупериодом среднечастотной, то форму данного полупериода можно принять в виде участка гладкой теоретической поверхности второго порядка [4];
- в случае, когда низкочастотная поверхность перекрывается периодом среднечастотной, то ее форму можно принять в виде двух участков гладких теоретических поверхностей второго порядка.

Поверхности второго порядка типа сфера, эллипсоид, гиперболоид и т.п. описываются уравнением:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \quad (14)$$

Для нахождения коэффициентов данного уравнения  $a_{ij}$  необходимо составить и решить линейную систему уравнений 10 – го порядка. В произвольной системе координат для этого необходимо знать координаты 10 точек  $(X_k, Y_k, Z_k)$  где  $k = 1 \dots 0$

Решение данной системы определит аппроксимационную поверхность, проходящую через 10 точек. Наибольшее расстояние от заданной поверхности до поверхности низкочастотного уровня определится в сечениях, нормальных к заданной поверхности. Однако суммарная погрешность от низкочастотных и среднечастотных погрешностей будет определяться относительно номинальной поверхности зуба в сечении, нормальном к данной поверхности, то есть при  $Z_0 = \text{const}$ , по вектору, перпендикулярному к эвольвенте (по радиусу кривизны  $(\rho_i)$  и проходящему через точки  $i$  и  $K$  (рисунок 4).



*Рисунок 4 – Направление контроля погрешностей*

$$\cos \alpha_i = \frac{r_i}{r_b} \quad (16)$$

$$\delta_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \alpha_i \quad (17)$$

$$\begin{cases} X_i = r_i \cos(\varphi_{0z} + \delta_i), \\ Y_i = r_i \sin(\varphi_{0z} + \delta_i); \end{cases} \quad \begin{cases} X_K = r_b \cos(\varphi_{0z} + \delta_i + \alpha_i) \\ Y_K = r_b \sin(\varphi_{0z} + \delta_i + \alpha_i) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} X_0 = \frac{Y_K - Y_i}{X_K - X_i} (Y_0 - Y_K) - X_K \\ Z_0 = \text{const} \end{cases} \quad (19)$$

Приравняв (7,8) и (19), решив методом подбора получаемое уравнение, определяют координаты точки эвольвенты ( $X_{01}$  и  $Y_{01}$ ), для которой находится погрешность реального профиля. Приравняв (14) и (19), определяют координаты точки аппроксимирующей поверхности ( $X_{0A}$  и  $Y_{0A}$ ), по которой определяется данная погрешность

$$\Delta_i = \sqrt{(X_{01} - X_{0A})^2 + (Y_{01} - Y_{0A})^2} \quad (20)$$

Для определения аппроксимирующей поверхности необходимо задать 10 контрольных точек, достаточно равномерно расположенных по контролируемой поверхности. Предлагается в качестве таких точек выбрать точки, расположенные близко к краю контролируемой поверхности, обеспечивающим точность измерения, а также в середине данной поверхности (рисунок 5а). В результаты контроля могут быть включены как показания по контрольным точкам, так и по точкам, определяемым по дополнительным требованиям.

В случае, когда реальная поверхность зуба представлена полным периодом среднечастотных погрешностей (рисунок 3б) рекомендуется представить ее в виде двух областей, охватывающих боковую поверхность зуба до середины высоты и провести указанные выше расчеты погрешностей раздельно для каждой половины зуба. В этом случае необходимо провести контроль 17 точек, предлагаемое расположение которых представлено на рисунке 5б.

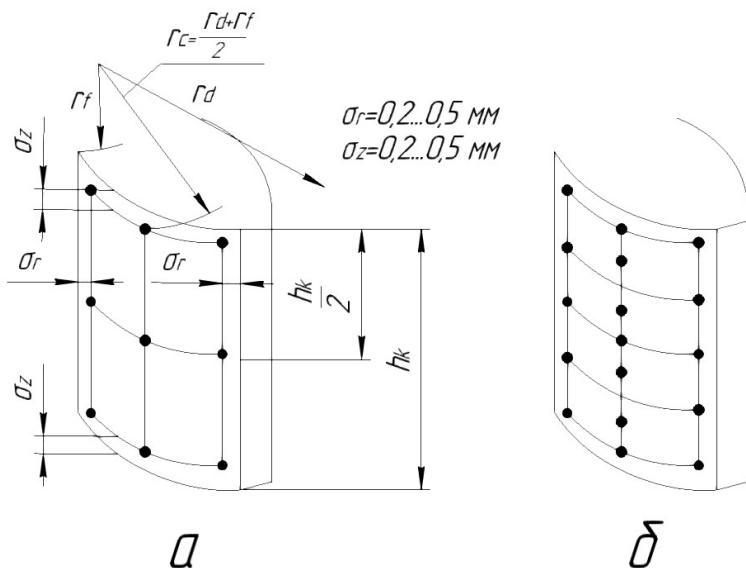


Рисунок 5 – Рекомендуемое расположение контрольных точек

а – полупериод среднечастотных погрешностей; б – полный период среднечастотных погрешностей

