

**Редакционный совет:**

**Голенков В.А.** д-р техн. наук,  
проф., председатель  
**Радченко С.Ю.** д-р техн. наук,  
проф., зам. председателя  
**Борзенков М.И.** канд. техн. наук, доц.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук, проф.

**Главный редактор серии:**

**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук,  
проф., заслуж. деятель науки  
Российской Федерации

**Заместители**

**главного редактора серии:**  
**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

**Редколлегия:**

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф.,  
член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчанинов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук,  
проф., академик РАН  
**Корндорф С.Ф.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф.,  
академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

**Ответственный за выпуск:**

**Григорьева О.Ю.**

**Адрес редколлегии серии:**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21  
www.ostu.ru  
E-mail: nmu@ostu.ru

Зарег. в Министерстве Российской  
Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств  
массовой информации.  
Свидетельство: ПИ № 77-15469  
от 20 мая 2003 года

**Подписной индекс 29504**

по объединенному каталогу «Пресса  
России»

© ОрелГТУ, 2009

### Содержание

#### Механика

|   |   |
|---|---|
| <i>Коробко В.И., Алдушкин Р.В., Бояркина О.В.</i> Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и динамические воздействия..... | 3 |
| <i>Майоров С.В.</i> Причины возникновения параметрических и самовозбуждающихся колебаний в роторных системах с радиальными подшипниками жидкостного трения.....       | 8 |

#### Физика

|  |    |
|--|----|
| <i>Гасанова С.А.</i> Взаимодействие нанометровой плоской волны с границей раздела упругих сред...                    | 13 |
| <i>Фроленкова Л. Ю.</i> Методика расчета адгезионной прочности соединения твердых тел в рамках теории упругости..... | 20 |
| <i>Екимова Л.С.</i> Исследование влияния деформации тел на процесс их движения по наклонным плоскостям.....          | 26 |

#### Технологии, оборудование и инструмент упрочняющей и отделочной обработки, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин

|   |    |
|---|----|
| <i>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Поляков А.В.</i> Статико-импульсная обработка полых цилиндров...  | 31 |
| <i>Печагин А.В., Смоленцев В.П., Найденов А.И.</i> Повышение точности сборных корпусных деталей магнитноимпульсной обработкой.....  | 34 |
| <i>Сторублев М.Л., Иващенко А.Г.</i> Управление качеством процесса нанесения гальванических покрытий.   | 41 |
| <i>Зайцев С.А.</i> Теоретическое обоснование повышения износостойкости покрытия упрочненных лап культиватора газопламенным напылением механической смесью порошков.....         | 46 |
| <i>Коломейченко А.В., Титов Н.В.</i> Комбинированная технология МДО и нанесения медного слоя для повышения износостойкости внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин | 49 |

#### Технологии и моделирование технологических процессов

|   |    |
|---|----|
| <i>Степанов Ю.С., Гаврилин А.М., Катунин А.В., Катунин А.А.</i> Исследование кинематических параметров процесса обкатки неполной сферической головки шарового пальца..... | 52 |
| <i>Хромов В.Н., Родичев А.Ю.</i> Теоретическое обоснование толщины покрытия биметаллического подшипника скольжения.....   | 57 |
| <i>Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Татарченков Н.В.</i> Деформации трубы при гибке моментом.....  | 62 |
| <i>Ванин В.С., Данилов В.А.</i> Влияние различий ординат профиля дороги под правыми и левыми колесами машины на вибрации рабочего места оператора.....                    | 66 |

#### Приборостроение и системы управления

|   |    |
|---|----|
| <i>Багрищев Д.Ю., Иванов Б.Р.</i> Коррелометр для бесконтактного контроля длины витых проводов  | 69 |
| <i>Милюшин Н.Н.</i> Анализ взаимодействия индуктивного датчика приближения токопроводящей среды и коммутируемого плоского контура.....          | 75 |
| <i>Петрова О.С.</i> Исследования динамических характеристик датчика температуры устройства и регулирования температуры воздуха в помещении..... | 81 |
| <i>Изотов А.В., Половинкин А.В.</i> Акустический прибор для точного определения места утечек вода из подземных трубопроводов.....               | 87 |
| <i>Лисичкин В. Г., Шведов С. Н.</i> Высокочувствительные двухконтурные устройства контроля влажности почвы.....                                 | 91 |

#### Испытания, контроль, диагностика, мониторинг

|   |     |
|---|-----|
| <i>Сычев С.Н., Пахолкин Е.В., Подмастерьев К.В., Кузьмичев Д.А.</i> Исследование возможности и эффективности оценки адгезионных свойств масел электрическим методом.....              | 98  |
| <i>Марков В.В., Семенов В.В.</i> Применение уточненной математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта при синтезе комплексного диагностического параметра.. | 102 |
| <i>Мишин В.В.</i> Динамические диагностические параметры на основе временной функции вероятности микроконтактирования в подшипнике.....   | 108 |



Scientific journal  
of Orel State Technical  
University

The journal is published 6 times a year

№ 2-274(560) 2009

March-april

# IZVESTIA

## OREL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

### Series

### «Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology»

The journal is published since 1995. The founder – Orel State Technical University

#### Editorial council:

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president

**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president

**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Popova L.V.** Doc. Sc. Ec., Prof.

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

#### Editor-in-chief

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
honored worker of science of Russian  
Federation

#### Editor-in-chief Assistants:

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

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

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

#### Editorial Committee

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Dmitriev A.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Corresponding Member of RAS

**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Zubarev Y.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.

**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof., Academician of RAS

**Korndorf S.F.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.

**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Academician of RAS

**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Smolenzev V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

#### Responsible for edition:

**Grigorieva O.Yu.**

#### Address

302020 Orel,  
Naugorskoye Chaussee, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21

[www.ostu.ru](http://www.ostu.ru)

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

Journal is registered in State  
Committee of Russian Federation  
on printing. The certificate of  
registration ПИ № 77-15469  
from 20.05.03

Index on the catalogue of the «**Pressa  
Rossii**» 29504

© OSTU, 2009

## Contents

### Mechanics

- Korobko V.I., Aldushkin R.V., Boyarkina O.V.* Experimental researches of steel girder on static and dynamic of influences..... 3
- Majorov S.V.* The reasons of parametric and self-excited vibrations in rotor systems supported by fluid-film bearings..... 8

### Physics

- Gasanova S.A.* Interaction of nanometers plane wave with border of section of elastic mediums..... 12
- Frolenkova L. Yu.* The calculation procedure of adhesion strength of connection of solid within the bounds of theory of elasticity..... 20
- Ekimova L.S.* Research of influence of deformation of solids on process of their movement downhill..... 26

### Technologies, equipment and instrument for strengthening and finishing treatment, engineering support of performance abilities of machine parts

- Kirichek A.V., Soloviev D.L., Polyakov A.V.* Static-impulse processing of hollow cylinders..... 31
- Pechagin A.P., Smolentsev V.P., Naydenov A.I.* Increase of accuracy of body assemblies by magnetic-impulse treatment..... 34
- Storublev M.L., Ivahnenko A.G.* Quality management of process of drawing of galvanic coverings..... 41
- Zaytzev S.A.* Theoretical ground of wear resistance of coatings of hardened cultivator slice shares by flame spraying of mechanical powder mixture..... 46
- Kolomejchenko A.V., Titov N.V.* Combined technology MDO drawings of a copper layer for increase of wear resistance of internal cylindrical surfaces of details of machines..... 49

### Technologies and modeling engineering processes

- Stepanov Yu. S., Gavrilin A.M., Katunin A.V., Katunin A.A.* Research of kinematical parameters of the rotation rolling of the incomplete spherical surfaces of the globular fingers..... 52
- Khromov V.N., Rodichev A.Yu.* Theoretical basis for coating thickness in bimetallic bearings..... 57
- Vdovin S.I., Mikhailov V.N., Tatarchenkov N.V.* The offered deformation computation is based on Ritz's variational method. It takes into account a pipe material anisotropy and also the nonlinear mode of a stressed state at small radii of bending..... 62
- Vanin V.S., Danilov V.A.* Influence of distinctions of ordinates of the structure of road under the right and left wheels of the machine on vibration of the workplace of the operator..... 66

### Instrument Engineering

- Bagrintsev D. Yu., Ivanov B. R.* Corellometer for contactless control of twisted wire length..... 69
- Milushin N. N.* Analysis of interaction of inductive proximity sensor of conducting medium and the swithing flat loop..... 75
- Petrova O.S.* Researches of dynamic characteristics of the gauge of temperature of the device of the control and regulation of temperature of air in the room..... 81
- Izotov A.V., Polovinkin A.V.* Acoustic devise for locating leaks from the underground pipelines..... 87
- Lisichkin V.G., Shvedov S.N.* Doudle – circuit monitoring device of soil water content..... 91

### Tests, control, diagnostics, monitoring

- Sychev S.N., Pakholkin E.V., Podmasteryev K.V., Kuzmichev D.A.* Research of possibility and efficiency of the estimation of adhesive properties of oils the electric method..... 98
- Markov V.V., Semyonov V.V.* The application of specified simulator of frictional contact electric resistance at synthesis of combined diagnostic parameters..... 102
- Mishin V.V.* Dynamic diagnostic parameters based on temporal probability function of microcontacting in a bearing..... 108

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees

УДК 624.14+539.37

В.И. КОРОБКО, Р.В. АЛДУШКИН, О.В. БОЯРКИНА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОЯСАМИ НА СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

*В статье приводятся результаты экспериментальных исследований стальных ферм с параллельными поясами, нагруженных по верхнему поясу равномерно распределённой нагрузкой, а также регулярной нагрузкой в виде сосредоточенных сил в узлах. Показано, что такие фермы можно рассматривать как балки постоянной жёсткости, и для них справедлива фундаментальная закономерность о взаимосвязи их максимального прогиба с основной частотой собственных колебаний.*

**Ключевые слова:** стальные фермы, балки постоянной жёсткости, максимальный прогиб, основная частота колебаний.

*The article describes results of experimental testing of steel girders with collateral chords and regular distributed and nodal load. It adduced, that these girders can be account constant stiffness beams and fundamental consistent pattern about link of maximal arch and base frequency of natural vibration is right for them.*

**Key words:** steel girders, beams of constant stiffness, maximal arch, base frequency of vibration.

При решении практических задач теории сооружений, связанных с расчетом различных строительных конструкций, как правило, их статические и динамические характеристики (прогибы и частоты колебаний) определяются независимо друг от друга путем решения соответствующих дифференциальных уравнений. В работах В.И. Коробко [1, 2] была установлена закономерность о функциональной взаимосвязи максимального прогиба  $W_0$  упругих балок постоянного сечения, находящихся под действием равномерно распределенной нагрузки  $q$ , с их основной (или первой резонансной) частотой колебаний  $\omega$ . Эта закономерность формулируется следующим образом: *для упругих изотропных балок независимо от граничными условий произведение максимального прогиба от действия равномерно распределенной нагрузки на квадрат их основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии с точностью до размерного множителя  $q/t$  есть величина постоянная:*

$$W_0 \omega^2 \approx \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q}{t}, \quad (1)$$

где  $t$  – погонная масса балки. Для шарнирно опертых балок коэффициент пропорциональности равен 1,268. Важной особенностью этой закономерности является тот факт, что рассматриваемое в ней произведение  $W_0 \omega^2$  не зависит от изгибной жёсткости и размеров балок, форм их поперечных сечений и вида материала.

Закономерность (1) носит фундаментальный характер и открывает широкие возможности в области развития вибрационных методов диагностики и контроля качества строительных конструкций, а также в области развития методов физико-механического моделирования строительных конструкций.

Металлические фермы с параллельными поясами можно отнести к конструкциям балочного типа. Теория расчета упругих ферм в строительной механике хорошо разработана. Используя эту теорию, можно достаточно просто с помощью численного эксперимента подтвердить или опровергнуть справедливость закономерности (1) для таких ферм.

### Численный эксперимент

Рассмотрим однопролётные шарнирно опертые по концам фермы с параллельными поясами и регулярной решёткой двух типов (рисунок 1). Длина ферм  $L = 12,0$  м, высота  $1,5$  м, длина панели  $B = 0,75$  м, элементы верхнего и нижнего поясов выполнены из труб  $180 \times 6$  мм, элементы решётки – из труб  $140 \times 6$  мм. Ферма нагружены по верхнему поясу равномерно распределенной нагрузкой  $q = 3$  кН/м. Требуется определить максимальные прогибы ферм заданных ферм  $W_0$  и их основные частоты поперечных колебаний  $\omega$  в ненагруженном состоянии.

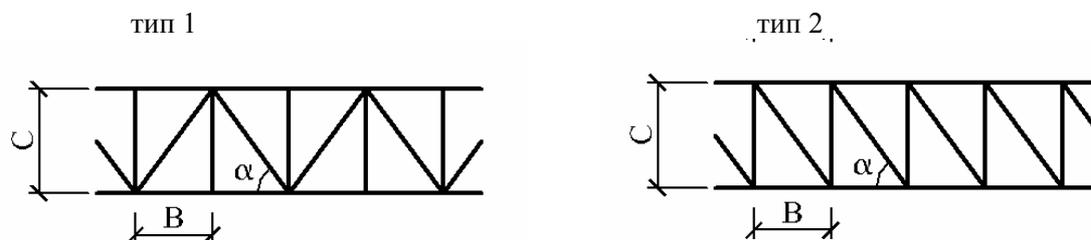


Рисунок 1– Типы исследуемых решеток ферм

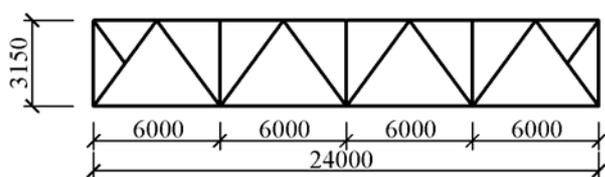


Рисунок 2 – Схема типовой фермы ФС-24-20

Решение этой задачи выполним с использованием программного комплекса «SCAD». Результаты расчёта и их сопоставление приведены в таблице 1. Из этой таблицы видно, что для рассмотренных ферм значение коэффициента пропорциональности в

произведении  $W_0 \omega^2$  близко к константе  $C = 1,268$ . Незначительные отклонения от этого значения  $C$  можно объяснить приближенностью представленных результатов, связанной с введенными в сопротивлении материалов и строительной механике ряда упрощающих гипотез. Таким образом, с помощью численного эксперимента показано, что для шарнирно опертых однопролетных ферм с параллельными поясами закономерность (1) также соблюдается.

Таблица 1 – Сопоставление произведения  $W_0 \cdot \omega^2$  для однопролетных ферм

| Тип решетки фермы                       | Основная частота $\omega$ (с <sup>-1</sup> ) | Максимальный прогиб $W_0$ (м) | Произведение $W_0 \omega^2 = \alpha \beta^4 \times q/m$ | Отклонение от $C = 1,268$ (%) |
|---|--|-------------------------------|---|-------------------------------|
| 1                                       | 165,319                                      | $1,067 \times 10^{-3}$        | 1,261   | -0,6                          |
| 2                                       | 159,596                                      | $1,142 \times 10^{-3}$        | 1,258   | -0,8                          |
| Значение $C$ для шарнирно опертых балок |  |                               | 1,268   |                               |

Выполним упругий расчёт типовой фермы ФС 24-20 (серии 1.460.2-10/88), широко используемой в строительстве. Расчетная схема этой фермы представлена на рисунке 2. Ферма нагружена предельно допустимой равномерно распределенной по верхнему поясу нагрузкой  $q = 20$  кН/м ( $m = 1980/24 = 82,5$  кг/м). В результате расчета найдено:

$$W_0 = 37,7 \text{ мм}, \quad \omega = 93,137 \text{ с}^{-1}, \quad C = \frac{W_0 \omega^2 \cdot m}{q} = 1,349.$$

Значение  $C = 1,349$  отличается от соответствующего значения для шарнирно опертых балок на 6,39 %, что можно объяснить неравномерностью распределения массы решетки фермы.

### Статические и динамические испытания большегабаритных моделей стальных ферм с различными типами решёток

Статические и динамические испытания моделей ферм проводились на специально

изготовленном стенде. Комплект и компоновка используемых устройств, приборов и средств измерений показаны на рисунках 3 и 4.

Испытываемая модель фермы 2 прикреплялась через опорную пластину  $t = 20$  мм с помощью болтов М8 к массивным опорам 1, расположенным на расстоянии, равном расчётному пролёту, и выполненным из швеллера №14. Опоры дополнительно пригружались силикатным кирпичом. Загружение испытываемой конструкции производилось стальными тарированными грузами массой по 4 кг в трех или семи точках (в зависимости от вида решётки), что с достаточной степенью точности имитировало эквивалентную равномерно распределенную нагрузку. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки составляла 267 Н/м, 320 Н/м и 533 Н/м, при этом все модели работали в упругой стадии. При статических испытаниях измерялись максимальные прогибы балок в середине пролета при помощи индикатора часового типа И-001. Цена деления прибора составляет 0,01 мм. Испытания каждой модели фермы на статические нагрузки проводилось не менее 10 раз. Обработка результатов эксперимента осуществлялась с использованием аппарата математической статистики. Результаты статических испытаний моделей ферм приведены в таблице 2.

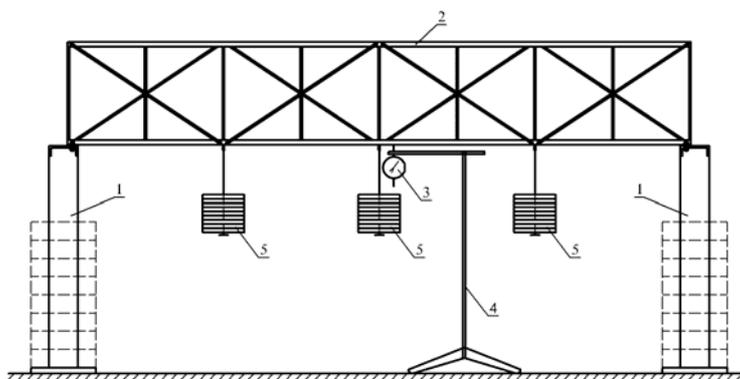


Рисунок 3 – Принципиальная схема стенда для статических испытаний ферм:  
1 – опоры; 2 – испытываемая модель фермы; 3 – прогибомер; 4 – штатив; 5 – грузы

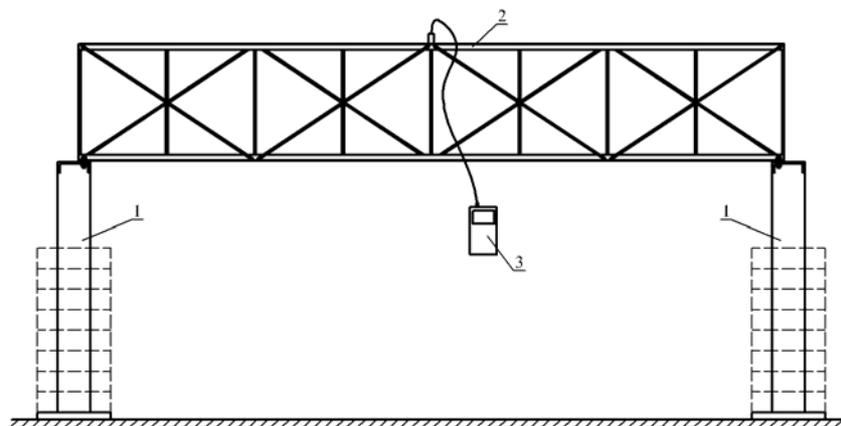


Рисунок 4 – Принципиальная схема стенда для динамических испытаний ферм:  
1 – опоры; 2 – испытываемая модель фермы; 3 – виброанализатор

Динамические испытания моделей осуществлялись на том же стенде. На ферму устанавливался вибродатчик, который воспринимал механические колебания, преобразовывая их в электрический сигнал, и передавал его на электронный блок виброанализатора «Вибран-2.0».

Для обработки результатов записи колебательных процессов виброанализатор был связан с компьютером. Для каждой модели фермы частота основного тона собственных поперечных колебаний измерялась не менее 10 раз.

Для экспериментальных исследований были изготовлены четыре модели стальных

ферм пролетом 3 м и высотой 0,5 м, отличающихся конфигурацией решёток (рисунок 5).

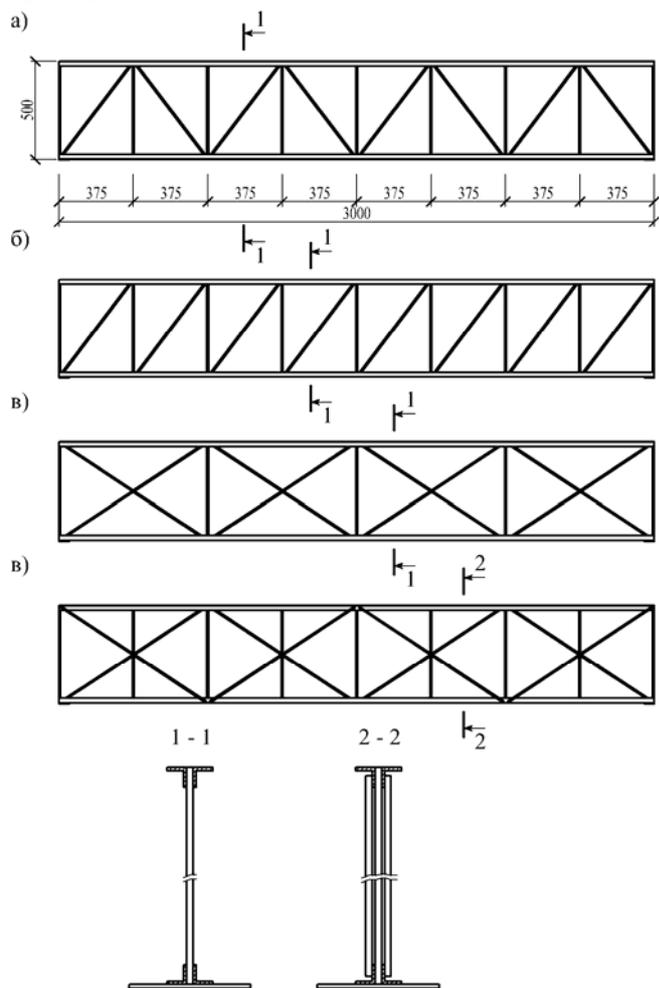


Рисунок 5 – Схемы решёток моделей ферм

динамических испытаний сведены в таблицу 2. Из таблицы видно, что при больших нагрузках коэффициент пропорциональности при произведении  $W_0\omega^2$  имеет меньшие отклонения от константы  $C = 1,268$ . Это можно объяснить тем, что при малых статических нагрузках не все элементы ферм и её сочленения одновременно включаются в работу.

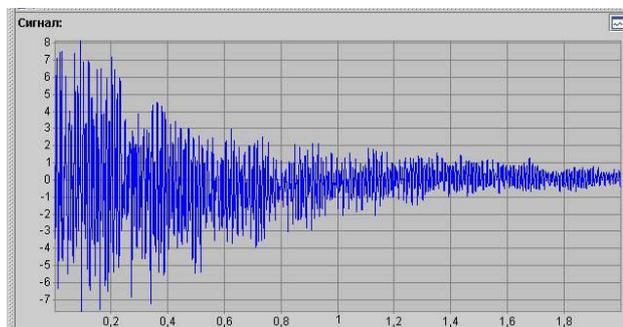
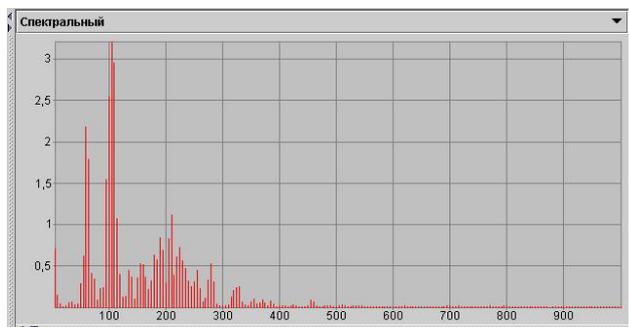


Рисунок 6 – Спектрограммы и виброграммы для модели фермы 1-го типа

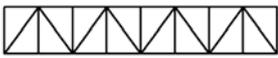
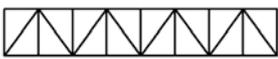
Верхний и нижний пояса ферм выполнены из уголка 25x4 мм по ГОСТ 8509-93, а элементы решетки – из арматурных стержней Ø8А-III по ГОСТ 5781-82. На концах конструкций для крепления к опорам к нижнему поясу приварены стальные полосы сечением 4x50 мм и длиной 250 мм. Погонная масса моделей ферм составляла для каждой фермы соответственно: 7,09 кг/м, 7,09 кг/м, 7,83 кг/м, 8,10 кг/м.

В процессе статических испытаний измерялись значения максимальных прогибов моделей стальных ферм от двух загрузений ( $q_1 = 267$  Н/м или  $q_1 = 320$  Н/м и  $q_2 = 533$  Н/м). Результаты испытаний приведены в таблице 2 (колонка 3).

В процессе динамических испытаний определялись основные частоты собственных поперечных колебаний в ненагруженном состоянии путем обработки спектрограмм и виброграммы колебательного процесса. Пример спектрограммы и виброграммы для моделей ферм первого типа приведен на рисунке 6.