Высокочастотные погрешности при обработке зубьев зубчатых колес в общем случае в поперечном сечении являются следствием пересечения следов различных резов ( $S_{окр}$ ), а в продольном – величиной осевой подачи инструмента ( $S_0$ ) (рисунок 3в) и образуют сетку регулярных выступов на боковой поверхности зуба. Число резов ограничивается или величиной окружной подачи  $S_{окр}$  для процессов долбления и шлифования зубьев или числом зубьев  $Z_\phi$  и заходов  $I_\phi$  червячной фрезы при червячном фрезеровании. Следует отметить, что при чистовой обработке число резов  $n_p$  вдоль профиля зуба при червячном фрезеровании и

долблении примерно одинаковы, а при шлифовании их может быть даже больше. Поэтому за основу расчетов принято чистовое фрезерование зубчатых колес червячными фрезами.

Для чистового фрезерования зубчатых колес с модулем  $m_n = 1 \dots 6$  мм, согласно [9] используются однозаходные  $I_\Phi = 1$  червячные фрезы с наружным диаметром  $D_a = 50 \dots 110$  мм и числом зубьев  $Z_\Phi = 12 \dots 14$ . Количество резов, формирующих боковую поверхность зуба соответствует углу контакта (рисунок 6).

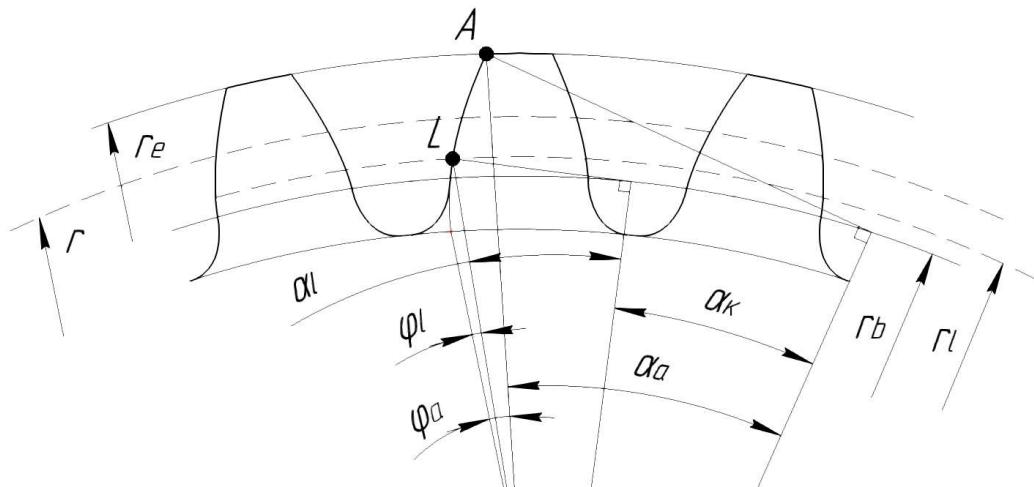


Рисунок 6 – Определение количества резов на боковой поверхности зуба

$$\alpha_k = (\alpha_a - \delta_a) - (\alpha_l + \delta_l) \quad (21)$$

где  $\alpha_a$  и  $\alpha_l$  – углы зацепления в точках начала  $l$  и конца  $a$  эвольвентного профиля зуба

$$\alpha_a = \arccos \frac{r_b}{r_a}; \quad \alpha_l = \arccos \frac{r_b}{r_l} \quad (22)$$

$r_a = r_e$  – радиус окружности выступов, равный  $r_e = r + h_a^* m_n$  для некорректированных колес,