Для проверки зависимости (1) результаты статических и

Таблица 2 – Сопоставление произведения  $W_0\omega^2$  для моделей ферм

| Модель фермы   | Основная частота $\omega$ (с <sup>-1</sup> ) | Максимальный прогиб $W_0$ (м) | Произведение $W_0\omega^2 = \alpha\beta^4 \frac{q}{m}$ | Отклонение от $C = 1,268$ (%) |
|--|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| 1  | 2  | 3                             | 4  | 5                             |
| При $q = 267$ Н/м для моделей типа 1 и 2; при $q = 320$ Н/м для моделей типа 3 и 4     |  |                               |  |                               |
| 1.    | 105,0  | $0,12 \times 10^{-3}$         | 1,157  | -8,75                         |
| 2.    | 90,5   | $0,17 \times 10^{-3}$         | 1,218  | -3,94                         |
| 3.    | 110,0  | $0,09 \times 10^{-3}$         | 1,262  | -0,47                         |
| 4.    | 110,0  | $0,09 \times 10^{-3}$         | 1,304  | 2,84                          |
| При $q = 533$ Н/м для всех моделей ферм  |  |                               |  |                               |
| 1.    | 105,0  | $0,21 \times 10^{-3}$         | 1,216  | -4,10                         |
| 2.    | 90,5   | $0,29 \times 10^{-3}$         | 1,247  | -1,66                         |
| 3.    | 110,0  | $0,18 \times 10^{-3}$         | 1,264  | -0,32                         |
| 4.  | 110,0  | $0,18 \times 10^{-3}$         | 1,306  | 3,00                          |
| Значение произведения С для шарнирно опертых балок                                     |  |                               | 1,268  |                               |

Таким образом, фундаментальная закономерность (1) справедлива и для ферм с параллельными поясами, нагруженными регулярной нагрузкой в её узлах. Для диагностики, контроля жесткости и качества таких ферм можно эффективно использовать вибрационные методы.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Коробко, В.И. Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В. И. Коробко. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 11. – С. 32-36.

2 Коробко, В. И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 396 с.

### Коробко Виктор Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел. (4862)734395, E-mail. [center\\_epb@ostu.ru](mailto:center_epb@ostu.ru)

### Алдушкин Роман Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел. (4862)734395, E-mail. [center\\_epb@ostu.ru](mailto:center_epb@ostu.ru)

### Бояркина Ольга Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Студентка группы ПБ-41  
Тел. (4862)471066

С.В. МАЙОРОВ

## ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ КОЛЕБАНИЙ В РОТОРНЫХ СИСТЕМАХ С РАДИАЛЬНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

*Рассмотрены конструктивные, рабочие и технологические параметры, влияющие на возникновение параметрических и самовозбуждающихся колебаний в роторных системах с подшипниками жидкостного трения.*

**Ключевые слова:** роторная система, подшипник жидкостного трения, параметрические колебания, самовозбуждающиеся колебания.

*We considered construct, operating and technological factors these are reason for parametric and self-excited vibrations in rotor systems supported by fluid-film bearings.*

**Key words:** rotor system, fluid-film bearing, parametric vibrations, self-excited vibrations.

В большинстве современных машин основным приводным устройством являются высокоскоростные роторные системы, в качестве опорных узлов которых применяются подшипники жидкостного трения. В процессе функционирования таких систем могут возникать параметрические и самовозбуждающиеся поперечные колебания ротора, которые могут привести в конечном итоге, как роторную систему, так и машину в целом к неработоспособному состоянию и разрушению. Для исключения критического влияния параметрических и самовозбуждающихся колебаний на работоспособность роторной системы необходимо предусматривать возможность их возникновения, а при необходимости количественно оценивать динамическое состояние ротора на этапе проектирования. Решение подобных задач представляется возможным на основе прямого математического моделирования поперечных колебаний ротора, учитывающего влияние различных факторов, приводящих к возникновению параметрических и самовозбуждающихся колебаний.

Ротора современных машин являются объектами со сложной геометрией (рисунок 1). Прямое моделирование динамики таких систем как твердых деформируемых тел крайне затруднительно, что связано с большими временными и материальными затратами на вычислительные процедуры и анализ полученных результатов. Поэтому в настоящее время большую популярность приобрел подход, в основе которого лежат упрощенные балочные модели роторов [1 – 7], разрешающиеся методом конечных элементов [1 – 7] или методом переходных матриц [2], а также подход, в котором ротор рассматривается как жесткое недеформируемое тело [8].

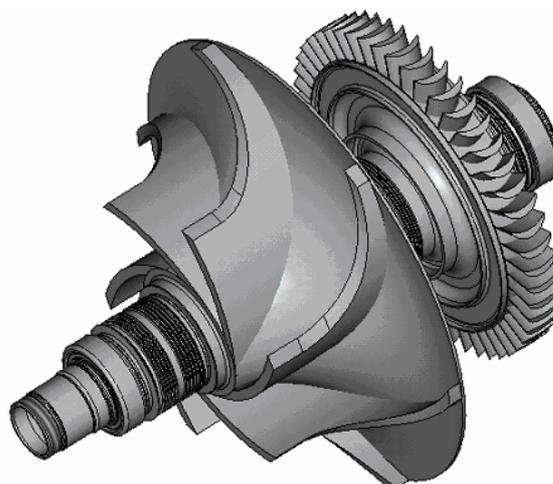


Рисунок 1 – Ротор компрессора газотурбинного авиадвигателя

В общем случае математическая модель поперечных колебаний балочной модели ротора в формулировке метода конечных элементов может быть описана уравнением вида:

$$[M]\{\ddot{Q}\} + [C]\{\dot{Q}\} + [K]\{Q\} = \{F\}, \quad (1)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[K]$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости, соответственно;  $\{\ddot{Q}\}$ ,  $\{\dot{Q}\}$  и  $\{Q\}$  – вектора обобщенных ускорений, скоростей и перемещений соответственно;  $\{F\}$  – вектор внешних сил, более детальное описание членов, входящих в уравнение (1) можно найти в работах [1 – 7]. Также уравнение (1) может быть применено для жесткого недеформируемого ротора, в этом случае нужно пренебречь жесткостью системы, конечная система уравнений движения подробно рассмотрена в работе [8].

Отличительной особенностью роторных систем с подшипниками жидкостного трения является наличие нелинейных гидродинамических сил, действующих на цапфы ротора в опорах, которые должны быть включены в вектор внешних сил при решении уравнения (1). Определение нелинейных гидродинамических сил в подшипнике жидкостного трения производится на основе интегрирования поля давления в подшипнике по опорной поверхности цапфы. В свою очередь определение поля давлений является сложной краевой задачей, в основе которой лежит уравнение Рейнольдса [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^3 \rho}{\mu K_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^3 \rho}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) - 12 \rho V, \quad (2)$$

где  $x$  и  $z$  – окружная и осевая координата развертки подшипника соответственно;  $p$  – давление в подшипнике;  $\mu$  и  $\rho$  – вязкость и плотность жидкости соответственно;  $h$  – функция радиального зазора;  $K_x$  и  $K_z$  – коэффициенты турбулентности в направлениях  $x$  и  $z$  соответственно, определяющие эффективную вязкость при турбулизации потока с учетом напряжений Рейнольдса;  $U$  и  $V$  – значения окружных и радиальных скоростей в точках на поверхности цапфы ротора. Форма записи уравнения (2) не единственная и может отличаться для различных типов и условий работы подшипника, более подробно с различными видами уравнения (2) можно ознакомиться в литературе [1 – 4, 8 – 10]. Тем не менее, приведенное уравнение (2) в полной мере позволяет описать явления вызывающие самовозбуждающиеся и параметрические колебания в роторных системах с подшипниками жидкостного трения.

Рассмотрим процесс возникновения самовозбуждающихся колебаний связанных с нелинейностью гидродинамических сил в подшипнике жидкостного трения (рисунок 2). Когда центр цапфы ротора совпадает с центром подшипника, цапфа нагружена равномерно распределенными по всей поверхности силами трения, определяемыми свойствами смазочного материала и скоростью вращения  $\omega$ .

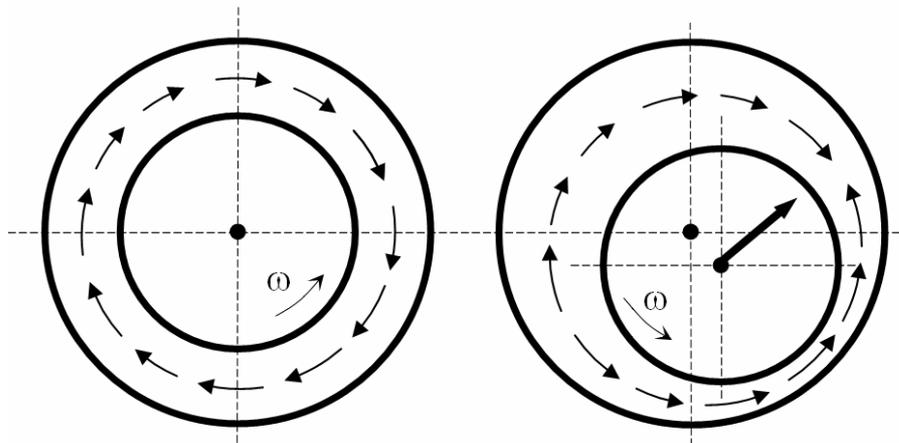


Рисунок 2 – Схема развития самовозбуждающихся колебаний

При смещении центра цапфы в другое положение изменится геометрия радиального зазора. В результате там, где толщина смазочного слоя уменьшится, скорость потока возрастет; в зоне увеличения зазора скорость потока падает. Это приводит к тому, что относительная скорость, определяющая действие сил трения, уменьшится в зоне меньшей толщины слоя и увеличится в зоне большей толщины. Следовательно, и силы трения изменят свои значения в соответствии с относительной скоростью: в зоне увеличения зазора приращение сил трения будет положительным, а в противоположной зоне – отрицательным. Равнодействующая этих приращений, направленная перпендикулярно смещению в сторону вращения ротора, стремится вызвать его вихревое движение с возрастающей амплитудой. Ограничивающим фактором являются демпфирующие свойства смазочного слоя.

На рисунке 3 приведен характерный динамический портрет (3(а) – траектория движения; 3(б) – спектр разложения в ряд Фурье развертки колебаний по оси  $Y$ ; 3, (в) и (г) – развертки колебаний по осям  $X$  и  $Y$  соответственно; здесь и далее величины перемещений представлены в безразмерном, отнесенном к номинальному радиальному зазору, виде удобном для оценки работоспособности системы) самовозбуждающихся колебаний ротора, вращающегося с угловой скоростью 500 рад/с.

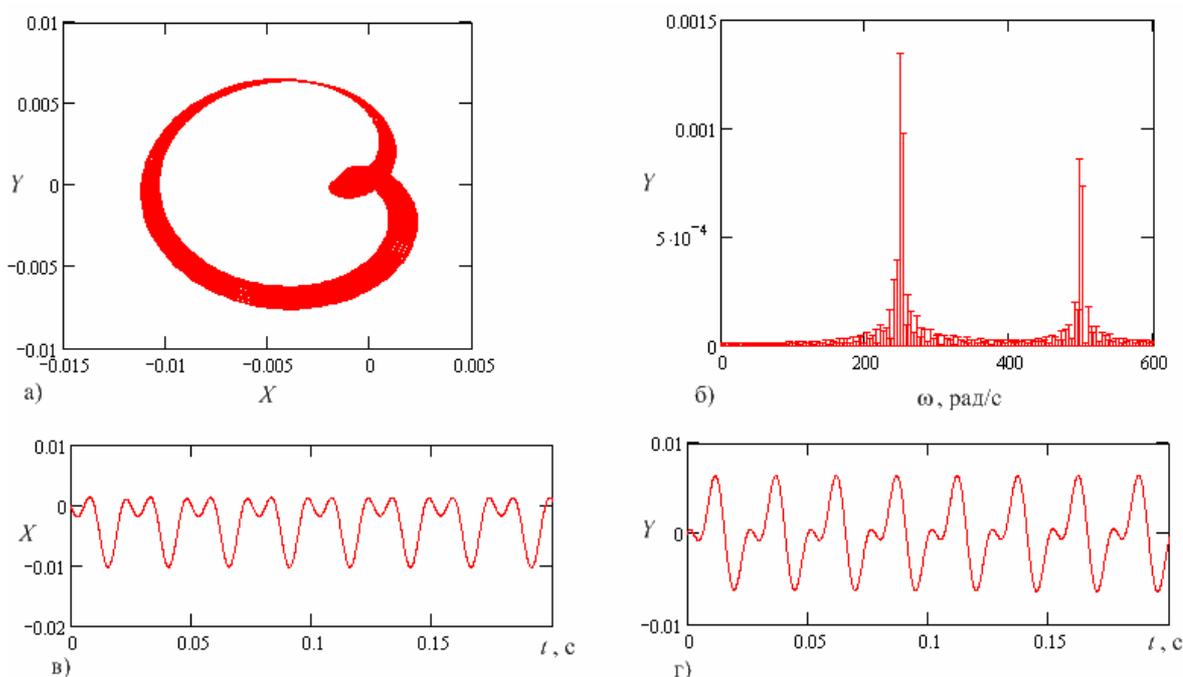


Рисунок 3 – Динамический портрет самовозбуждающихся колебаний

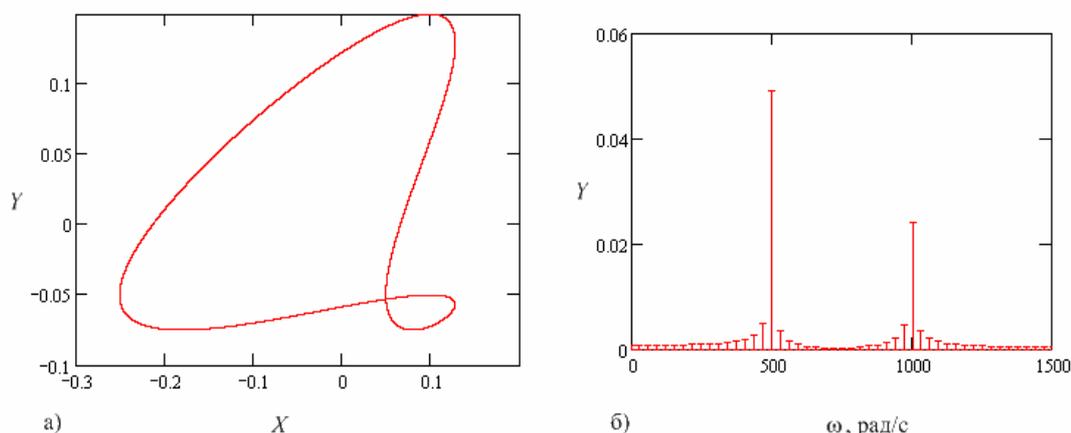
По результатам Фурье-анализа (рисунок 3, б) видно, что кроме оборотной частоты (500 рад/с), связанной с наличием дисбаланса, в спектре колебаний присутствует, частота равная половине оборотной частоты (250 рад/с). Такое проявление самовозбуждающихся колебаний носит название «полускростной вихрь». Кроме «полускростного вихря» часто наблюдаются колебания с частотами меньшими оборотной, и отличающимися от нее целое число раз, в более общем смысле, самовозбуждающиеся колебания принято называть «дробночастотными вихрями». Кратность «дробночастотного вихря» оборотной частоте, определяется рабочими и конструктивными параметрами роторной системы с подшипниками жидкостного трения.

Из причины, вызывающих параметрические колебания можно выделить следующие:

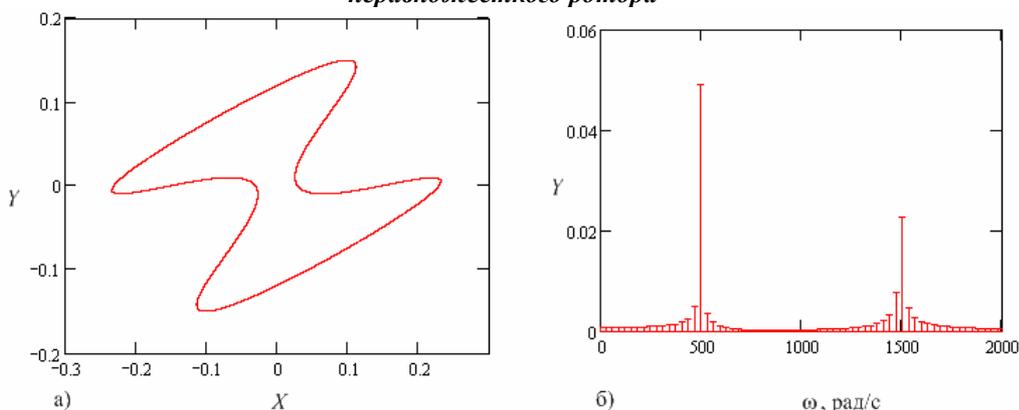
- 1) Неравножесткость ротора – конструктивный параметр, в этом случае матрицы масс и жесткости в уравнений (1) являются периодическими функциями времени [11];
- 2) Отклонение от круглости цапфы ротора в подшипнике жидкостного трения – технологический параметр, в этом случае функция радиального, входящей в уравнение (2), является периодической функцией времени [11];

3) Пульсация давления подачи смазки в подшипник жидкостного трения – рабочий параметр, в этом случае краевые условия уравнения (2), является периодической функцией времени [12].

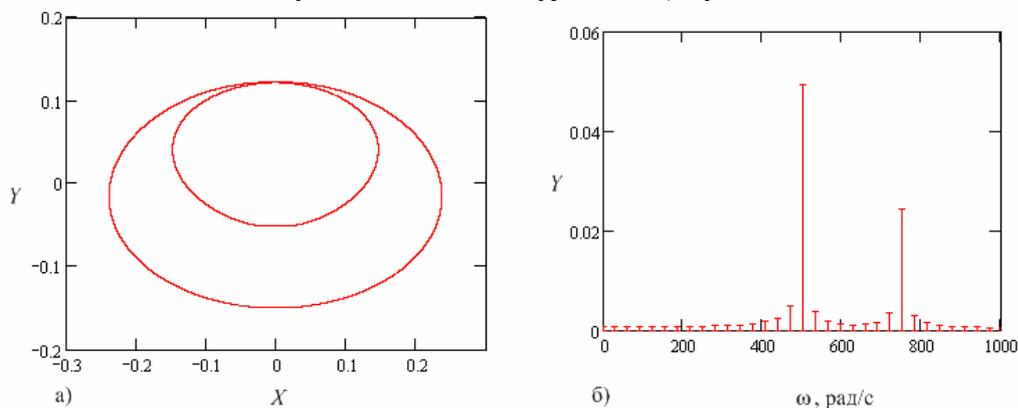
На рисунках 4 – 6 характерные динамические портреты параметрических колебаний цапфы ротора, вращающегося с угловой скоростью 500 рад/с, в подшипнике жидкостного трения, вызванных различными факторами (4(а) и (б) – траектория и спектр разложения в ряд Фурье развертки колебаний по оси  $Y$ , неравножесткого ротора; 5(а) и (б) – траектория и спектр разложения в ряд Фурье развертки колебаний по оси  $Y$ , при отклонении от круглости цапфы ротора; 6(а) и (б) – траектория и спектр разложения в ряд Фурье развертки колебаний по оси  $Y$ , при пульсации давления подачи смазки с частотой 750 рад/с).



**Рисунок 4 – Динамический портрет параметрических колебаний неравножесткого ротора**



**Рисунок 5 – Динамический портрет параметрических колебаний ротора при отклонении от круглости цапфы**



**Рисунок 6 – Динамический портрет параметрических колебаний ротора при пульсации давления подачи смазки в подшипник**

Из анализа динамических портретов видно, параметрические колебания могут возникать с различными частотами кратными оборотной частоте, связанной с наличием дисбаланса. Однако, для каждого конкретного случая необходимо проводить динамический расчет, а затем по полученным результатам делать вывод о работоспособности системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Adams, M.L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting /M.L. Adams. – NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 354 p.
2. Yamamoto, T., Ishida Y. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications /T. Yamamoto, Y. Ishida. – New York, John Wiley&Sons, 2001. – 326 p.
3. Kramer, E. Dynamics of rotors and foundations /E. Kramer. – Berlin, Springer-Verlag, 1993. – 384 p.
4. Childs, D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis / D. Childs. – New York, John Wiley&Sons, 1993. – 476 p.
5. Nelson H. A finite rotating shaft element using Timoshenko beam theory /H. Nelson // Journal of mechanical design, 1980, № 102. – p. 793 – 803
6. Соломин, О.В. Уравнения конечно-элементного анализа динамики пространственного движения ротора [Текст] / О.В. Соломин, С.В. Майоров, А.А. Морозов // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки. 2007. № 3 – с. 38 –42
7. Соломин, О.В. Построение конечно-элементной модели роторной системы с учетом упругих, демпфирующих и инерционных свойств опор [Текст] /О.В. Соломин, С.В. Майоров, Д.А. Иванов //Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки. 2007. № 4. – с. 29 – 34
8. Соломин, О.В. Моделирование пространственного движения несимметричного жесткого ротора на подшипниках жидкостного трения [Текст] /О.В. Соломин, С.В. Майоров //Известия вузов. Машиностроение. 2007, № 10. – с. 19 – 24
9. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения [Текст] /Л.А. Савин, ОВ. Соломин. – М.: Машиностроение – 1, 2006. – 444 с.
10. Соломин, О.В. Динамические характеристики гидростатодинамических опор в условиях двухфазного состояния смазочного материала [Текст]/ О.В. Соломин // Известия вузов. Машиностроение, 2006, № 1. – С. 14 – 23
11. Кельзон, А.С. Расчет и конструирование роторных машин [Текст] / А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.В. Январев. – Л.: Машиностроение, 1977 – 288с.
12. Луканенко, В.Г. Колебания высокоскоростных роторов на гидростатических подшипниках и методы снижения виброактивности машин [Текст] /В.Г. Луканенко. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001. – 122 с.

### **Майоров Сергей Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: pmpl@ostu.ru

УДК 53

С.А. ГАСАНОВА

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОМЕТРОВОЙ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА УПРУГИХ СРЕД

*Теоретически рассмотрена задача о прохождении граничных возмущений через плоский слой конечной единичной толщины, заполненном упругой однородной изотропной средой. Задача моделирует прохождение плоской одномерной волны в рамках классической линейной теории упругости изотропных однородных сред через пластину конечной толщины. В найденном аналитическом решении выделены слагаемые, трактуемые как проходящий и отраженный сигналы. Показано, что классическим решением можно пользоваться как эталонным, с которым в экспериментальных условиях можно сравнивать отраженные от границы адгезионного контакта покрытия и основы сигналы. Сигнал в отслоившемся покрытии должен быть сильнее расчетного, в то время как сигнал для адгезионного контакта слабее.*

**Ключевые слова:** адгезия, модель упругой среды, адгезионный контакт, плоская волна, тонкопленочное покрытие, неразрушающий контроль качества соединения, волновое уравнение, линейная теория упругости.

*Problem is theoretically considered about passing of boundary perturbation through flat layer of final unit thickness, filled with elastic uniform isotropic medium. Problem models passing of flat one dimensional wave in frame classical linear theory of bounce of isotropic homogeneous mediums through plate of finite thickness. Composed, treated how in found analytical solution are selected passing and reflected signals. It is shown that how master to use it is possible with genuine solution, with which under experimental conditions it is possible to compare signals reflected from border of adhesive contact of covering and base. Signal in exfoliating covering should be stronger than accounting, whereas signal for adhesive contact more slightly.*

**Key words:** adhesion, model of elastic medium, adhesive contact, plane wave, - thin-film covering, not destroying control of quality of connection, wave equation, linear theory of elasticity.

### ЗАДАЧИ О ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ПЛАСТИН В СОСТОЯНИИ ИХ АДГЕЗИИ

Существует проблема теоретического обоснования неразрушающего контроля адгезионного соединения тонкопленочного покрытия с основой, на которую оно нанесено. Один из вариантов – оценка интенсивности отраженного от поверхности раздела сигнала, направленного к ней со стороны свободной поверхности. Учитывая важность сплошности соединения и возможность наличия ее нарушения микроскопических размеров, при этом желательно использовать волны очень короткой длины. Такие волны можно инициировать с помощью рентгеновского облучения свободной поверхности [1]. При этом проблема осложняется тем, что в нанометровом диапазоне длин дисперсионный закон для таких волн перестает быть линейным. Кроме того, должна существовать модель упругой среды в достаточной степени адекватно отражающая механическое поведение материалов, находящихся в состоянии адгезии. Для теоретического рассмотрения ситуации предлагается использовать вариант линейной теории упругости изотропных, однородных материалов второго порядка, предложенный в работе [2]. Выбор теории обусловлен тем, что, как показано в [2], в ее рамках существует возможность описания, как дисперсионного закона, так и адгезионного контакта. Последний рассматривается как вариант сопряжения полей напряжений, перемещений и, в дополнение к классическому жесткому контакту, – их градиентов, возникающих в контактирующих телах при адгезии. В данной работе в качестве примера рассматривается одномерный вариант теории, в которой учитываются деформации и перемещения частиц контактирующих тел только в направлении нормали к плоскости контакта пленки и основы. Задача о распределении продольных перемещений  $u^{(j)}$  вдоль оси

$Ox$ , ориентированной перпендикулярно плоскости контакта тел с номерами  $j = 1, 2$  в любой момент времени  $t > 0$  в отсутствии внешних воздействий имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u^{(j)}}{\partial x^2} - b^{(j)2} \frac{\partial^4 u^{(j)}}{\partial x^4} = \frac{1}{c^{(j)2}} \frac{\partial^2 u^{(j)}}{\partial t^2}, j = 1: x \in (0; h^{(1)}) \quad (1)$$

$$j = 2: x \in (-h^{(2)}; 0)$$

$$\frac{\partial u^{(j)}}{\partial x} - b^{(j)2} \frac{\partial^3 u^{(j)}}{\partial x^3} = 0, \quad x = h^{(1)}, x = -h^{(2)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u^{(j)}}{\partial x^2} + \frac{\pi_0^{(j)}}{2A_1^{(j)}} = 0, \quad x = h^{(1)}, x = -h^{(2)} \quad (3)$$

$$2A_1^{(1)} \left( \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} - b^{(1)2} \frac{\partial^3 u^{(1)}}{\partial x^3} \right) = 2A_1^{(2)} \left( \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x} - b^{(2)2} \frac{\partial^3 u^{(2)}}{\partial x^3} \right), \quad x = 0 \quad (4)$$

$$2A_1^{(1)} b^{(1)2} \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial x^2} + \pi_0^{(1)} = 2A_1^{(2)} b^{(2)2} \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial x^2} + \pi_0^{(2)}, \quad x = 0 \quad (5)$$

$$u_1^{(1)} = u_1^{(2)}, \quad x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} = \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x}, \quad x = 0 \quad (7)$$

В этой системе:  $c^{(j)}$  – скорость распространения малых продольных возмущений в материале пластины с номером  $j$ ;  $2A^{(j)} = 2\mu^{(j)} + \lambda^{(j)}$ ,  $\mu^{(j)}, \lambda^{(j)}$  – его коэффициенты Ламэ материала пластины;  $b^{(j)}$  – дополнительная константа, характеризующая неклассическое свойство материала оказывать сопротивление приобретению не только относительной деформации, но и ее градиента;  $\pi_0^{(j)}$  – также дополнительная постоянная величина, характеризующая начальное напряженное состояние среды, способное совершать работу на градиентах относительных деформаций.