$h_a^*$  – коэффициент головки зуба, в большинстве случае равный 1

$r$  – радиус делительной окружности колеса

$$r = 0,5 \cdot m_n Z_K \quad (23)$$

$Z_K$  – число зубьев колеса

$r_l$  – радиус окружности начала эвольвенты

$$r_l = r + h_f^* m_n - c m_n \quad (24)$$

где  $h_f^*$  – коэффициент ножки зуба, в большинстве случае равный 1

$c$  – коэффициент перекрытия участка зацепления (обычно  $0,05 \dots 0,15$ )

$$\delta_l = \operatorname{tg} \alpha_l - \alpha_l; \quad \delta_a = \operatorname{tg} \alpha_a - \alpha_a \quad (25)$$

Для оценки числа резов наиболее рационально рассматривать колеса (без коррекции) с наиболее используемыми минимальными и максимальными числами зубьев ( $Z_K = 20; 100$ ) и модулями ( $m_n = 2; 6$  мм). При  $r_l < r_b$  принимается  $r_l = r_b$ . Для однозаходных фрез в зависимости от  $Z_\Phi$  угловая подача на зуб составит  $\varphi_K = \frac{360^\circ}{Z_\Phi Z_K}$ , а число резов  $n_p = \frac{\alpha_k}{\varphi_K}$

Таблица 1 – Расчет числа резов

$m_n$	$Z_K$	$r$	$r_b$	$r_a$	$r_l$	$\alpha_a$	$\alpha_l$	$\delta_a$	$\delta_l$	$\alpha_k$
2	20	20	18,794	22	18,8	$31^\circ 19'$	$1^\circ 27'$	$3^\circ 33'$	$1''$	$33^\circ 25'$
	100	100	93,969	102	97,8	$22^\circ 53'$	$16^\circ 5'$	$1^\circ 18'$	$26'$	$7^\circ 40'$
6	20	60	56,382	66	56,4	$31^\circ 19'$	$1^\circ 27'$	$3^\circ 33'$	$1''$	$33^\circ 25'$
	100	300	281,908	306	293,4	$22^\circ 53'$	$16^\circ 5'$	$1^\circ 18'$	$26'$	$7^\circ 40'$

Как видно из таблиц, число резов при обработке практически мало зависит от модуля и числа зубьев колеса и составляет значительные величины. Шаг между резами по длине эвольвенты изменяется и в начальный момент составит  $l_{12}$  (рисунок 7) – расстояние между

первым и вторым резами, а в конце обработки  $l_{i,i+1}$  – расстояние между предпоследним и последним резами.

Таблица 2 – Определение величины шага между резами в начальный момент

$\alpha_K$	$Z_\Phi$	$\varphi_Z$	$\varphi_K$	$n_p$	$X_1$	$Y_1$	$\alpha_2$	$r_2$	$\delta_2$	$X_2$	$Y_2$	$l_{12}$
$33^{\circ}25'$	12	$30^\circ$	$1^{\circ}30'$	22,27	18,8	0,0001	$2^{\circ}57'$	18,82	$9''$	18,82	0,0008	0,02
	14	$25^{\circ}43'$	$1^{\circ}17'$	26,1	18,8	0,0001	$2^{\circ}44'$	18,82	$7''$	18,82	0,0006	0,02
$7^{\circ}40'$	12	$30^\circ$	$18'$	25,54	97,8	0,746	$16^{\circ}21'$	97,93	$27'31''$	97,92	0,784	0,126
	14	$25^{\circ}43'$	$15'25''$	29,81	97,8	0,746	$16^{\circ}16'$	97,89	$25'23''$	97,88	0,723	0,083
$33^{\circ}25'$	12	$30^\circ$	$1^{\circ}30'$	22,27	56,4	0,0003	$2^{\circ}57'$	56,46	$9''$	56,46	0,0024	0,06
	14	$25^{\circ}43'$	$1^{\circ}17'$	26,1	56,4	0,0003	$2^{\circ}44'$	56,44	$7''$	56,44	0,0019	0,04
$7^{\circ}40'$	12	$30^\circ$	$18'$	25,54	293,39	2,219	$16^{\circ}21'$	293,79	$27'31''$	293,78	2,351	0,411
	14	$25^{\circ}43'$	$15'25''$	29,81	293,39	2,219	$16^{\circ}16'$	293,66	$25'23''$	293,65	2,168	0,265

Таблица 3 – Определение величины шага между резами в конце обработки

$\alpha_K$	$Z_\Phi$	$\varphi_K$	$X_n$	$Y_n$	$\alpha_{n-1}$	$r_{n-1}$	$\delta_{n-1}$	$X_{n-1}$	$X_{n-1}$	$l_{n,n-1}$
$33^{\circ}25'$	12	$1^{\circ}30'$	21,958	1,362	$30^{\circ}13'$	21,75	$3^{\circ}9'$	21,72	1,195	0,29
	14	$1^{\circ}17'$	21,958	1,362	$30^{\circ}23'$	21,78	$3^{\circ}13'$	21,75	1,222	0,251
$7^{\circ}40'$	12	$18'$	101,974	2,314	$22^{\circ}38'$	101,81	$1^{\circ}15'$	101,78	2,221	0,215
	14	$15'25''$	101,974	2,314	$22^{\circ}40'$	101,83	$1^{\circ}16'$	101,8	2,251	0,185
$33^{\circ}25'$	12	$1^{\circ}30'$	65,873	4,086	$30^{\circ}13'$	65,25	$3^{\circ}9'$	65,15	3,585	0,88
	14	$1^{\circ}17'$	65,873	4,086	$30^{\circ}22'$	65,35	$3^{\circ}13'$	65,25	3,667	0,75
$7^{\circ}40'$	12	$18'$	305,921	6,942	$22^{\circ}38'$	305,43	$1^{\circ}15'$	305,36	6,663	0,626
	14	$15'25''$	305,921	6,942	$22^{\circ}40'$	305,50	$1^{\circ}16'$	305,42	6,753	0,535

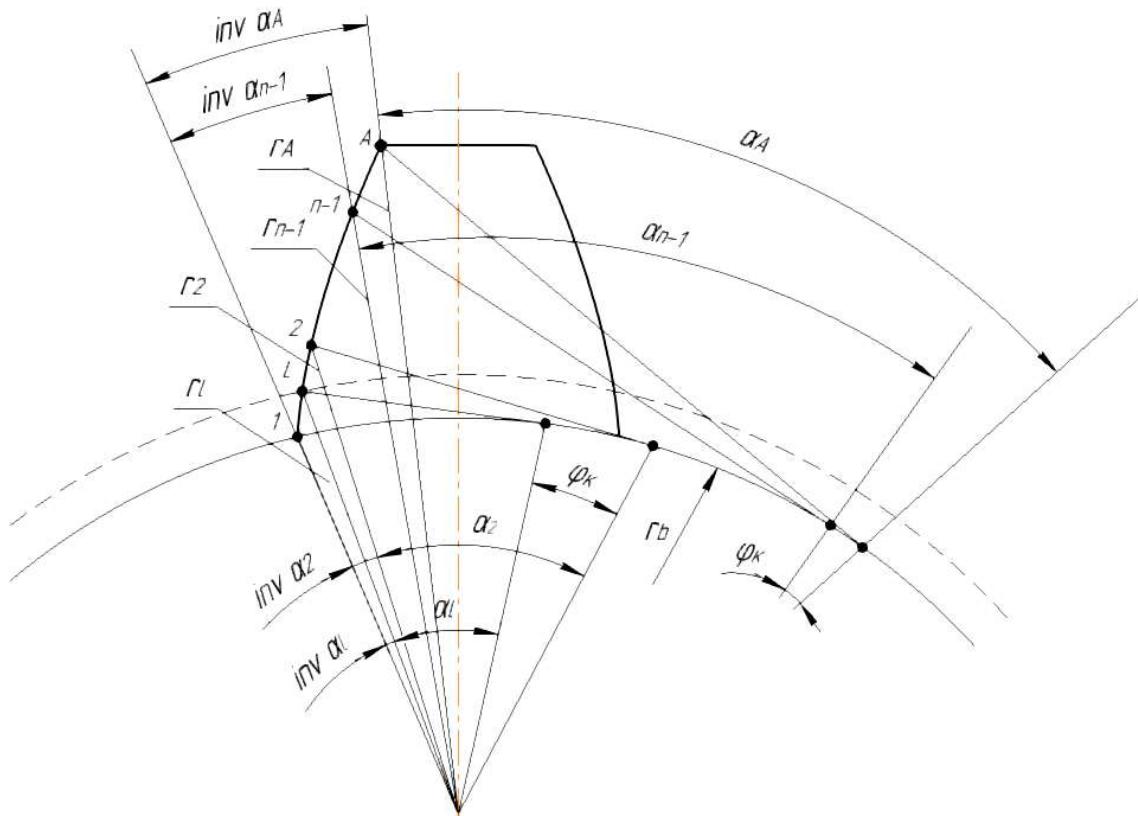


Рисунок 7 – Определение величины шага между резами

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \delta_l + \alpha_l + \varphi_K; \delta_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2 \quad (26)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{n-1} = \delta_l + \alpha_l - \varphi_K; \delta_{n-1} = \operatorname{tg} \alpha_{n-1} - \alpha_{n-1} \quad (27)$$