Уравнения (1) при  $b^{(j)} = 0$  превращаются в известные одномерные классические волновые уравнения. Условия (2) и (3) означают отсутствие на свободных поверхностях пластин классических поверхностных нагрузок, способных совершать работу на перемещениях точек своего воздействия и на их градиентах соответственно. Условия (4) – (7) – это условия сопряжения. Условия (4) и (5) означают непрерывность нормальных к поверхности контакта составляющих классического тензора напряжений, для которого обобщенным перемещением является классический тензор деформации, и неклассического тензора напряжений, для которого обобщенным перемещением является тензор, являющийся вторым градиентом вектора перемещений. Условия (6) и (7) – это кинематические условия полей перемещений и их производных по нормали к поверхности контакта соответственно.

В соответствии с этой постановкой нарушение адгезии означает переход от условий сопряжения системы (1), соответствующих адгезионному контакту, к одному из следующих условий, заменяющих соответствующие в системе (1):

$$2A_1^{(1)} b^{(1)2} \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial x^2} + \pi_0^{(1)} = 2A_1^{(2)} b^{(2)2} \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial x^2} + \pi_0^{(2)} = 0 \quad x = 0$$

– вместо (5) и (7) означает переход к классическому жесткому контакту в рамках неклассической теории упругости. Добавление к этому условию требования

$$2A_1^{(1)} \left( \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} - b^{(1)2} \frac{\partial^3 u^{(1)}}{\partial x^3} \right) = 2A_1^{(2)} \left( \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x} - b^{(2)2} \frac{\partial^3 u^{(2)}}{\partial x^3} \right) = 0, \quad x = 0$$

– вместо (4) и (6) означает потерю контакта между пластинами, то есть расслоение их системы.

Как и в классическом случае, волновое уравнение (1), в силу своей линейности, допускает общее решение, являющееся линейной комбинацией базисных, частных. Одно из таких базисных решений имеет вид:

$$u^{(j)}_m = [D_{1m} e^{K_{1m}x} + D_{2m} e^{-K_{1m}x} + D_{3m} \sin(K_{2m}x) + D_{4m} \cos(K_{2m}x)](C_{1m} \sin mct + C_{2m} \cos mct) \quad (8)$$

Для определения постоянных интегрирования  $D_{km}$ ,  $k=1, \dots, 4$ ;  $C_{pm}$ ,  $p=1, 2$ , используются начальные и краевые условия.

Вид выражения (8) совпадает с классическим за исключением первых двух слагаемых в квадратных скобках. Учитывая, что параметр  $b^{(j)}$  очень мал (имеет порядок  $10^{-10}$  м [2]) и стоит при старшей производной, можно утверждать, что эти слагаемые описывают пограничный слой вблизи граничных плоскостей пластины, имеющий толщину порядка величины этого параметра. Это означает, что решение волнового уравнения (1) уже на очень небольшом расстоянии от границ пластины по форме полностью совпадает с классическим с той лишь разницей, что волновое число связано с частотой колебаний более сложной, чем линейная, зависимостью.

$$K_{1m} = \sqrt{\frac{\sqrt{1+4b^2m^2} + 1}{2b^2}}; \quad K_{2m} = \sqrt{\frac{\sqrt{1+4b^2m^2} - 1}{2b^2}}$$

Величина параметра  $m$  определяется при решении соответствующей задачи о поиске собственных функций и собственных чисел. Например, при условии отсутствия внешних воздействий на граничных плоскостях исследуемой пластины толщиной  $h$  уравнение для поиска этого параметра имеет вид:

$$\operatorname{tg} \left( 2 \frac{h}{b} \sqrt{\frac{\sqrt{1+4z^2} - 1}{2}} \right) = -\frac{2z}{\sqrt{1+4z^2}}, \quad z = bm$$

Отсюда следует, что для анализа качества адгезионного соединения можно попытаться использовать только классические формы решения сопряженной одномерной задачи о продвижении сигнала через систему двух пластин.

Классическое решение представляет еще практический интерес по следующим обстоятельствам. Если состояние адгезионного контакта проверяется путем пропускания через него продольных плоских волн, распространяющихся от свободной поверхности покрытия по нормали к ней, то, рассматривая в качестве эталонного случай классического жесткого контакта, следует ожидать, что при полном расслоении покрытия и основы интенсивность отраженного от поверхности контакта сигнала окажется больше расчетной. Учитывая это, далее приведено подробное решение задачи о прохождении одномерного сигнала через пластину заданной толщины в классической постановке, позволяющее оценить величину отраженного от граничной поверхности и прошедшего через нее сигнала.

### КЛАССИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНУ ЗАДАННОЙ ТОЛЩИНЫ

Рассмотрена задача о распространении граничных возмущений в плоском слое конечной толщины  $L=1$ , заполненном упругой однородной изотропной средой. Прямоугольную декартову систему координат выберем таким образом, чтобы ось  $Ox$  была направлена перпендикулярно граничным плоскостям  $x=0$  и  $x=1$ .

#### Постановка задачи:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}; \quad (9)$$

$$U|_{t=0} = 0; \quad U'_t|_{t=0} = 0 \quad (10)$$

$$(\alpha_0 U + \beta_0 U'_x)|_{x=0} = q_0(t); \quad (\alpha_1 U + \beta_1 U'_x)|_{x=1} = q_1(t) \quad (11)$$

$U(x;t) = o(1)$ ,  $x \rightarrow \infty$  (требование ограниченности).

**Решение:**

Обозначим  $\gamma^2 = \frac{1}{c^2}$ . К задаче (9) – (11) применим интегральное преобразование

Лапласа по времени  $t$ . Тогда

$$U_{xx}^L - \gamma^2 s^2 U_x^L = 0; \quad (12)$$

$$(\alpha_0 U^L + \beta_0 U_x^L) \Big|_{x=0} = q_0^L(s); \quad (\alpha_1 U^L + \beta_1 U_x^L) \Big|_{x=1} = q_1^L(s). \quad (13)$$

Найдем общее решение уравнения (12). Составим характеристическое уравнение и найдем его корни

$$k^2 - \gamma^2 s^2 = 0,$$

$$k^2 = \gamma^2 s^2,$$

$$U^L(x;s) = c_1(s)e^{-\gamma s x} + c_2(s)e^{\gamma s x}. \quad (14)$$

Воспользуемся граничными условиями (13)

$$\alpha_0 \cdot (c_1(s) \cdot e^{-\gamma s x} + c_2(s) \cdot e^{\gamma s x}) + \beta_0 \cdot (-\gamma \cdot s \cdot c_1(s) \cdot e^{-\gamma s x} + \gamma \cdot s \cdot c_2(s) \cdot e^{\gamma s x}) \Big|_{x=0} = q_0^L(s),$$

$$\alpha_0 \cdot (c_1(s) \cdot e^0 + c_2(s) \cdot e^0) + \beta_0 \cdot (-\gamma \cdot s \cdot c_1(s) \cdot e^0 + \gamma \cdot s \cdot c_2(s) \cdot e^0) = q_0^L(s),$$

$$\alpha_0 \cdot (c_1(s) + c_2(s)) + \beta_0 \cdot (-\gamma \cdot s \cdot c_1(s) + \gamma \cdot s \cdot c_2(s)) = q_0^L(s). \quad (15)$$

Аналогично получим

$$\alpha_1 \cdot (c_1(s) \cdot e^{-\gamma s} + c_2(s) \cdot e^{\gamma s}) + \beta_1 \cdot (-\gamma \cdot s \cdot c_1(s) \cdot e^{-\gamma s} + \gamma \cdot s \cdot c_2(s) \cdot e^{\gamma s}) \Big|_{x=1} = q_1^L(s),$$

$$\alpha_1 \cdot (c_1(s) \cdot e^{-\gamma s} + c_2(s) \cdot e^{\gamma s}) + \beta_1 \cdot (-\gamma \cdot s \cdot c_1(s) \cdot e^{-\gamma s} + \gamma \cdot s \cdot c_2(s) \cdot e^{\gamma s}) = q_1^L(s). \quad (16)$$

Общее решение уравнения (12) имеет вид (13). Удовлетворяя граничным условиям (13), получим систему линейных алгебраических уравнений (14) – (15) относительно  $c_1(s)$  и  $c_2(s)$ .

Введем обозначения:

$$B \cdot C = F, \quad (17)$$

где  $C = \begin{pmatrix} c_1(s) \\ c_2(s) \end{pmatrix}$ ,  $F = \begin{pmatrix} q_0^L(s) \\ q_1^L(s) \end{pmatrix}$ ,  $B = (b_{ij}(s))_{2 \times 2}$ ,  $b_{1j}(s) = a_{1j}(s)$ ,  $b_{2j}(s) = e^{(-1)^j \cdot \gamma \cdot s} \cdot a_{2j}(s)$ ;

$$A = (a_{ij}(s))_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \alpha_0 - \beta_0 \cdot s \cdot \gamma & \alpha_0 + \beta_0 \cdot s \cdot \gamma \\ \alpha_1 - \beta_1 \cdot s \cdot \gamma & \alpha_1 + \beta_1 \cdot s \cdot \gamma \end{pmatrix}.$$

Решая систему (17), получаем

$$c_1(s) = \frac{q_0^L(s) \cdot a_{22}(s) \cdot e^{\gamma \cdot s} - q_1^L(s) \cdot a_{12}(s)}{e^{\gamma \cdot s} \cdot a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) - e^{-\gamma \cdot s} \cdot a_{12}(s) \cdot a_{21}(s)},$$

$$c_2(s) = \frac{q_1^L(s) \cdot a_{11}(s) - q_0^L(s) \cdot a_{21}(s) \cdot e^{-\gamma \cdot s}}{e^{\gamma \cdot s} \cdot a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) - e^{-\gamma \cdot s} \cdot a_{12}(s) \cdot a_{21}(s)}. \quad (18)$$

Подставляя постоянные (18) в (14), получим:

$$U^L(x;s) = \frac{q_0^L(s) \cdot a_{22}(s) \cdot e^{\gamma \cdot s} - q_1^L(s) \cdot a_{12}(s)}{e^{\gamma \cdot s} \cdot a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) - e^{-\gamma \cdot s} \cdot a_{12}(s) \cdot a_{21}(s)} \cdot e^{-\gamma s x} + \frac{q_1^L(s) \cdot a_{11}(s) - q_0^L(s) \cdot a_{21}(s) \cdot e^{-\gamma \cdot s}}{e^{\gamma \cdot s} \cdot a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) - e^{-\gamma \cdot s} \cdot a_{12}(s) \cdot a_{21}(s)} \cdot e^{\gamma s x}$$

$$U^L(x;s) = \frac{1}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) \cdot \left( e^{\gamma s} - e^{-\gamma s} \cdot \frac{a_{12}(s) \cdot a_{21}(s)}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s)} \right)} \cdot \left[ (q_0^L(s) \cdot a_{22}(s) \cdot e^{\gamma s} - q_1^L(s) \cdot a_{12}(s)) \cdot e^{-\gamma s x} + \right.$$

$$\left. + (q_1^L(s) \cdot a_{11}(s) - q_0^L(s) \cdot a_{21}(s) \cdot e^{-\gamma s}) \cdot e^{\gamma s x} \right], \quad \text{или}$$

$$U^L(x;s) = \frac{1}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) \cdot (1 - e^{-2\gamma s} \cdot R(s))} \cdot \left\{ [q_0^L(s) \cdot a_{22}(s) \cdot e^{\gamma s} - q_1^L(s) \cdot a_{12}(s)] \cdot e^{-\gamma s(x+1)} + \right.$$

$$+ [q_1^L(s) \cdot a_{11}(s) - q_0^L(s) \cdot a_{21}(s) \cdot e^{-\gamma s}] \cdot e^{\gamma s(x-1)} \}, \quad (19)$$

где  $R(s) = \frac{a_{12}(s)a_{21}(s)}{a_{11}(s)a_{22}(s)}$ .

Так как

$$\lim_{s \rightarrow \infty} R(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{a_{12}(s)a_{21}(s)}{a_{11}(s)a_{22}(s)} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{(\alpha_0 + \beta_0 s \gamma) \cdot (\alpha_1 - \beta_1 s \gamma)}{(\alpha_0 - \beta_0 s \gamma) \cdot (\alpha_1 + \beta_1 s \gamma)} =$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\alpha_0 \alpha_1 - \alpha_0 \beta_1 s \gamma + \beta_0 s \gamma \alpha_1 - \beta_0 \beta_1 s^2 \gamma^2}{\alpha_0 \alpha_1 + \alpha_0 \beta_1 s \gamma - \beta_0 s \gamma \alpha_1 - \beta_0 \beta_1 s^2 \gamma^2} = \left[ \frac{\infty}{\infty} \right] = 1,$$

то существует некоторое число  $s_0$ , что в полуплоскости  $\text{Re } s > \text{Re } s_0$  выполняется неравенство  $|e^{-2\gamma s} \cdot R(s)| < 1$ . Поэтому множитель  $\frac{1}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) \cdot (1 - e^{-2\gamma s} \cdot R(s))}$  раскладывается в равномерно сходящийся в этой полуплоскости ряд

$$\frac{1}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s) \cdot (1 - e^{-2\gamma s} \cdot R(s))} = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(s) \cdot e^{-2\gamma ns}, \quad R_n(s) = \frac{R^n(s)}{a_{11}(s) \cdot a_{22}(s)}. \quad (20)$$

Подставим (20) в (19)

$$U^L(x; s) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(s) e^{-2\gamma ns} \cdot \{ [q_0^L(s) \cdot a_{22}(s) \cdot e^{\gamma s} - q_1^L(s) \cdot a_{12}(s)] \cdot e^{\gamma s(x+1)} +$$

$$+ [q_1^L(s) a_{11}(s) e^{-\gamma s} - q_0^L(s) \cdot a_{21}(s) \cdot e^{-\gamma s}] \cdot e^{\gamma s(x-1)} \}.$$

Раскрыв скобки, и упростив выражение, получим

$$U^L(x; s) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} q_j^L(s) R_{ijn}^L(s) \cdot e^{-sk_{ijn}(x)}, \quad \text{где} \quad (21)$$

$$R_{00n}^L(s) = a_{22}(s) \cdot R_n(s), \quad R_{01n}^L(s) = -a_{12}(s) \cdot R_n(s),$$

$$R_{10n}^L(s) = -a_{21}(s) \cdot R_n(s), \quad R_{11n}^L(s) = a_{11}(s) \cdot R_n(s), \quad (22)$$

$$k_{00n}(x) = \gamma(2n + x), \quad k_{01n}(x) = \gamma(2n + 1 + x),$$

$$k_{10n}(x) = \gamma(2n + 2 - x), \quad k_{11n}(x) = \gamma(2n + 1 - x).$$

Оригиналы каждого из членов ряда (21) находим с использованием свойств преобразования Лапласа

$$U(x; t) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} q_i [t - k_{ijn}(x)] \cdot H[t - k_{ijn}(x)] * R_{ijn}(t) \quad (23)$$

Для конечного момента времени  $t$  из-за носителя функций Хевисайда ряд (23) имеет конечное число ненулевых членов  $\left( H(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 0, \\ 1, & \text{если } t \geq 0. \end{cases} \right)$ .

Таким образом

$$U(x; t) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{n=0}^{N_{ij}(x;t)} q_i [t - k_{ijn}(x)] \cdot H[t - k_{ijn}(x)] * R_{ijn}(t) \quad (24)$$

Верхний предел суммирования  $N_{ij}(x; t)$  определяется неравенством  $t - k_{ijn}(x) \geq 0$  и при различных значениях индексов  $i$  и  $j$  вычисляются следующим образом:

$$N_{00}(x; t) = \left[ \frac{t - \gamma x}{2\gamma} \right]; \quad N_{10}(x; t) = \left[ \frac{t + \gamma(x - 2)}{2\gamma} \right]; \quad N_{01}(x; t) = \left[ \frac{t - \gamma(x + 1)}{2\gamma} \right]; \quad N_{11}(x; t) = \left[ \frac{t + \gamma(x - 1)}{2\gamma} \right];$$

где  $[\bullet]$  - целая часть числа.

При записи сверток в виде интегралов формула (24) примет вид

$$U(x;t) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{n=0}^{N_{ij}(x;t)} H[t - k_{ijn}(x)] \cdot \int_0^{t-k_{ijn}(x)} q_i[t - \tau - k_{ijn}(x)] \cdot R_{ijn}(\tau) d\tau$$

Пусть для определенности имеем задачу

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}; \quad U|_{t=0} = 0; \quad U_t|_{t=0} = 0; \quad U|_{x=0} = 0; \quad U|_{x=1} = w(t).$$

Применим интегральное преобразование Лапласа по времени  $t$ . Тогда, согласно (16)

$$\alpha_0 = 1, \beta_0 = 0, q_0(t) = 0, \alpha_1 = 1, \beta_1 = 0, q_1(t) = w(t)$$

В силу (22)

$$R_{00n}^L(s) = 1, R_{01n}^L(s) = -1, R_{10n}^L(s) = -1, R_{11n}^L(s) = 1,$$

Вычислив оригиналы, получим

$$R_{00n}(t) = R_{11n}(t) = \delta(t), R_{01n}(t) = R_{10n}(t) = -\delta(t)$$

Тогда из (24) получим

$$U(x;t) = (-1) \cdot \sum_{n=0}^{N_{01}(x;t)} w(t - k_{01n}(x)) \cdot H(t - k_{01n}(x)) + \sum_{n=0}^{N_{11}(x;t)} w(t - k_{11n}(x)) \cdot H(t - k_{11n}(x)) =$$

$$= - \sum_{n=0}^{\left[ \frac{t-\gamma(x+1)}{2\gamma} \right]} w(t - \gamma(2n+1+x)) \cdot H(t - \gamma(2n+1+x)) + \sum_{n=0}^{\left[ \frac{t+\gamma(x-1)}{2\gamma} \right]} w(t - \gamma(2n+1-x)) \cdot H(t - \gamma(2n+1-x)) \quad (25)$$

Анализируя полученную функцию (25), можно сделать вывод о том, что первое слагаемое представляет собой отраженную волну, а второе – прямую.

В зависимости от вида функции  $w(t)$  на границе  $x = 1$  можно получать различные изображения функции (25).

При построении графиков функции  $U(x,t)$  были использованы средства MathCAD. В данном случае можно строить отдельно прямую и обратную волны и их сумму.

Приведем некоторые из них.

Если функция  $w(t) = t$ , функция  $U(x,t)$  после упрощений приняла вид

$$U(x,y) = (-t) \left[ \frac{1}{2} \left[ t - \frac{1}{c}(x+1) \right] \cdot c + 1 \right] + \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ t - \frac{1}{c}(x+1) \right] \cdot c + 1 \right] \cdot x + \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ t - \frac{1}{c}(x+1) \right] \cdot c + 1 \right]^2 +$$

$$+ t \cdot \left[ \frac{1}{2} \left[ t + \frac{1}{c}(x-1) \right] \cdot c + 1 \right] + \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ t + \frac{1}{c}(x-1) \right] \cdot c + 1 \right] \cdot x + \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ t + \frac{1}{c}(x-1) \right] \cdot c + 1 \right]^2. \quad (26)$$

(Значения функции Хевисайда приняты равными 1, нулевые члены отброшены).

Поверхность (26) принимает вид указанный на рисунке 1.

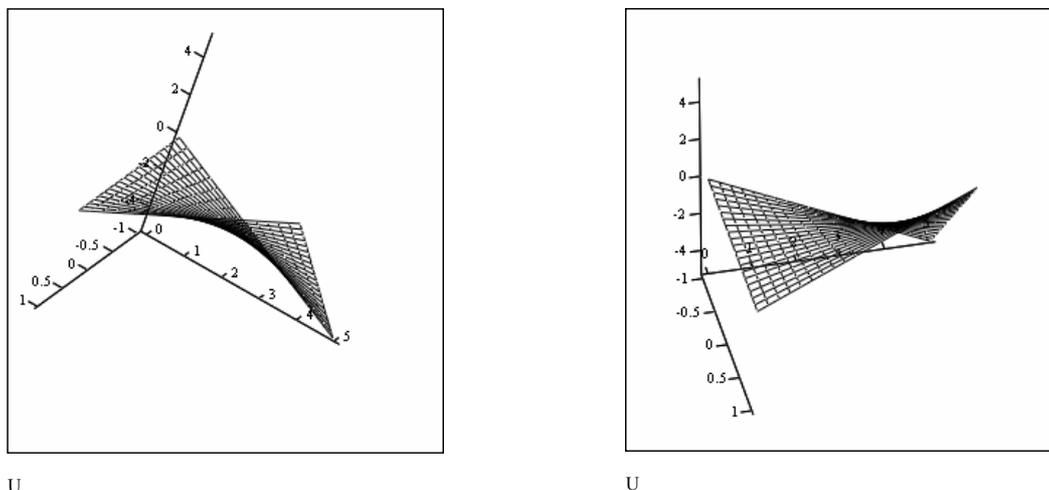


Рисунок 1 – Пространственно-временная картина распространения краевого возмущения при граничном условии  $w(t) = t$  (разные ракурсы)

Если в качестве граничного условия выбрать функцию  $w(t) = e^{-t}$  выражение (25) после упрощений примет вид

$$\begin{aligned}
 U(x, y) = & \left(-e^{\frac{1}{c}}\right) \cdot \frac{e^{\frac{1}{c}x}}{e^y \left[\left(e^{\frac{1}{c}}\right)^2 - 1\right]} \cdot \left[ e^{\frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ y - \frac{1}{c}(x+1) \right] \right]^{c+1}} \right]^2 + e^{\frac{1}{c}} \cdot \frac{e^{\frac{1}{c}x}}{e^y \left[\left(e^{\frac{1}{c}}\right)^2 - 1\right]} + \\
 & + \frac{e^{\frac{1}{c}}}{e^y \cdot e^{\frac{1}{c}x} \left[\left(e^{\frac{1}{c}}\right)^2 - 1\right]} \cdot \left[ e^{\frac{1}{c} \left[ \frac{1}{2} \left[ y + \frac{1}{c}(x-1) \right] \right]^{c+1}} \right]^2 - \frac{e^{\frac{1}{c}}}{e^y \cdot e^{\frac{1}{c}x} \left[\left(e^{\frac{1}{c}}\right)^2 - 1\right]}
 \end{aligned} \quad (27)$$

Поверхность (27) принимает вид (рисунок 2)

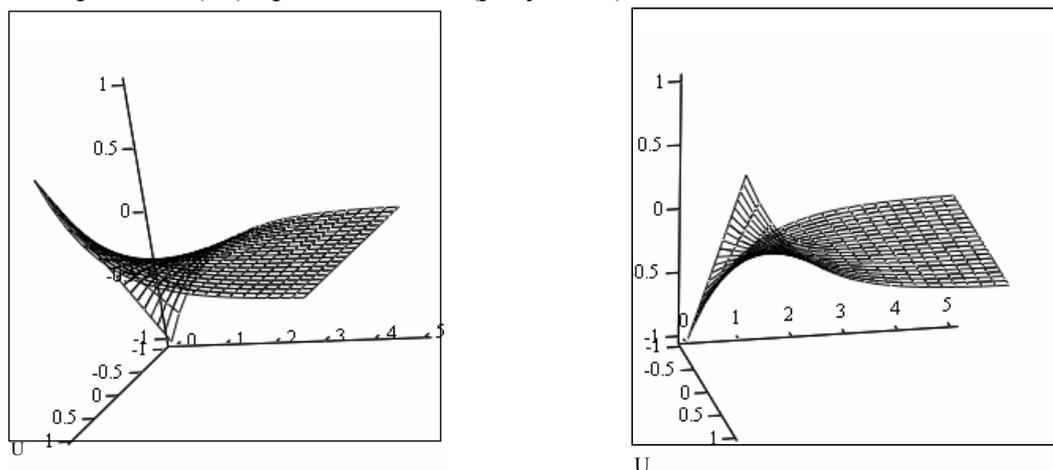


Рисунок 2 – Пространственно-временная картина распространения краевого возмущения при граничном условии  $w(t) = e^{-t}$  (разные ракурсы)

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в данной работе теоретические рассуждения позволяют построить теоретическую базу метода неразрушающего контроля качества поверхности адгезионного контакта тонкопленочного покрытия посредством пропускания через покрытие волн с длиной в нанометровом диапазоне и регистрации отраженного от поверхности контакта сигнала. Реализуемая в практических условиях регистрация сигнала дает возможность сравнить его с рассчитанным теоретически на основании классической теории. По степени их рассогласования можно судить о качестве адгезионного контакта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
2. Шоркин, В. С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц // Упругость и неупругость. Под ред. И. А. Кийко, Р.А. Васина, Г. Л. Бровко. – М.: Ленанд, 2006. – С. 271 – 282.
3. Горелик С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский // М.: Металлургия, 1988. – 576 с.
4. Горшков А.Г. Медведский А.Л. Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
5. Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в MathCAD 12. – СПб.: Питер, 2006. – 544 с.
6. Карташев А.П., Рождественский Б.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. – М.: Наука, 1986. – 272 с.

**Гасанова Светлана Асатовна**

Мценский филиал ОрелГТУ, зав.кафедрой «Высшая математика»

Контактный телефон: 8(4862)419844

E-mail: [sv\\_gasanova@mail.ru](mailto:sv_gasanova@mail.ru)

Л. Ю. ФРОЛЕНКОВА

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В РАМКАХ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

*Предлагается модель упругой среды, в которой реальные электрические силы взаимодействия частиц в приповерхностных слоях заменены феноменологическими внутренними упругими силами. На основании этого положения разработана методика расчета энергии адгезии для материалов сложного химического состава и структуры, позволяющая получить удовлетворительное соответствие рассчитанных с ее помощью данных с результатами других расчетов, а также опытными данными.*

**Ключевые слова:** адгезия, градиентная модель упругой среды, поверхностная энергия, энергия адгезии.

*The model of the elastic medium, which real electrical powers of particle interaction in near-surface layers are replaced by phenomenological inner elastic force, is offered. On the basis of this thesis, the calculation procedure of adhesive energy for materials a complicated chemistry and the structure is developed, which allow to obtain satisfactory fit of the estimated data with results of other calculations and just as development data.*

**Key words:** adhesion, gradient model of an elastic medium, surface energy, energy of adhesion.

### ВВЕДЕНИЕ

Расчет энергии адгезии твердых материалов сложного химического состава при минимальном количестве экспериментально определенных параметров является актуальной задачей ввиду широкого распространения тонкопленочных покрытий, сложных композитов, клеевых соединений в машиностроении и приборостроении.

Физическая природа адгезии – электрическое взаимодействие частиц составляющих контактирующие тела  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  (отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных атомных ядер) посредством создаваемых ими полей, установлена экспериментально [1] и обоснована теоретически [2]. Это послужило основой для создания теоретических методов расчета энергии адгезии твердых материалов разной физической природы [3, 4]. Эти методы опираются на утверждение о том, что энергия адгезии  $F_a$  двух полубесконечных тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  равна изменению их суммарной свободной энергии в изотермическом обратимом процессе вступления их в адгезионный контакт вдоль плоскости  $S_a$ , происходящий под единицей ее площади [5].

Каждое из тел  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  предполагается выделенным из бесконечной среды  $\Omega^{(1)}$  и  $\Omega^{(2)}$  соответственно. При выделении  $B^{(1)}$  из  $\Omega^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  из  $\Omega^{(2)}$  в них происходит изменение свободной энергии на величину  $F^{(k)}$ , где  $k = 1, 2$  – номер тела, под единицей площади их плоской границы  $S^{(k)}$ , так что сумма  $(F^{(1)} + F^{(2)})$  – суммарное изменение. Когда  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$ , после этого, вступают в состояние адгезии вдоль  $S_a = S^{(1)} = S^{(2)}$ , то происходят новые энергетические изменения. В результате в системе  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$  остается величина изменения свободной энергии равная  $F^{(1,2)}$  под каждой единицей площади  $S_a$ . Процесс энергетических изменений предполагается одномерным, зависящим только от глубины погружения в материал, отсчитываемой от  $S^{(1)}$ ,  $S^{(2)}$  и  $S_a$ , так что вдоль плоскостей, параллельных этим плоскостям состояние материала однородно.

В работе [2] считается, что изменения свободной энергии равны изменениям электрической энергии.

Методы расчета энергии адгезии опираются на идеи и вытекающие из них теоремы о том, что пространственное распределение взаимодействующих между собой отрицательных и положительных зарядов, а также внешних электрических полей, ввиду их потенциальности, а, следовательно, и свободной энергии, взаимосвязаны. Следовательно, изменение внешнего воздействия (удаление одной части тела от другой при выделении  $B^{(k)}$  из  $\Omega^{(k)}$  или замена удаленной части другой, состоящей из другого материала при вступлении  $B^{(1)}$  и  $B^{(2)}$  в состояние адгезии) приводит к изменению пространственного распределения как отрицательных зарядов – электронов, так и положительных – атомных ядер. Образование свободной поверхности  $S^{(k)}$  приводит, во-первых, к образованию около нее двойного электрического слоя, во-вторых – к деформации (в механическом понимании) поверхностного слоя. Методы, изложенные в [3] построены в предположении о том, что распределение положительных зарядов известно и совпадает с их объемным распределением. Т. е. изменения в расположении положительных зарядов поверхностного слоя при образовании свободной поверхности тел и при их адгезионном контакте, а значит деформации и другие механические эффекты, считаются несущественными при расчете энергии этих явлений. На самом деле образование свободной поверхности и адгезия сопровождаются перестройкой поверхностной структуры, изменением межатомного расстояния в приповерхностном слое, образованием микротрещин, связанном с реструктуризацией оборванных при образовании свободной поверхности межатомных связей, стремлением кристаллической решетки одного тела продолжать решетку другого, например, при эпитаксиальном наращивании пленки на поверхности основы [6, 7]. Кроме сказанного, несмотря на удовлетворительное соответствие расчетных значений поверхностной энергии, и ее экспериментальных значений [3] использование упомянутых выше теоретических методов затруднено в случаях рассмотрения материалов сложного химического состава – химических соединений, сплавов.

В данной работе предлагается отказаться от детального учета сил взаимодействия образующих среду частиц и перейти к феноменологическому описанию с использованием методов механики сплошной упругой среды. Тем более что подвергающиеся оценке величины – поверхностная энергия и энергия адгезии, являются интегральными, характеризующими среду безотносительно к ее структуре. При этом реальные потенциальные внутренние силы, действующие на расстоянии, заменяются на дальнодействующие потенциальные силы взаимодействия бесконечно малых частиц сплошной среды (нелокальная теория упругости). В этом случае отпадает необходимость детального учета характера и типа связей, возникающих между ядрами атомов или ионами, их взаимодействия со связанными и свободными электронами, а также взаимодействием электронов между собой. Вместе с тем возникает вопрос о полном учете всех тех энергетических изменений во взаимодействии частиц, которые сопровождают образование свободной поверхности и адгезию. В основе утверждения о положительности решения этого вопроса лежат следующие рассуждения.

### ТЕОРИИ АДГЕЗИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА УЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИХ ЧАСТИЦ

Также как и в модели "желе" [3] положительный и отрицательный заряды как до выделения тел  $B^{(k)}$  из соответствующей среды  $\Omega^{(k)}$ , так и после их выделения считаются распределенными по областям  $V_0^{(k)}$  и  $V_t^{(k)}$  соответственно занимаемых ими непрерывным образом. Геометрические точки областей  $V_0^{(k)}$  обозначаются их радиус-векторами  $\vec{r}^{(k)}$ , а областей  $V_t^{(k)}$  – радиус-векторами  $\vec{R}^{(k)}$ . Отображение  $V_0^{(k)} \rightarrow V_t^{(k)}$  взаимнооднозначно

осуществляется функцией  $\vec{R}^{(k)}(\vec{r}^{(k)}, t)$  или  $\vec{u}^{(k)} = \vec{R}^{(k)} - \vec{r}^{(k)}$ , где  $\vec{u}^{(k)}$  – вектор перемещения материальных частиц сплошной среды из отсчетного состояния в текущее состояние, т. е. наблюдаемое. В качестве отсчетного выбирается состояние  $B^{(k)}$  в составе  $\Omega^{(k)}$ , текущего: состояние  $B^{(k)}$  выделенное из  $\Omega^{(k)}$ , если подсчитывается поверхностная энергия; состояние  $B^{(k)}$  в составе  $B = B^{(j)} \cup B^{(k)}$  ( $j \neq k$ ), если подсчитывается энергия адгезии. Момент времени  $t = 0$  соответствует отсчетному состоянию,  $t > 0$  – текущему. Частица  $dB^{(k)}$  в момент  $t = 0$  имеющая положительный заряд, занимающая область  $dV_0^{(k)}$  с радиус-вектором центра  $\vec{r}_+^{(k)}$  к моменту  $t > 0$  занимает область  $dV_t^{(k)}$  с радиус-вектором центра  $\vec{R}_+^{(k)} = \vec{u}_+ + \vec{r}_+$ . При этом считается, что для среды в целом и положительных зарядов в частности:  $\vec{r} = \vec{r}_+$ ,  $\vec{R} = \vec{R}_+$ ,  $\vec{u} = \vec{u}_+$ .

Частица  $dB^{(k)}$  в момент  $t = 0$  имела и отрицательный заряд, который за время  $t$  может переместиться в положение  $\vec{R}_-^{(k)} = \vec{u}_- + \vec{r}_-$ , которое может не совпадать с  $\vec{R}_+$ , хотя при  $t = 0$ :  $\vec{r}_- = \vec{r} = \vec{r}_+$ . В результате к моменту времени  $t > 0$  в области  $V_t^{(k)}$  создаются распределения положительных и отрицательных зарядов, отличные от тех, которые соответствуют области  $V_0^{(k)}$ . Как отмечалось выше, это связано с тем, что изменилось внешнее электрическое поле, действующее со стороны дополнения  $C^{(k)} = \Omega^{(k)} \setminus B^{(k)}$ , оно исчезло. В случае адгезии это поле заменилось на поле другого материала.

Положительные заряды тела  $B^{(k)}$  после его выделения из  $\Omega^{(k)}$  в каждой  $\vec{R}^{(k)} \in V_t^{(k)}$  создают поле с потенциалом  $v = v(\vec{R}^{(k)})$ . Находясь в этом поле отрицательные заряды перестраиваются соответствующим образом. При этом плотность распределения отрицательного заряда  $n(\vec{R}^{(k)})$ , где  $n$  – число электронов в единице объема, однозначно определяется распределением  $v(\vec{R}^{(k)})$ . Для металлов при рассмотрении электронного газа во внешнем поле с заданным потенциалом  $v$  и гамильтонианом системы

$$H = T + V + U,$$

где  $T$ ,  $V$  и  $U$  – описывают соответственно кинетическую энергию системы, кулоновское взаимодействие электронов друг с другом и их взаимодействие с внешним полем.

Теорема Хоэнберга – Кона [3] показывает справедливость обратного утверждения:  $v(\vec{R}_+^{(k)})$  является однозначным функционалом распределения плотности электронного газа. Учитывая, что зависимость  $v = v(\vec{R}_+^{(k)})$  однозначно определяется распределением  $(\vec{R}_+^{(k)})$ , на основании этого можно утверждать, что распределение  $(\vec{R}_-^{(k)})$  однозначно зависит от  $(\vec{R}_+^{(k)})$ . В случае рассмотрения тела  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$  при обосновании аналогичного утверждения необходимо рассматривать распределение электронного газа и положительных зарядов составного тела. Далее допускаем, что утверждение об однозначности связи  $(\vec{R}_-^{(k)})$  с  $v$  и с  $(\vec{R}_+^{(k)})$  относится к упругим телам любой физической природы.

Пусть теперь тело  $B^{(k)}$  после выделения из  $\Omega^{(k)}$  изолировано от окружающей среды в том случае, что причин вызывающих изменение его свободной энергии нет, а температура остается постоянной. То же самое относится к телу  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$ . В этом случае вариация свободной энергии  $B^{(k)}$  (или  $B$  – во втором случае) при варьировании относительного

распределения положительных зарядов равна содержащейся в единице объема вариации его электрической энергии в этом процессе и равна нулю:

$$\begin{aligned} \partial F^{(k)} &= \int_{V_t^{(k)}} \partial \Phi^{(k)} dV^{(k)*} = \\ &= \int_{V_t^{(k)}} \left( \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{R}_+^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{R}_+^{(k)}) + \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{R}_-^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{R}_-^{(k)}) + \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{R}_\pm^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{R}_\pm^{(k)}) \right) dV_t^{(k)*} = \\ &= \int_{V_t^{(k)}} \left( \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_+^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{u}_+^{(k)}) + \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_-^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{u}_-^{(k)}) + \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_\pm^{(k)})} \cdot \delta (\Delta \vec{u}_\pm^{(k)}) \right) dV_t^{(k)*} = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

(аналогичная запись относится к объединенному телу  $B$ )

где  $w^{(k)}$  – объемная плотность изменения внутренней энергии упругих деформаций, которая рассчитывается путем решения соответствующих задач о напряженно-деформированном состоянии полубесконечного тела  $B^{(k)}$ , а также сопряженной задачи для тела  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$ , когда на границе контакта выполняется требование не только непрерывности поля перемещений, но и его дифференцируемости по координате, нормальной к поверхности контакта;

$\Delta \vec{u}_+^{(k)} = \vec{R}_+^{(k)} - \vec{R}_+^{(k)*}$ ,  $\vec{R}_+^{(k)}$  и  $\vec{R}_+^{(k)*}$  – радиус-векторы взаимодействующих положительных зарядов – относительные смещения положительных зарядов;

$\Delta \vec{u}_-^{(k)} = \vec{R}_-^{(k)} - \vec{R}_-^{(k)*}$ ,  $\vec{R}_-^{(k)}$  и  $\vec{R}_-^{(k)*}$  – радиус-векторы взаимодействующих отрицательных зарядов – относительные смещения отрицательных зарядов;

$\Delta \vec{u}_\pm^{(k)} = \vec{R}_\pm^{(k)} - \vec{R}_\pm^{(k)*}$  – относительные смещения положительных относительно отрицательных и наоборот зарядов.

В теле  $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$  смещения рассматриваются безотносительно к принадлежности заряда к  $B^{(1)}$  или к  $B^{(2)}$ . Кроме того, можно утверждать, что

$$\vec{f}_+^{(k)} = \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_+^{(k)})}, \quad \vec{f}_-^{(k)} = \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_-^{(k)})}, \quad \vec{f}_\pm^{(k)} = \frac{\partial w^{(k)}}{\partial (\Delta \vec{u}_\pm^{(k)})}, \quad (2)$$

где  $\vec{f}_+^{(k)}$ ,  $\vec{f}_-^{(k)}$  и  $\vec{f}_\pm^{(k)}$  – силы взаимодействия соответственно положительных, отрицательных и положительных с отрицательными и наоборот зарядов между собой в теле  $B^{(k)}$  (или  $B$ , если верхнего индекса  $(k)$  нет).

Следовательно, вариацию изменения внутренней энергии  $\delta F^{(k)}$  в изотермическом процессе можно рассматривать как работу внутренних электрических сил – сил взаимодействия зарядов между собой

$$\delta A^{(k)} = \delta F^{(k)}$$

Если учесть отмеченную выше взаимосвязь распределений  $\vec{R}_+^{(k)}$  и  $\vec{R}_-^{(k)}$ , то, опираясь на это можно говорить о зависимости распределений  $\Delta \vec{u}_-^{(k)}$ ,  $\Delta \vec{u}_\pm^{(k)}$  от  $\Delta \vec{u}_+^{(k)}$ .

Тогда выражение (1) преобразуется к виду:

$$\delta F^{(k)} = \left[ \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \bar{u}_+^{(k)})} + \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \bar{u}_-^{(k)})} \cdot \frac{\partial \Delta \bar{u}_-^{(k)}}{\partial (\Delta \bar{u}_+^{(k)})} + \frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial (\Delta \bar{u}_\pm^{(k)})} \cdot \frac{\partial \Delta \bar{u}_\pm^{(k)}}{\partial (\Delta \bar{u}_+^{(k)})} \right] \delta (\Delta \bar{u}_+^{(k)}). \quad (3)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой феноменологически вводимую внутреннюю упругую силу, действующую со стороны частицы  $dB_t^{(k)*}$  на частицу  $dB_t^{(k)}$  в момент времени  $t$ , поскольку они совершают работу на перемещениях материальных частиц, составляющих среду и исчезают вместе с исчезновением их относительных смещений. Таким образом, показано, что работа внутренних электрических сил может быть приравнена работе феноменологически вводимых упругих сил.

Соответствующая теория упругости построена и представлена в работе [8]. Она основана на следующих представлениях.

Механические свойства материала в любой части тела одни и те же. Возникновение особенностей вблизи границы является проявлением этих свойств, вызванных её присутствием. Поскольку однородное состояние материала возможно лишь на значительном удалении от границы в глубине тела, для исключения влияния границы допускается, что любое тело получается выделением из бесконечно протяжённой однородной среды. Также как и для реальной дискретной структуры твёрдого тела, для его континуального приближения допускается, что любые две бесконечно малые частицы взаимодействуют посредством потенциальных сил, находясь на любом относительном расстоянии. Потенциал взаимодействия пропорционален их объёмам. Он не является суммой потенциалов взаимодействия пар атомов, составляющих эти частицы, и нуждается в экспериментальном определении, а при построении теории считается известным.

Для относительного смещения двух бесконечно малых частиц среды считается справедливым представление в виде ряда Тейлора по внешним степеням радиус-вектора положения одной частицы относительно другой. Это позволяет перейти от нелокального описания напряженно-деформированного состояния к градиентному.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ

Для потенциала межчастичного взаимодействия предложено использовать двухпараметрическое выражение, являющееся аналогом потенциала Морзе. Параметры определяются на основании опытных данных для соответствующего материала. Этими данными являются значения модуля Юнга и среднее межатомное расстояние.

Опираясь на них, поверхностная энергия тела  $B^{(k)}$  вычисляется по формуле

$$W_p^{(k)} = \int_0^\infty w^{(k)}(x) dx. \quad (4)$$

Формула для расчета энергии адгезии имеет вид:

$$F_a = \frac{W_p^{(1)} W_p^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{W_p^{(1)} k^{(2)2} + W_p^{(2)} k^{(1)2}}; \quad k^{(j)} = \frac{v^{(j)}}{1 - v^{(j)}}, \quad (5)$$

где  $v^{(j)}$  – коэффициент Пуассона для материала тела с номером  $j$ .

Результаты расчета энергии адгезии на основании учета электрических взаимодействий и изменений упругих деформаций в рамках градиентной модели второго порядка представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Энергия адгезии для некоторых систем

| Состав системы | Энергия адгезии |                            |
|----------------|-----------------|----------------------------|
|                | по данным [4]   | расчет по теории упругости |
| <i>Cu – Al</i> | 2,75            | 2,262                      |
| <i>Cr – Fe</i> | 4,85            | 8,505                      |
| <i>Fe – Cu</i> | 4,00            | 3,180                      |

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод расчета энергии адгезии для материалов сложного химического состава и структуры. Теоретические расчеты энергии адгезии, произведенные различными методами близки по своим значениям и коррелируют между собой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел [Текст] / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. Л. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
2. Ландау, Л. Д. Статистическая физика [Текст] / Л. Д. Ландау, В. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – 477 с.
3. Паргеньский, М. Б. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности [Текст] / М. Б. Паргеньский. // Успехи физических наук, 1979. – Т. 128. – Вып. 1. – С. 69 – 106.
4. Вакилов, А. Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма [Текст] / А. Н. Вакилов, М. В. Мамонова, В. В. Прудников. // Физика твердого тела, 1997. – Т. 39. – № 6. – С. 964 – 967.
5. Физический энциклопедический словарь [Текст] / Гл. ред. А. М. Прохоров, 1984. – 944 с.
6. Горелик, С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. – М.: Металлургия, 1988. – 576 с.
7. Киселёв, В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках [Текст] / В. Ф. Киселев. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
8. Шоркин В. С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц [Текст] / В. С. Шоркин // Упругость и неупругость. Под ред. И. А. Кийко, Р.А. Васина, Г. Л. Бровко. – М.: Ленанд, 2006. – С. 271 – 282.

### Фроленкова Лариса Юрьевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"  
Тел. (4862) 41-98-44  
E-mail: Lara@ostu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ТЕЛ НА ПРОЦЕСС ИХ ДВИЖЕНИЯ ПО НАКЛОННЫМ ПЛОСКОСТЯМ

*В статье раскрыта физика начального и последующих этапов процесса движения трехосных деформированных тел по наклонным плоскостям. Составлена математическая модель такого процесса и осуществлено ее аналитическое решение. Получены обобщенные аналитические зависимости для расчета углов наклона плоскостей, при которых наступает самопроизвольное скатывание деформированных тел.*

**Ключевые слова:** бункера накопители, деформация эллипсоидных тел, гравитационное движение, начальный угол самопроизвольного движения тел.

*In this paper presents the physics of primary and subsequent stages of the process of the movement of elliptical deformational solids downhill. Make mathematical model of this process and put it analytical solution. Receive general analytical dependences for calculation of the angles of inclined plane in which spontaneous rolling of deformation solids begin.*

**Key words:** capacity for accumulation, deformation of elliptical solids, gravitation movement, primary angle of spontaneous movement of solids.

В настоящее время в машиностроительной, металлургической и строительной промышленности широко используются в производстве бункера-накопители. Эффективность их работы во многом определяется пропускной способностью, отсутствием зависания и повреждаемости тел при их гравитационном движении в бункерах-накопителях. Решение этих задач состоит в правильном раскрытии физических явлений и математическом описании физики процесса движения тел по наклонным поверхностям спусков-гасителей и выпусков бункеров-накопителей.

При выводе расчетных зависимостей рассматривается отдельное тело без учета его взаимодействия с другими телами. Это обосновывается тем, что впереди потока тел движутся отдельные тела, которые развивают большие скорости и повреждаются при ударе о преграду. Если обеспечить условия, исключающие повреждения этих тел, то тела основного потока, движущиеся также разрозненно, но с меньшими скоростями, чем первые, также не будут повреждаться. При этом тела могут иметь природную или вынужденную деформацию. Поэтому допускается отклонение формы сечения тела от формы правильного эллипса, путем учета его деформации, рисунок 1.

Поверхность тела формы трехосного эллипсоида описывается уравнением:

$$\frac{X^2}{b^2} + \frac{Y^2}{c^2} + \frac{Z^2}{a^2} = 1, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  - длина, ширина и толщина тела.

Принимается, что тело однородно по объему и его центр масс совпадает с геометрическим центром эллипсоидной поверхности, а оси симметрии направлены по его главным центральным осям инерции.

Рассмотрим процесс движения тел по жесткой, шероховатой, наклонной плоскости, которая является основным элементом в бункерах-накопителях, аппаратах спуска-гасителях и в других устройствах для загрузки и выгрузки тел. При этом допускается отклонение формы сечения тела от формы правильного эллипса, путем учета его деформации.

Для определения местонахождения тела на плоскости введем неподвижную систему координат  $\xi O'' \eta$ ; причем ось  $O'' \xi$  совпадает с заданным прямолинейным путем движения тела, ось  $O'' \eta$  перпендикулярна к наклонной плоскости;  $\alpha$  - произвольный угол наклона плоскости, по которой происходит движение.

Подвижная система координат  $XO'Y$  имеет начало в точке  $O'$ , являющейся центром масс.

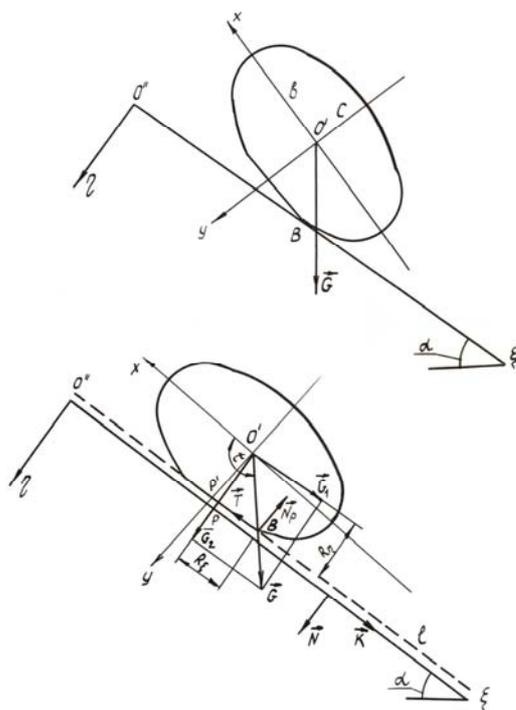


Рисунок 1– Процесс движения тела с учетом деформации

Вышеприведенный случай может быть сведен к условиям плоской задачи. Принимаем, что при движении тела по наклонной плоскости одна из его главных осей ( $O'Z$ ) остается горизонтальной и перпендикулярной направлению движения. В этом случае положение тела определяется положением его среднего сечения, которое имеет форму эллипса

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

Положение тела относительно плоскости можно выразить через радиус-вектор  $\vec{O'B}$  и его проекции на оси  $O''\eta$  и  $O''\xi$ . Обозначим радиус-вектор и его проекции соответственно  $\vec{R}, R_\eta, R_\xi$ .

Пусть в системе координат  $XO'Y$  точка касания тела с плоскостью –  $P(x_0, y_0)$ .

Тогда уравнение касательной оси  $O''\xi$  к эллипсу через эту точку в той же системе координат имеет вид

$$\frac{Xx_0}{b^2} + \frac{Yy_0}{c^2} = 1 \quad (3)$$

Нормальный вектор  $\vec{N}$  к касательной оси  $O''\xi$  имеет координаты

$$\vec{N} = \left( \frac{x_0}{b^2}, \frac{y_0}{c^2} \right) \quad (4)$$

Вектор  $\vec{K}$ , направленный по касательной оси  $O''\xi$ , имеет координаты

$$\vec{K} = \left( -\frac{y_0}{c^2}, \frac{x_0}{b^2} \right) \quad (5)$$

Отклонение формы сечения тела от формы эллипса, обусловленное его деформацией по оси  $c$  обозначим  $PP'$ . Проведем через  $P'$  такую прямую  $l$ , параллельную касательной оси  $O''\xi$ , для которой выполняется следующее условие

$$O'P' = n \cdot O'P, \quad (0 < n < 1) \quad (6)$$

Данная прямая  $l$  является линией контакта движения деформированной частью тела по плоскости. Координаты точки  $P'$  примут следующий вид

$$P' = (nx_0, ny_0) \quad (7)$$

Параметрическое уравнение прямой  $l$ :

$$X = nx_0 + XS_n. \quad (8)$$

$$Y = ny_0 + YS_n. \quad (9)$$

где  $x_0, y_0$  - координаты точки  $P$ ;  $X, Y$  - координаты вектора  $K$ ;  $S_n$  - переменный параметр.