$$r_i = \frac{r_b}{\cos \alpha_i} \quad (28)$$

$$\begin{cases} X_1 = r_l \cos \delta_l; \\ Y_1 = r_l \sin \delta_l; \end{cases} \quad \begin{cases} X_2 = r_2 \cos \delta_2 \\ Y_2 = r_2 \sin \delta_2 \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} X_n = r_a \cos \delta_a; \\ Y_n = r_a \sin \delta_a; \end{cases} \quad \begin{cases} X_{n-1} = r_{n-1} \cos \delta_{n-1} \\ Y_{n-1} = r_{n-1} \sin \delta_{n-1} \end{cases} \quad (30)$$

$$l_{n,n-1} = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2} \quad (31)$$

Как видно из таблиц 2 и 3, шаг резов увеличивается от  $r_b$  к  $r_e$ . С достаточной степенью точности величину каждого шага можно представить зависимостью:

$$l_{i,i+1} = \frac{l_{n,n-1} - l_{12}}{n_p} (i - 1) + l_{12} \quad (32)$$

положение точек касания резов вдоль боковой поверхности зуба, начиная от основной окружности:

$$L_i = \sum_{i=1}^i l_{i,i+1} + f_0 = \frac{l_{n,n-1} - l_{12}}{2n_p} (i - 1)^2 + l_{12}(i - 1) + f_0 \quad (33)$$

где  $f_0$  – положение первого реза относительно окружности начала эвольвентного профиля зуба (точно неизвестно, но лежит в пределах 0... $l_{12}$ ).

Выступы профиля (точки пересечения резов) находятся близко к середине шагов резов:

$$L_{\text{выст}i} = \frac{l_{n,n-1} - l_{12}}{2n_p} (i - 1)^2 + l_{12}(i - 1) + f_0 + 0,5l_{i,i+1} \quad (34)$$

В осевом направлении выступы профиля располагаются со смещением на окружную подачу  $S_{\text{окр}} = 0.8 \dots 2$  мм/оборот [10] для чистового фрезерования в зависимости от степени точности зубьев (обычно 0.8, 1, 1.2 мм/об). Расположение выступов вдоль оси колеса можно описать зависимостью:

$$H_j = S_{\text{окр}}(j - 1) + h_0 \quad (35)$$

где  $j$  – номер прохода при фрезеровании

$h_0$  – положение первого прохода относительно торцовой поверхности колеса (точно неизвестно, но лежит в пределах 0... $S_{\text{окр}}$ ).