Для нахождения точек пересечения прямой  $l$  с эллипсом воспользуемся уравнением сечения

$$\varphi'(X, Y)S_n^2 + 2S_n \left[ F'_x(nx_0, ny_0)X + F'_y(nx_0, ny_0)Y \right] + F'(nx_0, ny_0) = 1,$$

где  $F'$  - уравнение линии второго порядка;  $\varphi$  - члены второго в полиноме  $F'$ ;  $S_n$  - переменный параметр.

Так как  $P'$  лежит на диаметре, сопряженном с касательной осью  $O''\xi$ , то коэффициент при  $S_n$  равен 0. Поэтому получаем

$$S_n = \pm \sqrt{-\frac{F'(nx_0, ny_0)}{\varphi'(X, Y)}}$$

Координаты точки  $B(S_n > 0)$  с учетом (5)

$$S_n = -\frac{\frac{n^2 x_0^2}{b^2} + \frac{n^2 y_0^2}{c^2} - 1}{\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{c^2}} = cb\sqrt{1-n^2}. \quad (10)$$

После подстановки (10) в (8) и (9) и с учетом (5) координаты точки  $B$

$$X_B = nx_0 - y_0 \frac{b}{c} \sqrt{1-n^2} \quad (11)$$

$$Y_B = ny_0 - x_0 \frac{c}{b} \sqrt{1-n^2} \quad (12)$$

Проекция вектора  $O'\vec{B}$  на оси  $O''\xi$  и  $O''\eta$

$$R_\eta = O'\vec{B} \cdot \frac{\vec{N}}{|N|} = \left( nx_0 - y_0 \frac{b}{c} \sqrt{1-n^2}, ny_0 + x_0 \frac{c}{b} \sqrt{1-n^2} \right) \cdot \frac{\left( \frac{x_0}{b^2}, \frac{y_0}{c^2} \right)}{|N|} = \frac{n}{|N|}. \quad (13)$$

$$\begin{aligned} R_\xi &= O'\vec{B} \cdot \frac{\vec{K}}{|K|} = \left( nx_0 - y_0 \frac{b}{c} \sqrt{1-n^2}, ny_0 + x_0 \frac{c}{b} \sqrt{1-n^2} \right) \cdot \frac{\left( -\frac{y_0}{c^2}, \frac{x_0}{b^2} \right)}{|N|} = \\ &= nx_0 y_0 \left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{c^2} \right) \frac{1}{|N|} + cb\sqrt{1-n^2} \cdot |N|. \end{aligned} \quad (14)$$

Для нахождения уравнения движения тела в качестве параметра удобно использовать угол  $t$ , характеризующий положение точки касания на эллипсе. С помощью этого параметра вычислим координаты точки  $P$

$$x_0 = b \cdot \cos t \quad (15)$$

$$y_0 = c \cdot \sin t \quad (16)$$

После подстановки (15) и (16) в (13) и (14) получим

$$R_\eta = \frac{cbn}{\sqrt{b^2 \sin^2 t + c^2 \cos^2 t}} \quad (17)$$

$$R_\xi = \frac{n \cdot \cos t \cdot \sin t (c^2 - b^2)}{\sqrt{b^2 \sin^2 t + c^2 \cos^2 t}} + \sqrt{1 - n^2} \cdot \sqrt{b^2 \sin^2 t + c^2 \cos^2 t} \quad (18)$$

Получим зависимость, с помощью которой можно определить минимальный угол наклона плоскости  $\alpha$ , при котором начинается самопроизвольное движение тела.

Пусть в некоторый момент времени тело массой  $m$  занимает на наклонной плоскости положение, которое определяется координатами  $R_\xi$  и  $R_\eta$ , и углом  $\alpha$ . При этом на тело действуют сила тяжести  $\vec{G}$ , сила трения  $\vec{T}$ , сила нормальной реакции плоскости  $\vec{N}_P$ .

Качение тела начнется при условии

$$M_{\text{дв.}} \geq M_{\text{сопр.}}, \\ G \cdot \sin \alpha R_\eta \geq G \cdot \cos \alpha \cdot R_\xi.$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{R_\xi}{R_\eta}, \quad (0 < \alpha < 90^\circ) \quad (19)$$

Подставляя  $R_\xi$  и  $R_\eta$  из (17) и (18) в (19), получаем

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{n(c^2 - b^2) \cdot \frac{\sin 2t}{2} + \sqrt{1 - n^2} \cdot (b^2 \sin^2 t + c^2 \cos^2 t)}{bcn} \quad (20)$$

Для определения угла наклона плоскости, при котором наступает самопроизвольное движение тела, необходимо неравенство (20) исследовать на экстремум. Для этого найдем производную по углу поворота ( $t$ ) от неравенства (20) и приравняем ее нулю

$$\frac{1}{bcn} \left[ \frac{n(c^2 - b^2)}{2} \cos 2t \cdot 2 + \sqrt{1 - n^2} (b^2 \cdot 2 \cdot \sin t \cdot \cos t + c^2 \cdot 2 \cos t \cdot (-\sin t)) \right] = 0$$

Откуда

$$\frac{b^2 - c^2}{bcn} (-n \cdot \cos 2t + \sqrt{1 - n^2} \cdot \sin 2t) = 0$$

С учетом  $n = \cos \theta$ , получаем

$$\frac{b^2 - c^2}{bcn} (-\cos \theta \cdot \cos 2t + \sin t \cdot \sin 2t) = 0. \quad (21)$$

Откуда

$$\frac{c^2 - b^2}{bcn} \cdot \cos(\theta + 2t) = 0$$

Отсюда находим

$$2t = \frac{3\pi}{2} - \theta \quad (22)$$

Найдем вторую производную выражения (20)

$$(tg \alpha)'' = -2 \frac{c^2 - b^2}{bcn} \sin(\theta + 2t) \quad (23)$$

При подстановке выражения (22) в (23), вторая производная принимает отрицательное значение, следовательно, функция в исследуемой точке имеет максимум.

После преобразований получим

$$(\alpha_0)_{\max} \geq \arctg \frac{b^2 - c^2 + \sqrt{1 - n^2} \cdot (b^2 + c^2)}{2bcn} \quad (24)$$

Полученное аналитическое решение задачи имеет не только теоретическое, но и практическое значение, так как позволяет установить угол, при превышении которого наступает самопроизвольное качение тела под действием момента силы тяжести. Данное уравнение может быть использовано при проектировании аппаратов и устройств для снижения повреждаемости тел рабочими органами машин и обосновании и режимов работы этих органов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бермант, А.Ф. Краткий курс математического анализа [Текст] /А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. [Текст] – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432 с.
3. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики [Текст] /А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1987. – 430 с.
4. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов [Текст] – М.: Машиностроение, 1984. – 236 с.
5. Екимова Л.С. К расчёту скорости движения тел эллипсоидной формы по наклонной плоскости. – Депонированные научные труды (ВИНИТИ) [Текст] – М., 1984.– № 4.– 118 с.

### **Екимова Людмила Сергеевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика»

Тел. (4862) 41-98-89

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

# ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 621.9

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, А.В. ПОЛЯКОВ

## СТАТИКО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЫХ ЦИЛИНДРОВ

*Описаны схемы деформационного упрочнения внутренних и внешних цилиндрических поверхностей диаметром менее 100 мм статико-импульсной обработкой.*

**Ключевые слова:** дорнование, редуцирование, поверхностный слой, сталь, упрочнение ударом.

*Schemes of deformation hardening of internal and external cylindrical surfaces in diameter less than 100 mm are described by static-impulse processing.*

**Key words:** mandrelling, reduction, hardened case, steel, shock hardening.

Существует множество деталей машин типа гильз и втулок с рабочими и несущими цилиндрическими поверхностями малого диаметра (<100 мм): гидро- и пневмоцилиндры, кольца подшипников качения, поршневые пальцы и др., которые по общности конструктивно-технологических признаков объединяются в класс однотипных деталей полые цилиндры. Цилиндрические поверхности таких деталей имеют повышенные требования к параметрам качества поверхностного слоя, которые устанавливаются в зависимости от условий их эксплуатации.

Проблема повышения надежности и работоспособности деталей класса полые цилиндры является одной из важных и актуальных в машиностроении. Перспективно решение этой проблемы за счет привлечения технологических методов, обеспечения параметров качества поверхностного слоя на уровне, соответствующим максимальному повышению требуемой совокупности эксплуатационных свойств. Актуальным является разработка новых методов обработки, направленных на повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств.

Одним из прогрессивных видов обработки деталей класса полые цилиндры являются поверхностное пластическое деформирование (ППД). В результате ППД снижается шероховатость и создается поверхностный наклепанный слой со сжимающими остаточными напряжениями и повышенной твердостью. Способы ППД разделяются на статические и динамические. Наиболее изучены и широко применяются, для обработки полых цилиндров малого диаметра статические методы ППД: поверхностное дорнование и редуцирование. Недостаткам этих методов являются ограниченные возможности варьирования глубиной и степенью упрочнения поверхностного слоя.

Для упрочнения цилиндрических поверхностей деталей класса полые цилиндры предлагается использовать статико-импульсную обработку (СИО).

Статико-импульсная обработка является одним из эффективных способов ППД. Комбинированное статическое и динамическое нагружение очага деформации позволяет более полно использовать энергию ударного импульса. В процессе СИО плоских и сложнопрофильных поверхностей обеспечивается упрочненный поверхностный слой с большой глубиной  $h_{H\mu}$  и степенью упрочнения  $\Delta H_{\mu}$  (для стали 45 –  $h_{H\mu} = 6..7$  мм,  $\Delta H_{\mu} = 60\%$ ; для стали 110Г13Л –  $h_{H\mu} = 8..10$  мм,  $\Delta H_{\mu} = 150\%$ ) [2].

Предыдущие исследования [1] показали, что статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей позволяет более чем в два раза повысить производительность, в 2,2 раза уменьшить потребляемую мощность в сравнении с дорнованием, осуществляемым под статической нагрузкой.

В статье описываются схемы, позволяющие осуществлять статико-импульсную обработку деталей класса полые цилиндры с диаметрами обрабатываемых поверхностей менее 100 мм. Для обработки внутренних цилиндрических поверхностей предлагается схема статико-импульсного дорнования (СИД) (рисунок 1, а; б); для наружных поверхностей статико-импульсного редуцирования (СИР) (рисунок 1, в).

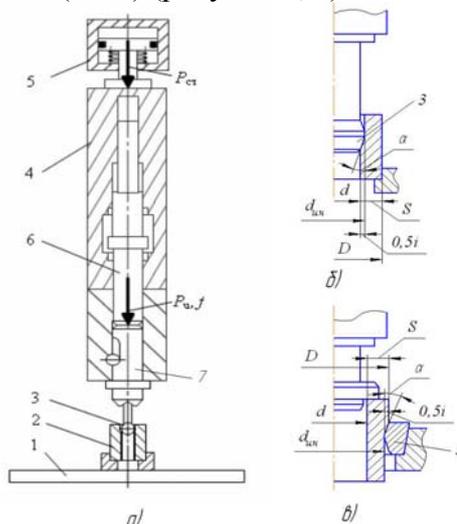


Рисунок 1 – Схемы упрочнения поверхностей втулок статико-импульсной обработкой  
а, б – дорнование; в – редуцирование

Схема нагружения при СИД (рисунок 1, а,б) аналогична дорнованию, отличие заключается в том, что основным деформирующим воздействием при СИД является импульсная динамическая нагрузка ( $P_u$ ), осуществляемая с определенной частотой ( $f$ ) генератором механических импульсов 4. При этом постоянное статическое поджатие ( $P_{ст}$ ) инструмента к упрочняемой поверхности, обеспечиваемое гидроцилиндром 5 позволяет более полно передавать энергию удара в очаг деформации. На рабочем столе 1 устанавливалась обрабатываемая деталь 2. Деформирующий элемент (шарик или дорн) 3, установленный на оправке волновода 7 генератора механических импульсов 5, подводился к обрабатываемой поверхности образца 2. Далее деформирующий элемент 3 статически поджимался к детали 2 гидроцилиндром 5 через корпус генератора механических импульсов 4. Под действием ударных импульсов генерируемых бойком 6 ударного устройства, деформирующий элемент 3 внедрялся в обрабатываемое отверстие детали и проходит его по всей длине.

Схема обработки наружных цилиндрических поверхностей статико-импульсного редуцировании аналогична СИД (рисунок 1, в). И отличается тем, что деформирующий инструмент – матрица 3, устанавливается на рабочем столе, а ударные импульсы от волновода 7 в процесс обработки проходят в очаг деформации через обрабатываемую деталь 2. Следовательно, размеры и материал детали будут влиять на амплитуду и длительность ударного импульса в очаге деформации, что необходимо учитывать, при разработке технологического операции СИР.

Технологическими параметрами процессов СИД и СИР являются:

- сила удара (энергия удара)  $P_u(A)$ ;
- частота ударов  $f$ ;
- натяг  $i$ ;
- толщина стенок обрабатываемой заготовки  $S$ ;
- угол заборного конуса  $\alpha$ ;

## **Технологии, оборудование и инструмент упрочняющей и отделочной обработки, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин**

Были проведены исследования влияния параметров СИД на показатели качества поверхностного слоя упрочненных отверстий. Использовали образцы из стали 45 со следующими размерами: длина образца 50 мм, внутренний диаметр  $d = 30$  мм, толщина стенки 4,5...16,5 мм. Исходная шероховатость  $Ra = 5...6,5$  мкм. Обработку проводили при натягах 0,3...1,7 мм, угле заборного конуса 3...12°, энергии ударов  $A = 160$  Дж, силе ударов  $P_u = 260$  кН силе статического поджатия  $P_{cm} = 40$  кН, частоте ударов  $f = 18$  Гц.

В результате установлено, что после СИД шероховатость отверстий снижалась до  $Ra = 0,054...1,5$  мкм. Глубина упрочненного слоя достигала 8 мм, причем глубина и степень упрочнения возрастала с увеличением толщины стенки и натяга. Увеличение угла заборного конуса с выше 6° приводило к тяжелым условиям прохождения инструмента, и возникал дефектный слой с высокой шероховатостью, что требует последующей механической обработки.

Исследованиями качества поверхностного слоя отверстий упрочненных СИД установлено, что обеспечиваемая шероховатость поверхности и глубина упрочнения позволяет использовать ее в процессе изготовления деталей в качестве упрочняющей, формообразующей и отделочно-упрочняющей обработки операций.

В результате проведенных исследований установлено, что СИД может быть получен поверхностный слой:

- с большой глубиной слоя и большой степенью упрочнения («глубокая» статико – импульсная обработка – ГСИО);
- с большой степенью упрочнения, малой глубиной и низкой шероховатостью упрочненной поверхности (отделочно-упрочняющая статико – импульсная обработка – ОУСИО).

После ГСИО, обеспечивающей глубину упрочненного слоя до 4...8 мм, желательна последующая чистовая абразивная или механическая обработка для обеспечения заданной точности и снижения шероховатости (тонкое или чистовое точение, фрезерование). Большая глубина упрочненного СИО слоя позволяет выбирать величину припуска на механическую обработку для «сырых» сталей до 1...2 мм, а термообработанных – до 0,5 мм. При использовании в качестве заготовок труб в качестве операции очищающей «черную» поверхность перед ГСИО может использоваться травление обрабатываемой поверхности.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Киричек, А.В. Статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей [Текст] / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004. - № 3 С.16-17.
2. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст]. / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

#### **Киричек Андрей Викторович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, директор Технологического Института ОрелГТУ, профессор  
Тел. (4862) 54-15-03  
E-mail: avk@ostu.ru

#### **Соловьев Дмитрий Львович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Тел. (4862) 54-15-03  
E-mail: murstin@yandex.ru

#### **Поляков Алексей Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Ассистент кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Тел. (4862) 54-15-03  
E-mail: polyakov\_aleksei@list.ru

А.В. ПЕЧАГИН, В.П. СМОЛЕНЦЕВ, А.И. НАЙДЕНОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

*В работе исследован метод импульсной магнитной стабилизации формы сборных корпусных деталей, получаемых сваркой из стандартных профилей. Разработаны технологические режимы, рекомендации по проектированию технологических процессов применительно к корпусным деталям оборудования. Показаны возможности электроимпульсной стабилизации по обеспечению точности сварных изделий в течение гарантированного срока их эксплуатации. Применение исследованного метода позволяет снизить потребность в крупногабаритном термическом оборудовании, сокращает производственный цикл выпуска изделий, дает большую экономию тепловой энергии.*

**Ключевые слова:** машиностроение, металлообработка, импульсная магнитная стабилизация, электроимпульсная стабилизация, деталь.

*The article covers the method of magnetic-impulse stabilization of shapes of body assemblies produced by standard section welding. Operating practices and instructions on designing of manufacturing processes relating to the equipment body parts are developed. Electro-impulse stabilization capabilities to assure accuracy of welded products during their guaranteed operating life are shown. Application of the examined method allows to reduce demand in large dimension heat-treatment equipment, decrease the production cycle of product release, and provide significant thermal energy saving.*

**Key words:** engineering, metal working, pulsed magnetic stabilization, electropulse stabilization, part.

При изготовлении оборудования часто используется система индивидуальных заказов, при которой применение литых базовых корпусных деталей (станин, стоек и др.) становится нерентабельным. Эти детали пытаются заменить сборными сварными конструкциями из стандартных профилей. Такие исследования в течение ряда лет проводились на станкостроительных заводах и в подразделениях крупных машиностроительных фирм, выпускающих для своих нужд нестандартное оборудование. Подобный опыт имеется также у станкостроителей зарубежных стран, где сварные станины в течение длительного времени проходят старение в процессе хранения. В этот период происходит перераспределение внутренних напряжений, стабилизируются форма и размеры сварных узлов. Однако такой способ не нашел распространения при выпуске малых партий оборудования и оснастки по индивидуальным заказам, т.к. сроки поставок заказчику изделий значительно меньше, чем период естественного старения сварных конструкций. Нормализация и отжиг таких изделий в сборке давали положительный эффект, но большинство станкостроительных заводов не имело оборудования для термообработки крупногабаритных сборных узлов. Без этого корпусные детали коробились, что нарушало качество и работоспособность оборудования, особенно крупногабаритного.

На рисунке 1 приведены результаты замеров точности сварных станин шлифовальных станков с размером стола 1000 мм. Гарантийный срок безотказной работы такого оборудования составлял 2 года.

Попытки стабилизировать внутренние напряжения виброударной обработкой не дали положительно результата из-за вторичного перераспределения сил в сложных сварных конструкциях, хотя по [1] известно, что на образцах получено выравнивание напряжений до уровня, обеспечивающего стабильную геометрию изделий. Природа импульсных механических воздействий при упрочнении близка к механизму магнитной стабилизации формы изделий. В отличие от термической обработки (отжига, нормализации) при импульсной магнитной обработке не требуется крупных печей (размеры сварных корпусов могут достигать десятков метров), резко снижаются энергозатраты на нагрев изделий.

Последнее подтверждается установленной мощностью оборудования: для нормализации сварных конструкций требуется до 500 кВт; в случае использования магнитоимпульсных установок – до 60кВт (модель 4042). При этом крупногабаритные детали размещаются на столе установки или перемещаются относительно индуктора (длина обрабатываемых изделий не ограничена).

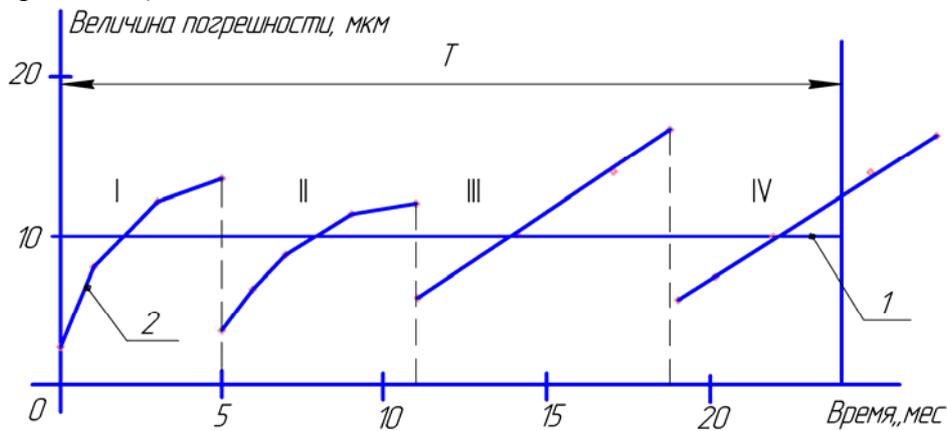


Рисунок 1 – Изменение погрешности направляющих плоско-шлифовального станка со сварной станиной  
1 – норматив точности; 2 – изменение погрешности;  
I-IV – межремонтный период; T – гарантийный срок работы оборудования

Для расчета технологических режимов магнитоимпульсной обработки используется энергетический подход [2], учитывающий баланс энергии между внешним воздействием и внутренними процессами, вызывающими перераспределение остаточных напряжений до их выравнивания по сечениям изделия. В зависимости от формы сварной конструкции и материала сборочных единиц процесс стабилизации включает этапы:

– подвод магнитной энергии в место импульса. На выпускаемых установках величина энергии достигает 20 кДж. Для получения качественной детали требуется использовать расчетные режимы (напряжение, емкость конденсаторов, частоту следования импульсов, амплитуду, зазор между рабочей поверхностью индуктора и изделием);

– расчет локальной мощности энергии, поступившей на участки изделия с различной геометрией и материалом деталей, входящих в соединение. В первом приближении перераспределение подводимой в импульсе энергии происходит обратно пропорционально расстояниям индуктора до участков конструкции. При этом учитывают только ту часть энергии, которая в состоянии произвести работу по образованию колебаний элемента детали. Остальная энергия теряется на нагрев индуктора, воздушной среды, изделия, что снижает [3] коэффициент использования процесса до 40% и ниже (до 10 %). С учетом такого коэффициента можно расчетным путем установить резонансные частоты и соответствующие им амплитуды колебаний рассматриваемого участка. Расчет выполняется с учетом граничных условий, учитывающих получение наибольшей амплитуды колебаний участка без превышения предела прочности на растяжение (для вязких сплавов) или сжатия (для хрупких материалов). По величине локальной мощности можно установить технологическую скорость перемещения участков изделия относительно индуктора, что позволяет значительно сократить время обработки и избежать появления импульсных напряжений, вызывающих повреждение объекта стабилизации;

– оценку эффективности и времени, необходимого для осуществления структурных преобразований и желаемого перераспределения внутренних напряжений после импульсных воздействий. Эксперименты (рисунок 2) показали, что внешние проявления преобразований в форме деформаций происходят в течение десятков минут и могут существенно изменить геометрию сборочных единиц. Поскольку корпусные детали перед сборкой проходят окончательную обработку, то целесообразно назначить незначительный (в пределах

нескольких часов) период естественного старения между окончанием стабилизации и началом финишных механических операций, в процессе которого погрешность контактных поверхностей при сборке снижается до нескольких микрон (зависит от возможностей обрабатывающего оборудования).

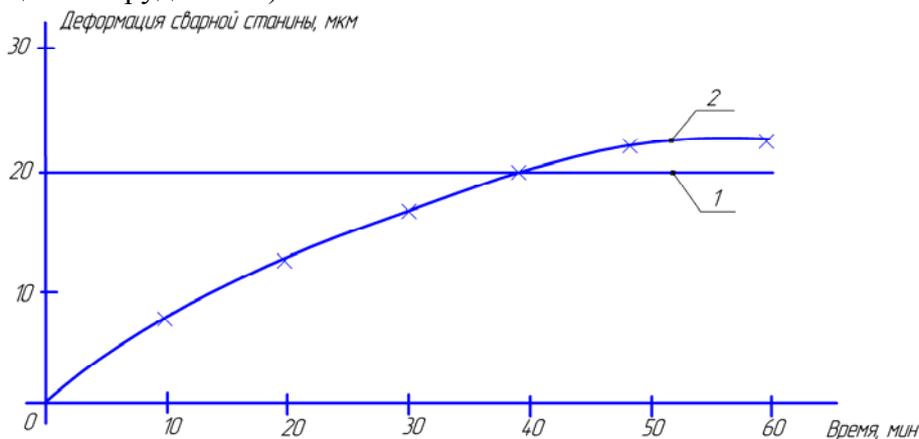


Рисунок 2 – Деформация сварной станины после стабилизации  
1 – допуск на геометрию станины; 2 – величина деформации

Из [3] емкость конденсаторов ( $C$ ) установки зависит от толщины изделия ( $h$ ) в месте воздействия импульса.

$$C \leq \frac{h^4}{0,25L\chi^2\mu^2}, \quad (1)$$

где  $L$  - индуктивность разрядной цепи установки (рисунок 3);  $\chi$  - удельная проводимость материала изделия;  $\mu$  - магнитная постоянная материала изделия.

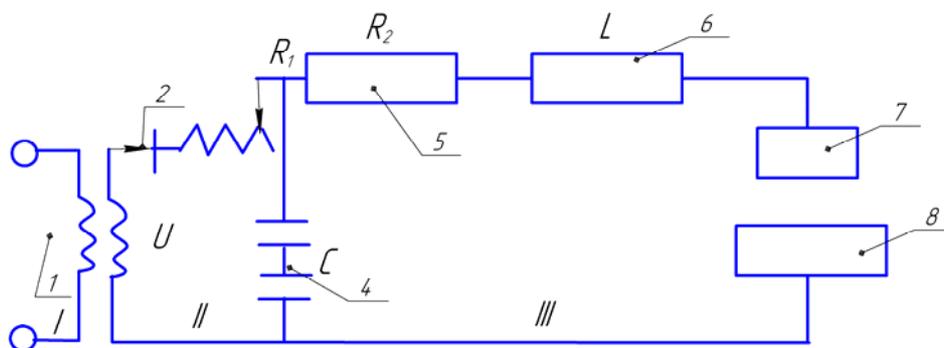


Рисунок 3 – Принципиальная схема электромагнитного процесса  
I – внешняя сеть; II – генератор; III – контур разрядной цепи  
1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3,4 – сопротивление  $R_1$  и емкость  $C$  генератора;  
5 – эквивалентное активное сопротивление разрядной цепи;  
6 – индуктивность разрядной цепи; 7 – индуктор; 8 – обрабатываемое изделие

Толщина изделия является величиной переменной, поэтому необходимо управление режимами в зависимости от места действия импульса на участок изделия.

Величины  $\chi, \mu$  - зависят от материала, его состояния, но для технологических расчетов они могут быть приняты постоянными (справочные данные).

Емкость конденсаторов генератора (рисунок 3) бывает не ниже 100 мкФ, что соответствует рекомендациям, приведенным в [3].

Индуктивность ( $L$ ) по [3]:

$$L = \frac{R_2^2 C}{4}, \quad (2)$$

где  $R$  - суммарное эквивалентное сопротивление разрядной цепи.

Расчет индуктивности возможен численными методами, но практически принимают её величину постоянной (в созданных установках  $L \approx 1 \text{ МкГн}$ ). При этом изменение зазора между индуктором и изделием должно быть в пределах 0,5-1,5 мм.

Расчетное значение емкости ( $C$ ) округляется до величины, имеющейся в установке, в сторону снижения.

Напряжение ( $U$ ) в индукторе и изделия определяют по [3]:

$$U = \sqrt{\frac{\sigma_M L}{0,12 \mu_0 (k_H \cdot N)^2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_M$  - максимальное напряжение в поверхностном слое изделия при действии импульса;  $\mu_0$  - магнитная постоянная передаточной среды. (при стабилизации изделий на воздухе  $\mu_0 = 12 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ );  $k_H$  - постоянная напряженности магнитного поля на стороне изделия со стороны индуктора;  $N$  - число витков обмотки индуктора (выбирается конструктивно), например, по [3].

Граничным условием при расчете напряжений служит сохранность материала изделия, т.е.

$$\sigma_M \leq \sigma_T, \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала изделия до начала трещинообразования (справочный материал).

Тогда для расчета напряжения ( $U$ ) формула (3) имеет вид:

$$U = \sqrt{\frac{\sigma_T L}{0,12 \mu_0 (k_H \cdot N)^2}}, \quad (5)$$

Предельное напряжение ограничено значением пробоя ( $U_{np}$ ) зазора между индуктором и изделием

$$U_{np} \geq U, \quad (6)$$

Диапазон изменения напряжения  $U = (1-4)^3 \text{ В}$ .

Для увеличения электромагнитных сил необходимо повысить напряженность магнитного поля на поверхности изделия. Для этого требуется в начале импульса создать крутой фронт волны, что возможно только при большой силе разрядного тока, величина которого рассчитывается по зависимости

$$J_{\max} \leq 0,5 \cdot U_{np} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (7)$$

Для достижения  $J_{\max}$  следует приблизить напряжение (5) к предельному значению или повысить емкость конденсаторов генератора (рисунок 3). Кроме того сила среднего тока ( $J_{cp}$ ) является средством контроля стабильности режима обработки. Ориентировочно можно принять

$$J_{cp} \approx 0,5 J_{\max}, \quad (8)$$

Мощность магнитного воздействия формируется в зависимости от силы тока ( $J$ ) в импульсе (рисунок 4). Наибольшее значение мощности ( $P$ ) достигается во время первого полупериода (0,5  $T$  на рисунке 4). Таким образом для стабилизации геометрии изделия необходимо использовать половину первого импульса, дающего наибольшую мощность. Все последующие показатели мощности (рисунок 4) значительно ниже и, как правило, далее импульсы быстро затухают, не давая положительного эффекта. Чем меньше сопротивление  $R_2$  (рисунок 3), тем более крутой фронт имеет волна и тем больше мгновенная мощность импульса. Из [3]

$$R_2 = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (9)$$

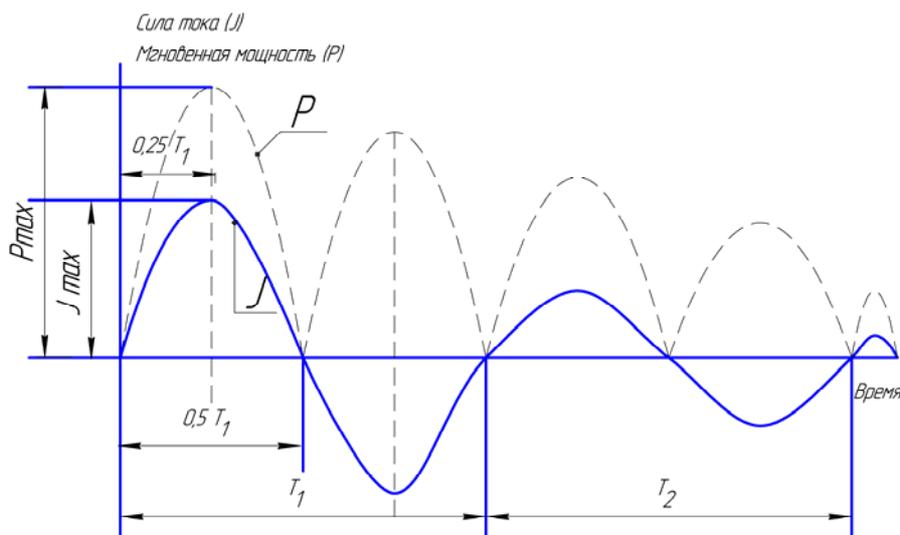


Рисунок 4 – Изменение силы тока и мгновенной мощности при затухающем воздействии импульса ( $T_1, T_2$  – периоды колебаний)

Изменить величину индуктивности в процессе эксплуатации установки как правило не удастся, поэтому в (9) стремятся повысить емкость "С".

Тепловое действие импульсов учитывают только при высокой частоте их следования, когда энергия магнитных воздействий не успевает рассеиваться в воздушную среду.

Частота ( $\nu$ ) следования импульсов зависит от их периода и числа периодов до затухания. Частота находится по зависимости:

$$\nu = \frac{1}{R_2 C \lg \frac{U_0}{U_0 - U_{np}}}, \quad (10)$$

где  $U_0$  – напряжение на электродах генератора. Из [3]  $U_{np} \approx 0,7U_0$ .

Тогда частота может быть приближенно найдена:

$$\nu = 0,837 \frac{1}{R_2 C}, \quad (11)$$

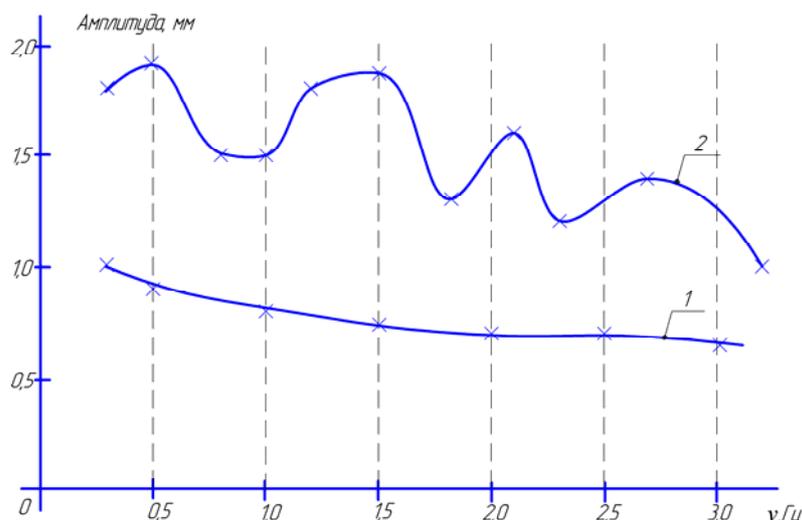
С учетом скважности импульсов их частота составляет 0,5-2 Гц.

Для обработки используют резонансные режимы, в которых частота изменяется в зависимости от формы изделия, режимов протекания процесса, места расположения опор. Для неплоских деталей используют концентраторы магнитной энергии, представляющие с одной стороны зеркальное отображение обрабатываемой поверхности изделия, а с другой – плоскость. Между концентратором и деталью устанавливается зазор 0,5-1,5 мм с погрешностью не более 0,3мм.

Установки оснащены датчиками вибраций, каждый из которых дает сигнал об амплитудах в зоне нахождения индуктора. Для каждого положения индуктора микропроцессор определяет резонансную частоту и на ней выполняется стабилизация изделия.

Управление частотой следования импульсов производят изменениями напряжения по (10). В зависимости от расположения индуктора (одного ли нескольких) формируются резонансные пики, отражающие колебания отдельных частей или всего изделия (рисунок 5).

Как видно из рисунка 5 резонансные явления при малой энергии импульса (зависимость 1) практически не проявляются даже для простой формы изделия с невысокой жесткостью. Для такого случая изделия (лист) размещают на опоры, которые расположены на расстоянии примерно 0,22-0,25 длины от кромки. При этом наблюдается значительный прогиб изделия до начала стабилизации.



**Рисунок 5 – Изменение амплитуды колебаний изделий  
в зависимости от частоты**

**1 – пластина малой жесткости (энергия импульса 5 кДж);  
2 – сложная сварная корпусная деталь (энергия импульса 12 кДж)**

Корпусную деталь сложной формы (кривая 2 на рисунке 5) устанавливают на основные и вспомогательные опоры, размещенные вблизи узлов колебаний. Подачу импульсов выполняют с частотами, соответствующими местным экстремальным значениям амплитуд. Общее число импульсов, подаваемых на каждый участок изделия, изменяется от 15 до 30 и назначается по результатам измерения положения участков изделия.

Проведен большой объем экспериментальных исследований, подтвердивших возможность стабилизации сварных деталей [4].

Полученные результаты сведены в таблицу (изменение размеров через три месяца после изготовления и сборки станка).

| Наименование изделия, материал       | Габариты          | Режимы       |             |                      | Результат                           |                                       |
|--------------------------------------|-------------------|--------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                      |                   | энергия, кДж | частота, Гц | время обработки, мин | изменение размеров без стабилизации | изменение размеров после стабилизации |
| Стойка сварная из стальных профилей  | 2800x1380<br>x560 | 8            | 1-2         | 12                   | 0,2                                 | 0,01                                  |
| Станина сварная из стальных профилей | 6770x790<br>x710  | 17           | 0,5-1       | 18                   | 0,8                                 | 0,02                                  |
| Балка сварная из листа и профиля     | 1140x1090<br>x415 | 11           | 1-1,5       | 15                   | 0,6                                 | 0,02                                  |
| Стол сварной (лист и профиль)        | 3200x630<br>x313  | 10           | 1           | 10                   | 0,15                                | 0,01                                  |
| Каретка стальная, сварная            | 895x780<br>x282   | 12           | 1,5         | 12                   | 0,3                                 | 0,02                                  |

Допуск на базовые детали оборудования составляют 10-20 мкм. Из таблицы видно, что деформация изделий в течение трех месяцев без стабилизации на порядок и более превышает допустимую. Те же изделия, прошедшие стабилизацию на магнитоимпульсной установке, сохранили геометрию в заданных пределах. При этом для них не понадобилась последующая чистовая обработка, т.к. припуск после стабилизации снизился до 0,05-0,1мм и достаточно стало перед сборкой выполнить шабрение или полировку, а в ряде случаев полностью исключить обработку перед сборкой и в процессе соединения деталей.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев // Ростов н/Д: ДГТУ, 2008. – 694 с.
2. Щипачев А.М. Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя / А.М. Щипачев, В.С. Мухин // Изв. вузов. Авиационная техника, 1999, №3. – С. 23-25
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т., Т2 / Под ред. В.П. Смоленцева // М.: Высш.шк., 1983. – 208 с.
4. Технологический процесс стабилизации геометрии базовых чугунных отливок. Технический отчет ВНИИЛИТ МАШ. Харьков, 1973.– 42 с.

### **Печагин Александр Петрович**

инженер Воронежского механического завода

### **Смоленцев Владислав Павлович**

д.т.н., профессор Воронежского государственного технического университета,  
заслуженный изобретатель РФ, заслуженный работник ВШ РФ, Лауреат премии Правительства РФ  
Тел. 89036559970  
E-mail: [smol@comch.ru](mailto:smol@comch.ru)

### **Найденов Алексей Иванович**

заместитель генерального директора ЗАО "ОКБМ"

М.Л. СТОРУБЛЕВ, А.Г. ИВАХНЕНКО

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Описан процесс управления качеством нанесения гальванических покрытий. Для построения математических моделей процесса нанесения гальванических покрытий предлагается использовать инструменты теории чувствительности. Представлено выражение для определения потерь качества. Выполнено моделирование процесса электролитического хромирования, определены управляющие параметры и назначены допуски на параметры процесса.*

**Ключевые слова:** машиностроение, металлообработка, гальваническое покрытие, теория чувствительности, электролитическое хромирование.

*Managerial process by quality of drawing of galvanic coverings is described. For construction of mathematical models of process of drawing of galvanic coverings it is offered to use tools of the theory of sensitivity. Expression for definition of losses of quality is submitted. Modelling process electrolyte-let chromium plating is executed, managing parameters are determined and admissions are appointed to parameters of process.*

**Key words:** engineering, metal working, electroplate carpet, theory responsivity, electrolytic chromizing.

В настоящее время в машиностроении для восстановления изношенных деталей, защиты деталей от коррозии, для повышения их износостойкости, поверхностной твердости и т.п. широко используются гальванические покрытия. К качеству гальванических покрытий предъявляется ряд требований и одним из основных показателей качества покрытий является их толщина [1]. Значения толщины гальванических покрытий должны находиться в пределах установленного допуска (двухсторонний допуск), либо быть не менее установленного значения (односторонний допуск). В первом случае получают так называемую «размерную деталь», требования к точности изготовления которой являются более жесткими, так как от полученного размера зависит способность, как самой детали, так и всего изделия выполнять свое служебное назначение. Во втором случае получением заданной толщины стремятся обеспечить защитные свойства, поверхностную твердость, износостойкость детали и т.д. [1-5].

В соответствии с традиционным представлением о качестве все изделия являются в равной степени качественными, если их показатели качества находятся в пределах допуска, т.е. внутри зоны допуска потери качества равны нулю. Но, на основании функции потери качества Тагути [6], с удалением значения показателя качества изделия от номинального значения, причем в любую сторону, качество изделия снижается, в том числе и в пределах допуска. Всякое отклонение показателя качества от номинального значения сопряжено с той или иной потерей качества изделия. Выражение для определения функции потерь качества имеет вид:

$$L(y) = c(y - y_0)^2 \quad (1)$$

где  $y$  – текущее значение показателя качества;  $y_0$  – номинальное значение показателя качества;  $c$  – коэффициент, характеризующий денежный эквивалент.

Так как процесс нанесения гальванических покрытий связан с расходом дорогостоящих (цинк, кадмий, хром и т.д.), а также драгоценных металлов (серебро, золото), то стремятся получить покрытия, значение толщины которых находилось бы в пределах допуска, но как можно ближе к нижней границе допуска, что соответствует минимальным потерям качества при одностороннем допуске. В этом случае номинальное значение будет совпадать с нижней границей поля допуска.

На Курском ОАО «Прибор» были выполнены экспериментальные исследования процесса электролитического хромирования, единичным показателем качества которого является толщина полученного слоя. На основании данных литературных источников [2-5], а

также мнения экспертов предприятия были установлены параметры, влияющие на толщину покрытий при хромировании (входы технологического процесса):  $x_1$  – концентрация хромового ангидрида ( $CrO_3$ , г/л);  $x_2$  – концентрация серной кислоты ( $H_2SO_4$ , г/л);  $x_3$  – температура электролита ( $t$ , °С);  $x_4$  – катодная плотность тока ( $D_k$ , А/дм<sup>2</sup>);  $x_5$  – время протекания процесса ( $\tau$ , мин). Выходом технологического процесса является  $y$  – среднее значение толщины хромового покрытия ( $\delta_{cp}$ ), мкм.

При построении математической модели для оценки степени влияния входных параметров на толщину хромового покрытия использованы инструменты теории чувствительности [7]. Количественно степень влияния оценивается с помощью коэффициентов чувствительности, которые являются частными производными выходного параметра по входным параметрам. Так как зависимость величины толщины покрытия от перечисленных входных параметров в явном виде не установлена, то коэффициенты чувствительности определялись как отношение изменения толщины покрытия к изменению соответствующего параметра.

При количестве входных параметров  $n=5$ , для определения коэффициентов чувствительности необходимо составить и решить систему из  $n$  уравнений, для чего было проведено  $n+1$  измерений. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений толщины покрытия и входных параметров при хромировании

| № измерения | $CrO_3$ , г/л | $H_2SO_4$ , г/л | $t$ , °С | $D_k$ , А/дм <sup>2</sup> | $\tau$ , мин | $\delta_{cp}$ , мкм |
|-------------|---------------|-----------------|----------|---------------------------|--------------|---------------------|
| 1           | 194,8         | 2,0             | 50       | 19,8                      | 40           | 7,2                 |
| 2           | 194,8         | 2,0             | 45       | 20,2                      | 30           | 6,3                 |
| 3           | 194,8         | 2,0             | 51       | 24,0                      | 40           | 11,6                |
| 4           | 238,1         | 2,0             | 50       | 19,2                      | 40           | 5,6                 |
| 5           | 238,1         | 2,5             | 45       | 20,4                      | 30           | 6,1                 |
| 6           | 238,1         | 2,5             | 55       | 22,2                      | 30           | 6,6                 |

Значение толщины покрытия ( $\delta_{cp}$ ) определялось как среднее арифметическое значений, измеренных в 10 точках. Для снижения влияния «краевого эффекта» на точность измерения, точки, в которых проводились измерения толщины, располагались на расстоянии не менее 10 мм от краев деталей, отверстий, выступов (рис.). Для измерения толщины покрытия использовался прибор «КОНСТАНТА К5» производства ЗАО «Константа» г. Санкт-Петербург. Отклонения в величине катодной плотности тока при обработке каждой детали не превышали  $\pm 5\%$  от заданной, а значения температуры – не более  $\pm 2$  °С.

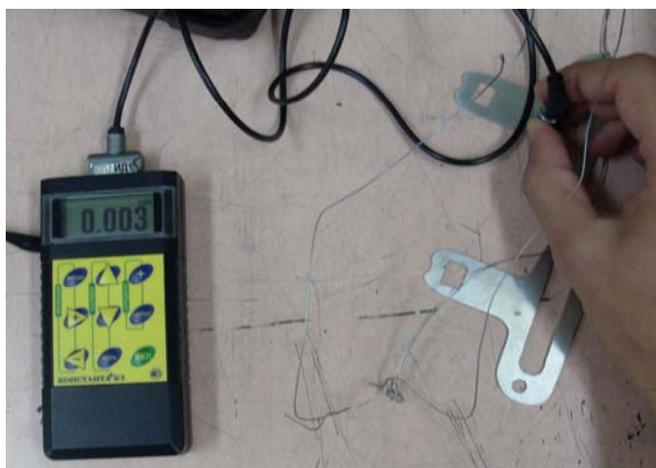


Рисунок 1 – Измерение толщины хромового покрытия

После проведения измерений значений установленных параметров и толщины покрытия были определены значения размахов (приращений) входных параметров и показателя качества, как разница между их значениями для двух последовательных измерений (далее пара измерений):

$$\Delta x_{ij} = x_{ij+1} - x_{ij}, \quad (2)$$

$$\Delta y_j = y_{j+1} - y_j, \quad (3)$$

где  $\Delta y_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) – значения размахов толщины покрытия в  $j$ -ой паре измерений;  $\Delta x_{ij}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – значения размахов  $i$ -ого параметра в  $j$ -ой паре измерений.

Значения коэффициентов чувствительности определяются из решения системы линейных уравнений

$$\Delta X T = \Delta Y, \quad (4)$$

где  $\Delta X$  – матрица ( $n \times n$ ) значений размахов входных параметров в измерениях;  $\Delta Y$  – вектор-столбец ( $n$ ) значений размахов толщины покрытия;  $T$  – вектор-столбец ( $n$ ) коэффициентов чувствительности.

После решения системы уравнений (4) в которой были использованы экспериментальные данные, представленные в таблице 1, получена зависимость величины размаха толщины хромового покрытия от величин размахов входных параметров

$$\Delta \delta_{cp} = -0,022 \Delta C_{CrO_3} + 1,069 \Delta C_{H_2SO_4} - 0,145 \Delta t + 1,082 \Delta D_k + 0,206 \Delta \tau. \quad (5)$$

Из полученного выражения следует, что увеличение толщины хромового покрытия связано: с повышением концентрации серной кислоты и катодной плотности тока; с понижением температуры и концентрации хромового ангидрида; с увеличением продолжительности процесса хромирования.

В процессе нанесения покрытий снижение концентрации хромового ангидрида, удельный расход которого превышает удельный расход серной кислоты, происходит быстрее, чем серной кислоты. Для получения качественного покрытия необходимо поддерживать отношение концентраций  $CrO_3 : H_2SO_4 \sim 100$  [2-4]. Но на практике возможны колебания этого отношения в пределах  $85 \div 115$ , что позволяет проводить корректировку ванны с периодичностью  $2 \div 3$  раза в месяц, при этом возможно снижение скорости осаждения. В соответствии с выражением (5) периодически снижая катодную плотность тока, можно компенсировать увеличение толщины покрытия, происходящее из-за снижения концентрации хромового ангидрида, обеспечивая получение требуемого значения толщины покрытия за один и тот же интервал времени. При корректировке ванны необходимо контролировать концентрацию обоих компонентов и устанавливать отношение концентраций  $\sim 100$ .

Толщина полученного слоя покрытия зависит от времени протекания процесса, поэтому даже при медленной скорости процесса осаждения хрома можно получить заданную толщину, затратив при этом большее количество времени и электроэнергии, что связано с увеличением затрат. Средняя скорость осаждения покрытия ( $v_{cp}$ ) – выход процесса является отношением значения толщины хромового покрытия к времени, за которое оно было нанесено. Отметим, что скорость осаждения не является показателем качества гальванических покрытий, а характеризует сам процесс их нанесения. Скорость осаждения зависит от концентрации хромового ангидрида ( $CrO_3$ , г/л), концентрации серной кислоты ( $H_2SO_4$ , г/л), температуры электролита ( $t$ , °C), катодной плотности тока ( $D_k$ , А/дм<sup>2</sup>). В таблице 2 представлены данные, связывающие входные параметры со скоростью осаждения покрытий.

После решения системы уравнений (4) с использованием данных таблицы 2, где вектор-столбец  $\Delta Y$  вместо значений размахов толщины покрытия представлял собой значения размахов средней скорости осаждения покрытия, была получена зависимость величины размаха скорости осаждения покрытия от величин размахов входных параметров

$$\Delta v_{cp} = -0,00037\Delta C_{CrO_3} + 0,02261\Delta C_{H_2SO_4} - 0,003835\Delta t + 0,02712\Delta D_k. \quad (6)$$

Таблица 2 – Значения входных параметров и скорости осаждения покрытия при хромировании

| № измерения | CrO <sub>3</sub> , г/л | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , г/л | t, °C | D <sub>k</sub> , А/дм <sup>2</sup> | v <sub>cp</sub> , мкм/мин |
|-------------|------------------------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|---------------------------|
| 1           | 194,8                  | 2,0                                  | 50    | 19,8                               | 0,180                     |
| 2           | 194,8                  | 2,0                                  | 45    | 20,2                               | 0,210                     |
| 3           | 194,8                  | 2,0                                  | 51    | 24,0                               | 0,290                     |
| 4           | 238,1                  | 2,0                                  | 50    | 19,2                               | 0,140                     |
| 5           | 238,1                  | 2,5                                  | 45    | 20,4                               | 0,203                     |

Увеличение производительности напрямую связано с увеличением скорости осаждения покрытия. На основании выражения (6) для увеличения скорости осаждения необходимо повышать катодную плотность тока и уменьшать температуру электролита. Сравним измерения 1 и 2 (таблица 2). Снижение температуры на 5 °C и повышение плотности тока с 19,8 до 20,2 А/дм<sup>2</sup> позволили увеличить скорость осаждения с 0,18 мкм/мин до 0,21 мкм/мин.

В качестве управляющих параметров предложено выбрать катодную плотность тока и температуру электролита, последний из которых может изменяться в процессе нанесения покрытия.

Так в зависимости от толщины получаемого покрытия процесс хромирования может протекать несколько часов, что сопряжено с понижением температуры электролита. В результате чего, при условии стабильности остальных параметров, скорость осаждения, а, следовательно, и толщина покрытия, полученная за равные промежутки времени, будут увеличиваться.

Как показали исследования при отношении концентраций ~ 115 и более, увеличение концентрации серной кислоты приводит к снижению скорости осаждения. Кроме того, изменение концентрации компонентов помимо толщины покрытия влияет на внешний вид покрытия, электропроводность раствора и т.д. Температура электролита, катодная плотность оказывают влияние на физико-химические свойства электролита, его структуру, механические и другие свойства.

В результате проведенных исследований на входные параметры процесса электролитического хромирования были назначены следующие допуски: концентрация хромового ангидрида 210 – 250 г/л, концентрация серной кислоты 2,1 – 2,5 г/л, температура 45 – 55°C, катодная плотность тока 15 – 30 А/дм<sup>2</sup>.

Полученные математические модели (5) и (6) позволили выявить наиболее значимые параметры ( $x_2$  – концентрация серной кислоты,  $x_4$  – катодная плотность тока) технологического процесса электролитического хромирования, в наибольшей степени влияющие на изменение толщины покрытия, а также влияние направления изменения входных параметров на толщину. Так, увеличение катодной плотности тока ведет к увеличению скорости осаждения, а увеличение концентрации хромового ангидрида – к уменьшению.