### Заключение

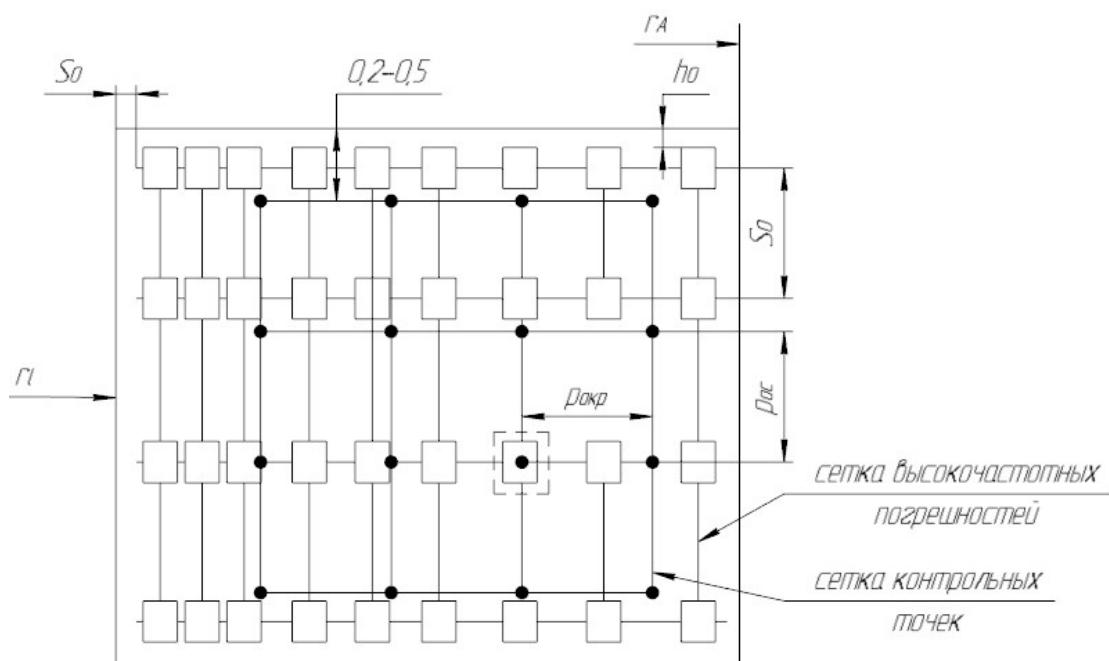


Рисунок 8 – Формы сеток погрешностей и контрольных точек

Таким образом, на боковой поверхности зубьев формируется сетка «высокочастотных», регулярных погрешностей в виде выступов (рисунок 8), часть которых должна быть определена при координатном измерении. Учитывая малые углы давления профиля в верхней точке выступа контроль на площадке радиуса 0,1 мм в самом худшем случае может дать погрешность измерения 0,0013 мм. Поэтому результаты контроля в пределах данного участка можно считать достоверными.

При координатном контроле точки контроля на боковой поверхности зуба также располагаются по координатной сетке и также в регулярной форме (с постоянными шагами). В этом случае шаги контрольной сетки не должны быть кратны шагам выступов. Так, например, при расположении выступов при  $S_{окр} = 1\text{мм/об}$  и высоте зуба  $h_K = 20\text{ мм}$  при 8 рядах и осевом шаге контрольной сетки  $p_{oc} = 2,3\text{ мм}$ , контрольные точки попадут на выступы профиля не менее 2 – x раз. При переменном шаге выступов в радиальном направлении для колеса  $m_n = 2\text{ мм}$  и  $Z_K = 20$  достаточно 5 рядов сетки с шагом  $p_{окр} = 0,9\text{ мм}$ . При этом контролироваться будет только незначительная часть выступов. Однако, учитывая регулярность и идентичность их повторения результаты контроля в некоторых точках дадут повышенное значение отклонения профиля  $f_j$ .

Учитывая, что суммарное количество контрольных точек составит 40, этого будет вполне достаточно для определения всех видов погрешностей только по результатам контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ ISO 1328–1–2017. Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса. Межгосударственный стандарт: дата введения 30.11.2017, 42 стр.
2. ISO/TR 10064 – 1:2019 Code of inspection practice. Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks.
3. Ушаков М.В Алгоритмизация процесса обработки измерительной информации при контроле зубчатых колес на координатно – измерительных машинах / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. // Альманах современной метрологии. 2022. № 3 (31). С. 154 – 159.
4. В.Л. Соломако, Б.В. Цитович, С.С. Соколовский, Д.В. Соломако. / Теория, расчет и проектирование оптимизированных методик координатного контроля в машиностроении. // Минск, 2012г., 239 стр.
5. Привалов, И.И. Аналитическая геометрия: учебник для вузов / И.И. Привалов. 35 – е изд., стер. СПб.и др.: Лань, 2005. 304с.
6. Ушаков М.В Рекомендации по разработке методики контроля зубчатых колес на КИМ / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М // Контроль. Диагностика. 2022, Т. 25, № 9 (291). С. 46 – 51.
7. Б.А. Тайц. / Производство зубчатых колес. // 1990 г., 463 стр.
8. Детали машин: Учебник для вузов / Л. А. Андриенко [и др.]; под ред. О.А. Ряховского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 544с.
9. ГОСТ 9324–2015. Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Межгосударственный стандарт: дата введения 01.01.2017, 44 стр.
10. А.Г. Косилова, Р.П. Мещеряков. / Справочник технолога машиностроителя. Том 1 // 1986 г., 656 стр.