После подстановки любого из уравнений системы (4) в выражение (1), последнее примет вид:

$$L(y) = c(t_1\Delta x_1 + t_2\Delta x_2 + \dots + t_n\Delta x_n)^2. \quad (7)$$

Рассмотрим возможности снижения потерь качества. Сравним измерения 2 и 5 (таблица 1), при которых значения толщины покрытия находятся в пределах допуска. При неизменной температуре и времени протекания процесса, одновременное увеличение

**Технологии, оборудование и инструмент упрочняющей и отделочной обработки,  
технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин**

концентрации хромового ангидрида от 194,8 г/л до 239,1 г/л, плотности тока от 20,2 А/дм<sup>2</sup> до 20,4 А/дм<sup>2</sup> и концентрации серной кислоты от 2,0 г/л до 2,5 г/л, толщина хромового покрытия уменьшилась от 6,3 мкм до 6,1 мкм. При этом достигается сокращение потерь качества в 9 раз, а затрат, связанных с расходом хромового ангидрида на 3,17%.

Внедрение результатов выполненных исследований на ОАО «Прибор» позволило обеспечить стабильность технологического процесса нанесения гальванических покрытий посредством обоснованного выбора допусков на входные параметры и сократить потери качества.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9.301–86 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. – Взамен ГОСТ 9.301–78; введен 1987–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 18 с.
2. Гальванотехника: справочное издание / А.М. Гинберг [и др.] – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
3. Ямпольский А.М., Ильин В.А. Краткий справочник гальванотехника. – Изд. 3-е., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. Ленинград. отделение, 1981. – 270 с.
4. Богорад Л.Я. Хромирование. – Изд. 5-е., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1984 – 97 с.
5. Вайнер Я.В., Дасоян М.А. Технология электрохимических покрытий: учебник для химических техникумов. – Изд. 2-е. – Л., Машиностроение, 1972. – 464 с.
6. Ефимов В.В. Улучшение качества продукции, процессов, ресурсов: учебное пособие / В.В. Ефимов. – М.: КНОРУС, 2007. – 240 с.
7. Системы автоматизированного проектирования: В 9-ти кн. Кн.5. Автоматизация функционального проектирования: учеб. пособие для вузов / П.К. Кузьмик, В.Б. Маничев; под ред. И.П. Норенкова. – М.: Высшая школа, 1986. – 144с., ил.

**Сторублев М.Л.**

Курский государственный технический университет, г. Курск  
аспирант  
e-mail: [max100rublev@yandex.ru](mailto:max100rublev@yandex.ru)

**Ивахненко А.Г.**

Курский государственный технический университет, г. Курск  
Доктор технических наук, профессор  
Тел. (4712) 326100  
e-mail: [ivakhnenko2002@mail.ru](mailto:ivakhnenko2002@mail.ru)

С.А. ЗАЙЦЕВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ УПРОЧНЕННЫХ ЛАП КУЛЬТИВАТОРА ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ ПОРОШКОВ

*Статья описывает теоретическую зависимость износостойкости покрытия от микротвердости и от соотношения компонентов в механической смеси.*

**Ключевые слова:** абразивное изнашивание, износостойкость, микротвердость, газопламенное напыление, Порошковый материал, Механическая смесь, Теоретическая зависимость, Лапа культиватора.

*The article describes theoretical dependence of coating wear resistance from micro hardness and component proportion in mechanical mixture.*

**Key words:** abrasive wear, wear resistance, micro hardness, flame spraying, powder material, mechanical mixture, theoretical dependence, cultivator slice share.

Детали в сельскохозяйственных машинах подвергаются сильному изнашиванию. Изнашивание может иметь место при различной природе и параметрах движения внешней среды. В зависимости от условий изнашивания его интенсивность может значительно изменяться [1]. Скорости почти всех процессов, протекающих на поверхностях трения, во многом зависят от механических, теплофизических и химических свойств материала. Одной из важнейших механических характеристик, влияющих на износостойкость материала, является его микротвердость ( $HV$ ). Первая количественная зависимость, связывающая интенсивность изнашивания со свойствами материалов и внешними условиями трения, была сформулирована применительно к абразивному износу в 1937г. Тонном и получила свое подтверждение и развитие в исследованиях М.М. Хрушова и М.А. Бабичева [2]. Ими установлено, что применительно к абразивному изнашиванию интенсивность изнашивания прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна твердости:

$$J = k \frac{q_a}{HV}, \quad (1)$$

где  $J$  - интенсивность изнашивания, кг/м;

$k$  - коэффициент пропорциональности, учитывающий условия трения, кг/м;

$HV$  – микротвердость покрытия, Па;

$q_a$  - давление, Па.

Анализируя выражение (1), можно сделать вывод, что при постоянном давлении интенсивность изнашивания зависит от твердости материала. При увеличении  $HV$  интенсивность изнашивания уменьшается, следовательно, возрастает износостойкость, которая является одним из показателей качества для деталей (ОСТ.70.0009.002-84). По определению, износостойкость - это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения [3]. Износостойкость оценивается величиной обратной интенсивности изнашивания [3, 4]:

$$\varepsilon = \frac{1}{J} = \frac{1}{kq_a} HV, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - износостойкость, м/кг.

Решение задачи повышения износостойкости материалов, подвергающихся изнашиванию, связано с использованием уже известных упрочняющих технологий и

созданием новых. К технологическим способам повышения износостойкости относят различные виды упрочняющей технологий, применение которых направлено на снижение интенсивности изнашивания детали за счет увеличения твердости и снижения пластичности поверхностного слоя, а в некоторых случаях за счет изменения химического и фазового состава этого слоя [5-8].

Для восстановления и упрочнения деталей машин широкое применение находит метод газопламенного напыления порошковых материалов. Благодаря своей технологической простоте и доступности, при высоких показателях качества восстановленной поверхности, метод газопламенного напыления используется для реставрации различных участков изношенной детали. Микротвердость такого покрытия зависит от многих факторов.

Микротвердость покрытия  $HV$ , сформированного из механической смеси порошка ПР-НХ17 и порошка ПР-Х4ГСП, можно представить в виде:

$$HV = f\left(\frac{K_1}{K_2}\right) \quad (3)$$

где  $K_1$  – процентное содержание ПР-Х4ГСП в механической смеси;

$K_2$  – процентное содержание ПР-НХ17 в механической смеси.

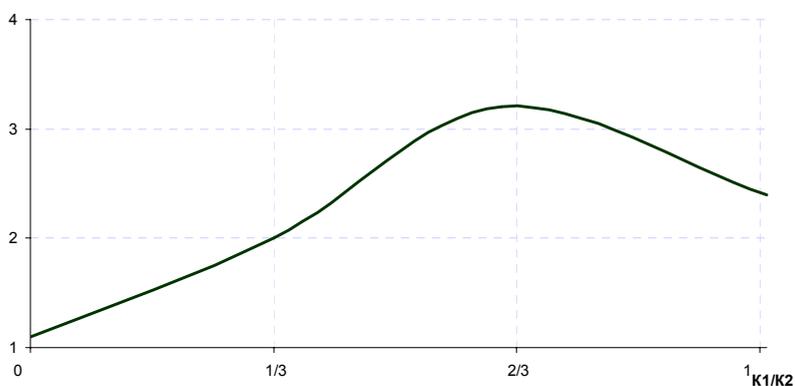
Анализ источников научно-технической информации и собственные предварительные исследования показали, что на микротвердость покрытия будет действовать так же коэффициент хрупкости- $\gamma$ . Коэффициент хрупкости при  $K_1 < 0,4$  равен нулю, а при  $K_1 \geq 0,4$  равен  $f(K_1)$ . Учитывая, что  $K_1 + K_2 = 1$  или 100% механической смеси. Тогда уравнение (3) примет вид

$$HV = f\left[\left(\frac{K_1}{K_2}\right) - \gamma\right] \quad (4)$$

Принимая соотношение  $\frac{1}{kq_a}$  за постоянную величину  $b$ , которая зависит от условий эксплуатации, и, используя формулу 2.6, приводим уравнение 1 к следующему виду:

$$\varepsilon = bHV = b f\left[\left(\frac{K_1}{K_2}\right) - \gamma\right] \quad (5)$$

Предварительно проведенные исследования, позволили установить, зависимость износостойкости от соотношения порошков в механической смеси. Основываясь на этих данных теоретическая кривая, характеризующая данную зависимость может быть представлена на рисунке 1:



**Рисунок 1-Теоретическая зависимость износостойкости детали  $\varepsilon$  от соотношения ПР-Х4ГСП и ПР-НХ17 ( $K_1/K_2$ ) в покрытии**

Как видно из графика (рисунок 1) наибольшая износостойкость покрытия будет сформирована механической смесью порошка ПР-Х4ГСП и порошка ПР-НХ17 при соотношении  $K_1/K_2=2/3$ , что соответствует соотношению порошка ПР-Х4ГСП – 40% и порошка ПР-НХ17 – 60% [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолова Н.А., Гордиенко Л.К. Металлография и общая технология металлов. – М.: Высшая школа, 1983. – 270 с.
2. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Методика испытания на износ при трении об абразивную поверхность. "Трение и износ в машинах", сб. 1. Изд. АН СССР, 1941.
3. Харитонов Л.Г. Определение микротвердости. – М.: Металлургия, 1967. – 45 с.
4. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
5. Ткачев В.Н. Методы повышения долговечности сельскохозяйственных машин. – М.: Изд-во АО «ТИС», 1993. – 211 с.
6. Горленко О.А. Износостойкость поверхностей, упрочненных лазерной обработкой. //Трение и износ. – 1981. – Т.2, №1.- С. 27-31.
7. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии. /А.П. Семенов, И.Б. Ковш, И.П. Петрова и др. – М.: Наука, 1972. – 404 с.
8. Голубев И.Г. Упрочнение и восстановление деталей напылением керамическими и металлокерамическими покрытиями. //Производств.-техн. обеспечение сельского хозяйства. Сер. Зарубежный опыт: Экспресс-информация// Госкомсельхозтехника СССР. ЦНИИТЭИ. – 1985 г. – Вып. 15. – С. 10-15.
9. Патент РФ № 2337178 С23С 4/08 Бюл. №30 27.10.08 г. Порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий. Патентообладатель ОрелГАУ. Хромов В.Н., Коренев В.Н., Зайцев С.А.

### **Зайцев Сергей Александрович**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел

Ст. преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин»

Тел.: (4862) 544528;

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

А.В. КОЛОМЕЙЧЕНКО, Н.В. ТИТОВ

## КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МДО И НАНЕСЕНИЯ МЕДНОГО СЛОЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Разработана комбинированная технология микродугового оксидирования с последующим нанесением медного слоя, позволяющая не менее чем в 3 раза повысить износостойкость внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин не только при их восстановлении, но и при изготовлении. Предложено практическое применение разработанной технологии.*

**Ключевые слова:** машиностроение, металлообработка, микродуговое оксидирование, износостойкость, восстановление.

*The combined method microarc oxidation with further application of copper coating is developed. It allows increasing of wear resistance of inner cylindrical surfaces of machine elements in 3 times not only at their restoration but also at their production strengthening the operating elements surfaces before their introduction into operation. It was proposed the practical application of the invitational technologic.*

**Key words:** engineering, metal working, micro-arc oxidation, wear resistance, restoration.

Исследованиями ряда учёных установлено, что при эксплуатации техники более половины от общего числа изнашивающихся поверхностей приходится на цилиндрические поверхности деталей, при этом 60% из них составляют внутренние цилиндрические поверхности [1, 2]. В то же время эффективных технологических методов повышения износостойкости внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин не так много. Среди достаточно широко используемых способов их упрочнения можно в первую очередь выделить диффузионную металлизацию, индукционное центробежное формование износостойких покрытий, ионно-плазменное нанесение покрытий, электролитическое хромирование, поверхностное пластическое деформирование. Однако каждый из этих способов имеет ряд недостатков, сдерживающих их широкое внедрение в производство.

Всё возрастающим требованиям, предъявляемым в настоящее время к упрочняющим покрытиям и их свойствам, в наибольшей степени удовлетворяют керамические покрытия, которые имеют высокие служебные свойства, а также стойки к окислению, термоударам и вибрациям. Одним из способов формирования керамических покрытий является микродуговое оксидирование (МДО). Покрытия, сформированные МДО, имеют высокие твёрдость, износостойкость и адгезию, вследствие чего находят всё более широкое применение в соединениях различного функционального назначения [3]. Однако при граничном трении и взаимодействии без смазочного материала эти покрытия имеют высокие фрикционные свойства. При эксплуатации это приводит к тому, что деталь с покрытием, взаимодействуя с ответной деталью соединения, вызывает её повышенный износ и, таким образом, снижение износостойкости соединения в целом [4]. Данный недостаток существенно ограничивает область применения деталей с МДО-покрытиями.

Расширить область применения МДО-покрытий в данных условиях возможно за счёт нанесения на их поверхность тонкого медного слоя, обладающего высокими антифрикционными свойствами. За счёт этого возможна длительная работа соединения в условиях ограниченной смазки, а медный слой повышает интенсивность теплоотвода из зоны контакта и обеспечивает повышенную износостойкость соединения даже в условиях абразивного изнашивания. Малая толщина медного слоя и высокая твёрдость покрытия, сформированного МДО, препятствуют внедрению абразивных частиц, благодаря чему не происходит интенсивного изнашивания ответной детали соединения и обеспечивается его длительная работа в данных условиях.

Проведённый анализ показал, что медный слой на поверхность покрытия, сформированного МДО, наиболее рационально наносить фрикционно-механическим способом, используя при этом тонкую натирающую пластину из технической чистой меди [5]. В ремонтном производстве известны способы фрикционно-механического нанесения антифрикционных слоёв, преимущественно на детали из стали, однако их общим недостатком является то, что контактные давления в зоне взаимодействия натирающего элемента и обрабатываемой поверхности детали превышают 30...40 МПа. В то же время при нанесении антифрикционного слоя на поверхность покрытия, сформированного МДО на детали из алюминиевого сплава, уже при контактных давлениях, превышающих 10 МПа, происходит разрушение покрытия из-за пластической деформации материала детали.

Проведённый комплекс соответствующих исследований позволил не только доказать возможность создания медного слоя на поверхности покрытия при контактных давлениях, исключающих его разрушение, но и установить рациональные режимы обработки и их влияние на толщину наносимого медного слоя [5]. Была разработана комбинированная технология МДО с последующим нанесением медного слоя, позволяющая значительно повысить износостойкость внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин. Технология универсальна, то есть может применяться как при изготовлении, так и при восстановлении деталей машин, в том числе со значительными износами внутренних цилиндрических поверхностей. Детали могут быть изготовлены как из чёрных (сталь, чугун), так и цветных металлов и сплавов.

При использовании данной технологии отверстие в детали механически обрабатывают (расточивают), после чего из алюминиевого сплава изготавливают втулку. Втулка применяется как для компенсации износа восстанавливаемого отверстия, так и для повышения износостойкости деталей из чёрных металлов. Далее технология делится на четыре маршрута, которые зависят от точности соединения и действующих нагрузок.

Маршрут I применяют для обработки деталей, работающих в соединениях низкой и средней точности при контактных давлениях до 10 МПа. Его основные операции: обработка внутренней поверхности втулки развёртыванием, упрочнение этой поверхности МДО, запрессовка втулки в деталь, механическая обработка упрочняющего покрытия, сформированного МДО, нанесение на поверхность покрытия медного слоя фрикционно-механическим способом.

Маршрут II применяют для обработки деталей, работающих в соединениях низкой и средней точности при контактных давлениях более 10 МПа. Его основные операции: обработка внутренней поверхности втулки поверхностным пластическим деформированием (ППД), упрочнение этой поверхности МДО, запрессовка втулки в деталь, механическая обработка упрочняющего покрытия, сформированного МДО, нанесение на поверхность покрытия медного слоя фрикционно-механическим способом. Применение ППД связано с тем, что покрытия, сформированные МДО на достаточно мягкой внутренней поверхности втулки из алюминиевого сплава, при контактных давлениях свыше 10 МПа разрушаются. Методы ППД позволяют упрочнить внутреннюю поверхность втулки, что будет препятствовать разрушению сформированного на ней покрытия. Среди методов ППД наиболее перспективно деформирующее протягивание, при использовании которого одновременно с повышением твёрдости поверхностного слоя материала обеспечивается необходимая точность размера.

Маршрут III применяют для обработки деталей, работающих в высокоточных соединениях при контактных давлениях до 10 МПа. Его основные операции: запрессовка втулки в деталь, обработка её внутренней поверхности развёртыванием, упрочнение этой поверхности МДО, механическая обработка упрочняющего покрытия, сформированного МДО, нанесение на поверхность покрытия медного слоя фрикционно-механическим способом.

Маршрут IV применяют для обработки деталей, работающих в высокоточных соединениях при контактных давлениях свыше 10 МПа. Его основные операции: запрессовка втулки в деталь, обработка её внутренней поверхности деформирующим протягиванием,

упрочнение этой поверхности МДО, механическая обработка упрочняющего покрытия, сформированного МДО, нанесение на поверхность покрытия медного слоя фрикционно-механическим способом.

Для нанесения медного слоя используют устройство, прижимной элемент которого имеет теплоизолирующее покрытие с закреплённой на нём тонкой натирающей пластиной из технической чистой меди, форма которой повторяет контактирующую с ней поверхность. Детали обеспечивают вращение с частотой, соответствующей скорости скольжения 0,5 м/с, а натирающую пластину вводят в соприкосновение с поверхностью покрытия и создают между ними контактное давление 15 МПа. Толщина медной натирающей пластины – 0,05...0,10 мм, продолжительность процесса – 230...240 с, смазка контактирующих поверхностей – технический глицерин. Указанные режимы позволяют получить медный слой толщиной 4,0...4,5 мкм.

Альтернативным вариантом технологии является применение метода газопламенного напыления для нанесения алюминийсодержащей композиции на внутренние цилиндрические поверхности деталей вместо изготовления втулок. Однако при его использовании невозможна обработка деталей, имеющих отверстия диаметром менее 80 мм, что существенно ограничивает применение этого варианта технологии.

Разработанная технология (маршрут I) была опробована при восстановлении посадочных отверстий опор граблин жаток для уборки трав кормоуборочных комбайнов КСК-100 и КПКУ-75 (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Опора граблин жатки для уборки трав кормоуборочных комбайнов КСК-100 и КПКУ-75, восстановленная с использованием разработанной технологии*

Для сравнения износостойкости соединения «опора-граблина» жаток для уборки трав кормоуборочных комбайнов КСК-100 и КПКУ-75 с восстановленными по предлагаемой технологии и серийными опорами были проведены эксплуатационные испытания жаток, которые показали, что при наработке 210...230 моточасов износостойкость соединения «опора-граблина» с восстановленными по предлагаемой технологии опорами была в 3,5 раза выше, чем у соединения с серийными опорами. Проведённые испытания доказали эффективность и целесообразность разработанной технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воловик, Е. Л. Справочник по восстановлению деталей [Текст]. – М.: Колос, 1981.-351 с.
2. Молодык, Н. В. Восстановление деталей машин: Справочник [Текст] / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989.-480 с.
3. Новиков, А. Н. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Новиков, А. Н. Батищев, Ю. А. Кузнецов, А. В. Коломейченко. – Орёл: ОрёлГАУ, 2001.-99 с.
4. Басинюк, В. Л. Фрикционные и механические свойства оксидно-керамических покрытий [Текст] / В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич// Трение и износ, 2003.-Т.24, №5. – С. 510-516.
5. Басинюк, В. Л. Улучшение антифрикционных свойств МДО-покрытий за счёт нанесения на их поверхность слоев из меди и её сплавов [Текст] / В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич, А. В. Коломейченко, Н. В. Титов// Упрочняющие технологии и покрытия, 2006.-№4. – С. 23-26.

### **Коломейченко Александр Викторович**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел. (4862) 76-19-21

### **Титов Николай Владимирович**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел. (4862) 76-43-87  
E-mail: ogau@mail.ru

УДК 621.787.4

Ю.С. СТЕПАНОВ, А.М. ГАВРИЛИН, А.В. КАТУНИН, А.А. КАТУНИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБКАТКИ НЕПОЛНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ ШАРОВОГО ПАЛЬЦА

*В Орловском государственном техническом университете проведено исследование кинематических параметров процесса обкатки неполной сферической головки шарового пальца. Получены зависимости для определения основных кинематических параметров.*

**Ключевые слова:** ротационная обкатка, шаровый палец, неполная сферическая поверхность.

*In clause the research of the kinematical parameters of the rotation rolling of the incomplete spherical surfaces of the globular fingers. Getting formula for calculation kinematical parameter.*

**Key words:** rotation rolling, ball shank, incomplete spherical surfaces.

В технике существует большая группа деталей, конструктивным элементом которых является неполная сферическая поверхность: шаровые пальцы автомобильных шаровых шарниров, наконечники рулевых тяг, опоры мехатронных модулей, запорные элементы шаровых кранов и другие. Наиболее характерным представителем деталей этой группы является автомобильный шаровый палец.

В качестве операции чистовой размерно-упрочняющей обработки неполной сферы шарового пальца получила распространение ротационная (планетарная) обкатка шариками. До недавнего времени она осуществлялась самоустанавливающимися регулируемые или нерегулируемые шариковыми обкатными головками (обкатниками) с сепаратором [1,2,6,8 и др.].

В Технологическом институте ОрелГТУ в последние годы активно ведутся работы по исследованию процесса обкатки неполных сферических поверхностей бессепараторными шариковыми обкатниками [3,4,5,7]. Бессепараторные обкатники, по сравнению с сепараторными, обладают рядом преимуществ: значительное увеличение числа деформирующих элементов (шариков), заметное упрощение конструкции, уменьшение износа шариков, отсутствие дополнительных изнашивающихся элементов, повышение безопасности, надежности и долговечности обкатной головки, а также значительное упрощение ее наладки и замены шариков. Наличие в конструкции обкатника сепаратора не только осложняет ее, но и ограничивает количество деформирующих тел, что отрицательно сказывается на качестве и производительности обкатки.

Технологическими параметрами ротационной обкатки неполных сферических поверхностей являются: частота вращения обкатной головки (обкатника), частота вращения обкатываемой неполной сферы и усилие обкатывания. Вместе с тем очевидно, что рабочими деформирующими элементами являются шарики, которые в бессепараторных обкатниках имеют свою частоту, отличную от частоты вращения корпуса обкатной головки. Поэтому, задавая (или устанавливая на станке) число оборотов в минуту инструмента, совершенно необходимо знать – каким при этом будет число оборотов в минуту вращения шариков, которое и следует учитывать при расчете скорости, производительности и параметров качества процесса обкатки. Установить такое соответствие визуально или другим простым способом, в силу закрытой конструкции обкатника, не представляется возможным, поэтому необходимо воспользоваться кинематическим анализом.

Кинематическая схема процесса обкатки неполной сферической головки шарового пальца представлена на рисунке 1. Обкатная головка, с шариками диаметром  $d_{ш}$ , совершает

вращательное движение вокруг оси  $ZZ$  с частотой  $n$ . Шаровой палец, вместе с обкатываемой сферической головкой, вращается вокруг своей оси с частотой  $n_1$ . Оси обкатной головки и шарового пальца пересекаются под углом  $\alpha$ . Точка касания деформирующихся шариков и обкатываемой неполной сферы  $K_1$  лежит на оси шарового пальца.

При обкатке каждый шарик вращается вокруг оси обкатной головки  $ZZ$  (переносное движение) и вокруг своей оси (относительное движение).

Для решения поставленной задачи будем исходить из того, что шарики катятся по опорной дорожке обкатника и по обкатываемой поверхности неполной сферы без скольжения.

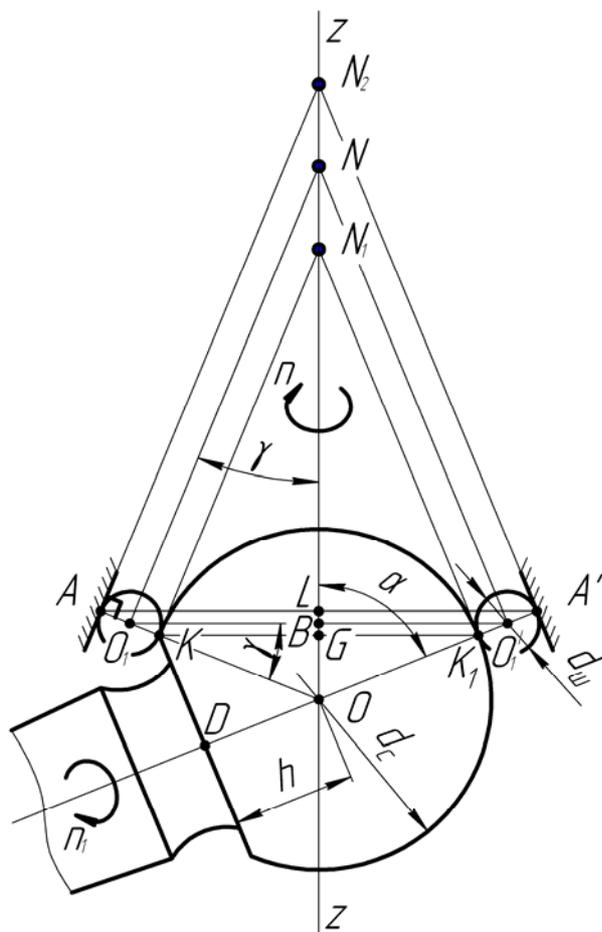


Рисунок 1 - Кинематическая схема процесса обкатки неполной сферической головки шарового пальца

Согласно схеме, показанной на рисунке 1, шарик одновременно контактирует с обкатываемой сферой в точке  $K$  и с опорной дорожкой обкатника – в точке  $A$ , лежащей на продолжении линии  $OO_1$ . Определим направление вращения шарика в его относительном движении. Шарик вращается вокруг своей оси за счет сил, действующих на него в диаметрально противоположных точках  $A$  и  $K$ . Плоскость действия этих сил проходит через ось центров шарика и обкатываемой сферы  $O_1O$  перпендикулярно плоскости рисунка 1 и оси относительного движения шарика. Поэтому для ее определения достаточно в точке  $O$  (центре шарика) восстановить нормаль к оси  $O_1O$  до пересечения с осью  $ZZ$  в точке  $N$ . Прямая  $O_1N$  является осью вращения шарика в его относительном движении, наклоненной к оси обкатной головки  $ZZ$  под углом  $\gamma$ .