**Ушаков Михаил Витальевич**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
г.  
Тула  
Доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
«Инструментальные и  
метрологические системы»  
300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92  
+7 (4872) 25–46–38  
tulaumv@yandex.ru

**Воробьев Илья Александрович**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет», г.  
Тула  
Кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры  
«Инструментальные и  
метрологические системы»  
300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92  
+7 (4872) 25–46–38  
imsilya@mail.ru

**Никольский Сергей Михайлович**  
АО «АК «Туламашзавод», г. Тула  
Начальник лаборатории КИМ  
300002, Россия, г. Тула, ул.  
Мосина, д. 2  
+7 (4872) 25–46–38  
nikolsky.serge@yandex.ru

USHAKOV M.V., VOROBIEV I.A., NIKOLSKY S.M.

## POSSIBILITIES OF USING THE METHOD OF COORDINATE CONTROL FOR ESTIMATION OF QUALITY OF MANUFACTURING OF GEAR WHEELS

**Abstract.** In the present article the possibility of using the method of coordinate control for estimation of quality of manufacturing of gear wheels is considered. Justification of the choice of the minimum necessary number and location of control points on the lateral surface of gear wheels is given. The main types of errors of side surfaces of gear wheels are considered, their possible sources of occurrence are given. Formulas and systems of equations describing analytical models of approximating tooth surfaces are presented. On the basis of gears with different values of modulus and number of teeth, calculations for determining the number of cuts during gear machining and the value of their steps are given. The dependence describing the size of the step between cuts on different parts of the involute of the gear is given. Recommendations on the location and number of control points depending on the type of wheel tooth error are given.

**Keywords:** Coordinate measurements, inspection points, error grid, gear wheel, gear machining, CMM.

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST ISO 1328 – 1 – 2017. Spur gears. ISO system. Classification of tolerances of tooth flanks. Part 1. Definitions and tolerance values of deviations on tooth side surfaces of gear teeth. Interstate standard: date of introduction 30.11.2017, 42 p.
2. ISO/TR 10064 – 1:2019 Code of inspection practice. Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks.
3. Ushakov, M.V.; Vorobyev, I.A.; Nikolskiy, S.M. Algorithmisation of the process of measuring information processing at the control of gear wheels on the coordinate measuring machines / Ushakov, M.V.; Vorobyev, I.A.; Nikolskiy, S.M. // Almanac of modern metrology. 2022. № 3 (31). C. 154 – 159.
4. V.L. Solomako, B.V. Tsitovich, S.S. Sokolovskiy, D.V. Solomako. / Theory, calculation and design of optimised coordinate control techniques in mechanical engineering. // Minsk, 2012, 239 pp.
5. Privalov, I.I. Analytical geometry: textbook for universities / I.I. Privalov. 35th ed., er. SPb. et al: Lan, 2005. 304c.
6. Ushakov, M.V. Recommendations for the development of the technique of the gear wheels control on the CMM (in Russian) / Ushakov, M.V.; Vorobyev, I.A.; Nikolskiy, S.M. // Control. Diagnostics. 2022, T. 25, № 9 (291). C. 46 – 51.
7. B.A. Taitz. / Production of gear wheels. // 1990, 463 pp.
8. Machine parts: Textbook for universities / L.A. Andrienko [et al]; ed. by O.A. Ryakhovsky. Ryakhovsky. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002. 544c.
9. GOST 9324 – 2015. Worm cutters one – piece finishing for spur gears with involute profile. Interstate standard: date of introduction 01.01.2017, 44 pp.
10. A.G. Kosilova, R.P. Meshcheryakov. / Handbook of machine – builder technologist. Volume 1 // 1986, 656 pp.

**Ushakov Mikhail Vitalievich**  
Tula State University, Tula  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Professor of the  
Department of Instrumental and  
Metrological systems  
92 Lenin Ave., Tula, 300012,  
+7 (4872) 25 – 46 – 38  
tulaumv@yandex.ru

**Vorobyov Ilya Aleksandrovich**  
Tula State University, Tula  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Associate  
professor of the Department of  
Instrumental and  
Metrological systems  
92 Lenin Ave., Tula, 300012.  
+7 (4872) 25-46-38  
imsilya@mail.ru

**Nikolsky Sergey Mikhailovich**  
Tulamashzavod JSC, Tula, Russia  
Head of CMM laboratory  
300002, Russia, Tula, Mosin str.  
Mosina, 2  
+7 (4872) 25-46-38  
nikolsky.serge@yandex.ru

*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орёл, 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, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

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 12.04.2025 г.  
Дата выхода в свет 24.04.2025 г.  
Формат 70Х108/16. Усл. печ. л. 13  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ №101

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95