Восстановим в точке  $K$  нормаль к оси центров шарика и обкатываемой сферы до пересечения с осью  $ZZ$  обкатной головки в точке  $N_1$ . Линия  $KN_1$  является также и касательной к поверхностям шарика и обкатываемой сферы в точке  $K$ . Поскольку прямые  $O_1N$  и  $KN_1$  параллельны, а положение оси  $ZZ$  неизменно, то качение шарика по поверхностям сферы и опорной дорожке

обкатника будет происходить без скольжения.

Определим число оборотов в минуту шарика вокруг оси обкатной головки  $ZZ$  и вокруг собственной оси  $O_1N$ . Поскольку шарик катится по опорной дорожке обкатника без скольжения, то абсолютная скорость точки  $A$  шарика равна окружной скорости этой точки обкатника. Отсюда:

$$V_{A \text{ шар}} = \pi \cdot AA' \cdot n, \text{ мм/мин}, \quad (1)$$

где  $n$  - число оборотов обкатной головки.

Если на схеме (рисунок 2) обозначить скорость  $V_{A \text{ шар}}$  вектором  $AC$  и соединить точку  $C$  с абсолютным центром мгновенных скоростей - точкой  $K$ , то можно получить эпюру абсолютных мгновенных скоростей точек шарика, расположенных на отрезке  $AK$  в сечении, перпендикулярном оси его относительного движения  $O_1N$  (рисунок 1).

Абсолютная скорость точки  $O_1$  равна вектору  $O_1C_1$ . Её относительная скорость равна нулю, так как точка  $O_1$  лежит на относительной мгновенной оси вращения шарика. Это означает, что абсолютная скорость точки  $O_1$  равна её переносной скорости.

Из подобия треугольников  $AKC$  и  $O_1KC_1$  можно записать:

$$\frac{AC}{AK} = \frac{O_1C_1}{O_1K} \text{ или } \frac{V_{A_{шар}}}{AK} = \frac{V_{O_1}}{O_1K}, \quad (2)$$

откуда:

$$V_{O_1} = V_{A_{шар}} \cdot \frac{O_1K}{AK}. \quad (3)$$

Подставив в уравнение (3)  $V_{A_{шар}}$  из уравнения (1), получим:

$$V_{O_1} = \pi \cdot AA' \cdot n \cdot \frac{O_1K}{AK} \quad (4)$$

В этом выражении  $AK = d_{ш}$ ,  $O_1K = d_{ш}/2$ , тогда абсолютная мгновенная скорость точки  $O_1$  будет равна:

$$V_{O_1} = \frac{\pi \cdot AA' \cdot n}{2} \quad (5)$$

Обозначим через  $n_z$  и  $n_{ш}$  число оборотов в минуту шарика вокруг оси  $ZZ$  и вокруг собственной оси, соответственно. Тогда, в соответствии с рисунком 1:

$$n_z = \frac{V_{O_1}}{\pi \cdot O_1O'_1} \quad (6)$$

Величину  $O_1O'_1$  найдем используя треугольник  $OO_1B$ :

Рисунок 2 - Фрагмент кинематической схемы обкатки неполной сферической головки шарового пальца

$$O_1O'_1 = 2 O_1B = 2 \left( \frac{d_{ш} + d_c}{2} \right) \cdot \cos \gamma = (d_{ш} + d_c) \cdot \cos \gamma, \quad (7)$$

тогда число оборотов в минуту шарика вокруг оси  $ZZ$ :

$$n_z = \frac{V_{O_1}}{\pi \cdot (d_{ш} + d_c) \cdot \cos \gamma} = \frac{V_{O_1}}{\pi \cdot (d_{ш} + d_c) \cdot \sin \alpha}. \quad (8)$$

Из прямоугольных треугольников  $OKG$ ,  $KK_1D$  и  $KDO$  можно записать:

$$\sin \alpha = \frac{KG}{r_c} = \frac{KK_1}{2 \cdot r_c}, \quad (9)$$

$$KK_1 = \sqrt{KD^2 + DK_1^2}, \quad (10)$$

$$KD^2 = r_c^2 - h^2, \quad (11)$$

где  $h$ - размер, указываемый на чертеже шарового пальца.

Из рисунка 1:

$$DK_1 = h + r_c, \quad (12)$$

Подставив в выражение (10) значения из (11) и (12), получим:

$$KK_1 = \sqrt{2r_c^2 + 2r_c h}. \quad (13)$$

Тогда можно записать:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{2r_c^2 + 2r_c h}}{2 \cdot r_c}. \quad (14)$$

Подставив в (8) выражение  $\sin \alpha$  согласно (14) и выражение для  $V_{O_1}$  согласно (5) получим:

$$n_z = \frac{\pi \cdot AA' \cdot n \cdot r_c \cdot 2}{2 \cdot \pi (d_u + d_c) \cdot \sqrt{2r_c^2 + 2r_c h}} = \frac{AA' \cdot n \cdot r_c}{(d_u + d_c) \cdot \sqrt{2r_c^2 + 2r_c h}}. \quad (15)$$

Согласно схеме, представленной на рисунке 1:

$$AA' = 2 \cdot AL = 2 \cdot AO \cdot \sin \alpha = 2 \cdot (d_u + r_c) \cdot \sin \alpha. \quad (16)$$

Подставив в (15)  $AA'$  и  $\sin \alpha$  согласно (16) и (14), после преобразований получим:

$$n_z = \frac{(d_u + r_c) \cdot n}{d_u + d_c}. \quad (17)$$

Найдем частоту вращения шарика вокруг собственной оси  $n_u$ . Достроим рисунок 2, проведя прямую через точку  $O$  (центр обкатываемой неполной сферы) и точку  $C_1$  – вершину вектора  $O_1C_1$  до пересечения с вектором  $AC$  в точке  $F$ . Выше отмечалось, что относительная скорость точки  $O_1$  равна нулю. Вектор  $O_1C_1$  равен переносной скорости вращения центра шарика вокруг точки  $O$ , которая является центром переносных мгновенных скоростей.

Так как абсолютный мгновенный центр скоростей точек шарика  $K$  находится между относительным  $O_1$  и переносным  $O$  центрами, то все три вращения: абсолютное, переносное и относительное направлены в одну и ту же сторону. Следовательно, абсолютная скорость точки  $A$  равна сумме переносной  $AF$  и относительной  $FC$  скоростей этой точки.

Из подобия треугольников  $AOF$  и  $O_1OC_1$  найдем  $AF$  – переносную скорость точки  $A$ :

$$\frac{AF}{AO} = \frac{O_1C_1}{O_1O} = \frac{V_{O_1}}{r_u + r_c}, \quad (18)$$

$$AF = V_{O_1} \cdot \frac{d_u + r_c}{r_u + r_c}. \quad (19)$$

Относительная скорость  $FC$  точки  $A$ :

$$FC = AC - AF, \quad (20)$$

$$FC = V_{A_{шар}} - V_{O_1} \cdot \frac{d_u + r_c}{r_u + r_c} = V_{A_{шар}} - \frac{V_{A_{шар}}}{2} \cdot \left( \frac{d_u + r_c}{r_u + r_c} \right) = V_{A_{шар}} \left[ 1 - \frac{(d_u + r_c)}{2(r_u + r_c)} \right]. \quad (21)$$

Обозначим  $FC$  - относительную скорость точки  $A$  через  $V_{A_{отн}}$  и подставим вместо  $V_{A_{шар}}$  ее значение из формулы (1):

$$V_{A_{отн}} = \pi \cdot AA' \cdot n \cdot \left[ 1 - \frac{(d_u + r_c)}{2(r_u + r_c)} \right]. \quad (22)$$

Число оборотов шарика вокруг собственной оси:

$$n_u = \frac{V_{A_{отн}}}{\pi \cdot d_u} = \frac{AA' \cdot n}{d_u} \cdot \left[ 1 - \frac{d_u + r_c}{2(r_u + r_c)} \right]. \quad (23)$$

Подставим в (23)  $AA'$  в соответствии с (16):

$$n_u = \frac{2 \cdot (d_u + r_c) \cdot \sin \alpha \cdot n}{d_u} \cdot \left[ 1 - \frac{d_u + r_c}{d_u + 2r_c} \right]. \quad (24)$$

Подставим в (24)  $\sin \alpha$  в соответствии с (14) и после преобразований получим:

$$n_u = \frac{(d_u + r_c) \cdot \sqrt{d_c(r_c + h)} \cdot n}{d_u \cdot r_c} \cdot \left[ 1 - \frac{d_u + r_c}{d_u + d_c} \right]. \quad (25)$$

Таким образом, получены выражения для определения числа оборотов в минуту деформирующих шариков вокруг оси обкатной головки и вокруг собственной оси, в зависимости от частоты вращения бесцепараторного обкатника, размеров обкатываемой сферы и шариков. Это позволит более точно определять скорость, производительность и параметры качества процесса обкатки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. А.с. 167152 СССР, В 24 В 11/00. Головка для чистовой обработки шаровых поверхностей [Текст] / Е.Г. Коновалов, Н.Н. Яцевич // Открытия. Изобретения. 1964, №24.
2. Гун, И.Г. Совершенствование технологической системы изготовления шаровых шарниров [Текст] / И.Г. Гун. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 416 с.
3. Катунин, А.А. Анализ способов планетарной обкатки неполных сферических поверхностей [Текст] / А.А. Катунин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - №7. – С. 24-26
4. Катунин, А.А. Обеспечение точности формы и заданной шероховатости неполных сферических головок шаровых пальцев автомобильных шаровых шарниров [Текст] / А.А. Катунин, А.В. Катунин, Н.Н. Самойлов, А.М. Сидоров // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2008. - №2 (545). – С. 56-58
5. Катунин, А.А. Совершенствование метода обкатки неполных сферических поверхностей [Текст] / А.А. Катунин // Вестник Рыбинской государственной технологической академии имени П.А. Соловьёва: Сборник научных трудов. – 2007. - №1(11)
6. Коновалов, Е.Г. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей [Текст] / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко. - Минск: Вышэйшая школа, 1968. - 364 с.
7. Пат. 2278018 Российская Федерация, МПК<sup>с</sup> В 24 В 39/04. Способ импульсно-ударного деформирования сферической поверхности [Текст] / Ю.С. Степанов [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». - № 2004136435/02; заявл. 2004.12.14; опубл. 2006.06.20, Бюл. №17
8. Яцевич, Н.Н. Исследование процесса чистовой ротационной обработки шаровых поверхностей многошариковым инструментом [Текст] / Н.Н. Яцевич. - Автореф. дис. канд. техн. наук. Минск, 1969.

**Степанов Юрий Сергеевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе  
Адрес: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 47 50 71  
E-mail: stepanov@ostu.ru

**Гаврилин Александр Михайлович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»  
Адрес: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 34  
Тел. (4862) 54 14 19  
E-mail: asis@ostu.ru

**Катунин Александр Валентинович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»  
Адрес: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41 67 33  
E-mail: kat@ostu.ru

**Катунин Андрей Александрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Адрес: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 34  
Тел. +79155080508  
E-mail: aak808@yandex.ru

УДК 621.282.1:621.793.7-034.35'

В.Н. ХРОМОВ, А.Ю. РОДИЧЕВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

*Затраты времени и себестоимость получения газотермических покрытий пропорциональны их толщине, необходимо определить ее оптимальное значение, удовлетворяющее требованиям, предъявляемым к покрытию, при минимальных затратах на ее получение. Наиболее эффективно задача обоснования толщины покрытий, наносимых с помощью газопламенного напыления на деталях, может быть решена с помощью расчетно-аналитического метода.*

**Ключевые слова:** машиностроение, металлообработка, газотермическое покрытие, газоплазменное напыление, расчетно-аналитический метод.

*The time consumption and the prime cost of producing gas-thermal coverings are proportional to their thickness; it is necessary to determinate its optimum value that meets the requirements, placed to the covering at the minimum costs for its production. Most effective way of solving the problem of justification of coverings thickness applied by means of flame spraying on details is to use the calculating-analytical method.*

**Key words:** engineering, metal working, gas-thermal coating, gas-plasma dusting, calculated-analytical method.

Задний мост автогрейдера и задняя подвеска автомобилей КамАЗ, ЗИЛ-130Г, КрАЗ, имеет разное конструктивное решение балансирного устройства, в состав которого входят втулки (подшипники скольжения), изготовленные из антифрикционного материала, работающие в условиях абразивного изнашивания. Эти подшипники лимитируют ресурс заднего моста автогрейдера (задней подвески автомобилей) и требуют восстановления либо замены новыми ремонтного размера.

При проведении капитального ремонта автомобилей требуется ремонт задней подвески, а анализ износного состояния подшипников скольжения показал, что внутренняя цилиндрическая поверхность бронзовых втулок выходит за пределы размеров допустимых при ремонте. Геометрические параметры и материал подшипников скольжения автомобилей и автогрейдера представлены в таблице 1

Таблица 1 – Геометрические параметры и материал подшипников скольжения задней подвески автомобилей

| Тип и марка транспортного средства | Основные размеры подшипников скольжения<br>DxdxL, мм | Материал подшипников скольжения |
|------------------------------------|--|---------------------------------|
| КамАЗ                              | 100x89x80  | Бронза                          |
| КрАЗ                               | 120x108x80   | Бронза                          |
| ЗИЛ-130Г                           | 100x89x80  | Бронза                          |
| Автогрейдер                        | 240x220x120  | Бронза                          |
|                                    | 210x190x120  |                                 |

Анализ существующих материалов и технологий изготовления и восстановления подшипников скольжения позволяет остановить свой выбор на технологии восстановления подшипника скольжения из цельной бронзы путем постановки дополнительной детали ремонтного размера [1]. Причем дополнительную деталь ремонтного размера изготавливают биметаллической. Для изготовления биметаллического подшипника скольжения автомобиля КамАЗ сначала изготавливают стальную втулку с наружным диаметром равным номинальному диаметру бронзовой втулки, внутренним диаметром большим номинального на 1,5...3 мм, для нанесения на внутренний диаметр стальной втулки антифрикционного слоя толщиной 0,75...1,5 мм. [2]

Для изготовления биметаллической втулки используем заготовку  
 Труба  $\frac{114 \times 20 \text{ГОСТ} 8732 - 78}{\text{В} 20 \text{ГОСТ} 8731 - 74}$ , длина  $L = 84$  мм.



Рисунок 1 – Подшипники скольжения башмака балансирующего устройства автомобиля КамАЗ

Поскольку затраты времени и себестоимость получения газотермических покрытий пропорциональны их толщине, необходимо определить ее оптимальное значение, удовлетворяющее требованиям, предъявляемым к покрытию, при минимальных затратах на ее получение. Наиболее эффективно задача обоснования толщины покрытий на деталях может быть решена с помощью расчетно-аналитического метода.

Толщина покрытия – понятие, относящееся к определенной обрабатываемой поверхности, измеряют ее по нормали к этой поверхности. Колебание размеров, получаемых на каждой ступени обработки обуславливает изменение толщины покрытия. Различают следующие возможные значения толщины покрытия, подвергнутого размерной обработке: номинальная толщина, наиболее возможная толщина, наименьшая возможная толщина и средняя толщина.

Выбранная система отсчета толщины покрытия должна удовлетворять следующим требованиям: объективно учитывать закономерности изменения толщины покрытия на различных стадиях обработки поверхностей детали, соответствовать системе допусков и посадок и теории размерных цепей. Этим требованиям отвечает система, в которой за начало отсчета принято номинальное значение размера. Построим на основе такой системы отсчета схемы размерных связей между операционными размерами, припусками и допусками на обработку для охватывающей поверхности. [3]

Проведем расчет выражений, полученных в результате решения размерных цепей. За основу расчета выбираем подшипник скольжения из бронзы автомобиля КамАЗ (рисунок 1) наружным диаметром  $\varnothing 100$  мм и внутренним диаметром  $\varnothing 88$  мм с буртиком  $\varnothing 111$  мм.

*Минимальная толщина обрабатываемого покрытия*

$$t_{n.\text{мин.}} = t_n - \frac{\delta_{\text{дет}}}{\Phi}, \quad (1)$$

$t_{n.\text{мин.}}$  - минимальный размер толщины обрабатываемого покрытия;

$t_n$  - номинальное значение толщины обрабатываемого покрытия;

$\delta_{\text{дет}}$  - допуск на размер детали;

$\Phi$  - фактор формы для цилиндрических поверхностей  $\Phi = 2$

$$t_{n.\text{мин.}} = 1,5 - \frac{0,22}{2} = 1,39 \text{ мм}$$

*Допуск на толщину обрабатываемого покрытия*

$$\delta'_n = \left( \frac{\delta'_{\text{заг}}}{\Phi} \right) + \delta_{\text{дет}}, \quad (2)$$

$\delta'_n$  - допуск на толщину обрабатываемого покрытия;

$\delta'_{\text{заг}}$  - величина допуска на размер заготовки

$$\delta'_n = \left( \frac{0,87}{2} \right) + 0,22 = 0,655 \text{ мм}$$

Максимальная толщина обрабатываемого покрытия

$$t_{n.\text{макс}} = t_n + \frac{\delta'_{\text{заг}}}{\Phi}$$

$t_{n.\text{макс}}$  - максимальный размер толщины обрабатываемого покрытия;

$$t_{n.\text{макс}} = 1,5 + \frac{0,87}{2} = 1,935 \text{ мм}$$

Номинальная толщина обрабатываемого покрытия

$$t_n = \frac{(A'_{\text{заг}} - A_{\text{дет}})}{\Phi}, \quad (3)$$

$t_n$  - номинальная толщина обработанного покрытия;

$A_{\text{дет}}$  - размер готовой детали

$A'_{\text{заг}}$  - размер исходной заготовки перед нанесением покрытия

$$t_n = \frac{(91 - 88)}{2} = 1,5 \text{ мм}$$

Допуск на размер заготовки с покрытием

$$\delta''_{\text{заг}} = \delta'_{\text{заг}} + \Phi \delta_n \quad (4)$$

$\delta''_{\text{заг}}$  - допуск на размер заготовки с напыленным покрытием

$\delta_n$  - допуск на толщину напыленного покрытия

$$\delta''_{\text{заг}} = 0,87 + 2 \cdot 0,1 = 1,07$$

Номинальный припуск на обработку покрытия

$$Z_o = Z_{\text{оми}} + \delta''_{\text{заг}}, \quad (5)$$

$Z_o$  - припуск на обработку покрытия

$$Z_o = Z_{\text{оми}} + \delta'_{\text{заг}} + \Phi \delta_n, \quad (6)$$

$Z_{\text{оми}}$  - минимальный общий припуск на обработку покрытия

$$Z_o = 0,4 + 1,07 = 1,47 \text{ мм}$$

Максимальный припуск на обработку покрытия

$$Z_{\text{омакс}} = Z_o + \delta_{\text{дет}}, \quad (7)$$

$$Z_{\text{омакс}} = Z_{\text{оми}} + \delta'_{\text{заг}} + \Phi \delta_n + \delta_{\text{дет}}, \quad (8)$$

$Z_{\text{омакс}}$  - максимальный общий припуск на обработку покрытия

$$Z_{\text{омакс}} = 1,47 + 0,22 = 1,69 \text{ мм}$$

Максимальная толщина напыленных покрытий

$$T_{n.\text{макс}} = t_n + \frac{Z_o}{\Phi}, \quad (9)$$

$T_{n.\text{макс}}$  - максимальная толщина наносимого покрытия

$$T_{n.\text{макс}} = 1,5 + \frac{1,47}{2} = 2,235 \text{ мм}$$

Минимальная толщина напыленных покрытий

$$T_{n.\text{мин}} = T_{n.\text{макс}} - \delta_n, \quad (10)$$

$T_{n.\text{мин}}$  - минимальная толщина наносимого покрытия

$$T_{n.\text{мин}} = 2,235 - 0,1 = 2,135 \text{ мм}$$

Номинальный размер заготовки с напыленным покрытием

$$A''_{заг} = A'_{заг} - \Phi T_{н.макс} \quad (11)$$

$A''_{заг}$  - номинальный размер заготовки с покрытием

$$A''_{заг} = 91 - 2 \cdot 2,235 = 86,53 \text{ мм}$$

Максимальный размер заготовки с напыленным покрытием

$$A''_{заг.макс} = A''_{заг} + \delta''_{заг} \quad (12)$$

$A''_{заг.макс}$  - максимальный размер заготовки с покрытием

$$A''_{заг.макс} = A'_{заг} - \Phi T_{н.макс} + \delta''_{заг} \quad (13)$$

$$A''_{заг.макс} = 86,53 + 1,07 = 87,6 \text{ мм}$$

Минимальный размер заготовки с напыленным покрытием

$$A''_{заг.мин} = A''_{заг} = A'_{заг} - \Phi T_{н.макс} \quad (14)$$

$A''_{заг.мин}$  - минимальный размер заготовки с покрытием

$$A''_{заг.мин} = A'_{заг} - \Phi t_n - \Phi \delta_n \quad (15)$$

$$A''_{заг.мин} = A''_{заг} = 91 - 2 \cdot 2,235 = 86,53 \text{ мм}$$

Средняя толщина покрытий

$$t_{н.ср} = \frac{t_{н.макс} + t_{н.мин}}{2} \quad (16)$$

$t_{н.ср}$  - средняя толщина покрытий

$$t_{н.ср} = \frac{1,935 + 1,39}{2} = 1,6625 \text{ мм}$$

В результате проведенных расчетов четырех возможных вариантов расположения наслаиваемых покрытий на обрабатываемой поверхности, получаемых в результате совмещения минимальных и максимальных размеров заготовки, подготовленной к нанесению покрытия, были определены: максимальный, номинальный и минимальный размер заготовки с напыленным покрытием; максимальная, минимальная и средняя толщина напыленного покрытия ( рисунок 2).

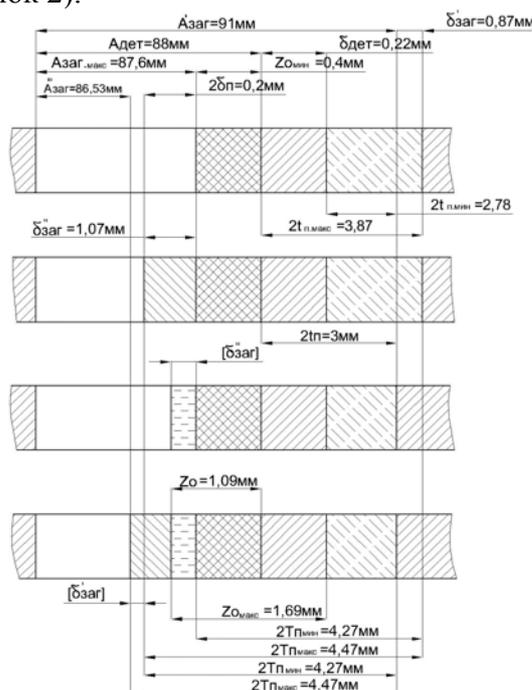


Рисунок 2 – Схема максимальных, номинальных и минимальных размеров заготовки с напыленным покрытием

Проведенные расчеты и построенная схема максимальных, номинальных и минимальных размеров заготовки с напыленным покрытием дает возможность для разработки технологии изготовления биметаллического подшипника с оптимальными параметрами, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к покрытию, при минимальных затратах на ее получение.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Хромов, В.Н. Восстановление подшипников скольжения корпуса муфты сцепления трактора Т-150 / В.Н.Хромов, А.Ю.Родичев // Инженерно-техническое обеспечение и машинно-технологические станции в условиях реформирования АПК: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. в 2 т., т.1.- Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2000. – 151 с., с.79-82
2. Пат. 22122324 Российская федерация, МПК7 В23Р 6/00, F16С 27/02. Способ восстановления подшипников скольжения. Родичев А.Ю., Хромов В.Н. - №2001105025/02; заявка 21.02.2001; опубл.20.09.2003.г.Бюл.№26-3с.
3. Хасуй, А. Наплавка и напыление [Текст]/ А.Хасуй, О Мorigаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240с., ил.

**Хромов Василий Николаевич**

Орловский государственный аграрный университет, г.Орел  
Доктор технических наук, зав.кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор  
Тел.(4862) 43-19-79  
E-mail: [chrom@orel.ru](mailto:chrom@orel.ru)

**Родичев Алексей Юрьевич**

Орловский государственный аграрный университет, г.Орел  
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.(4862) 43-19-79  
E-mail: [alfox777@orel-dormash.ru](mailto:alfox777@orel-dormash.ru)

УДК 621.774.6

С.И. ВДОВИН, В.Н. МИХАЙЛОВ, Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ

## ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЫ ПРИ ГИБКЕ МОМЕНТОМ

*Предлагаемый расчет деформаций основан на вариационном методе Ритца, учитывает анизотропию материала трубы, а также нелинейный характер напряженного состояния при малых радиусах гибки.*

**Ключевые слова:** труба, деформация, вариационный метод, анизотропия материала.

*The offered deformation computation is based on Ritz's variational method. It takes into account a pipe material anisotropy and also the nonlinear mode of a stressed state at small radii of bending.*

**Key words:** tubing, deformation, variational method, anisotropy of the material.

Работоспособность трубопровода существенным образом зависит от деформаций, приобретаемых его изогнутыми участками в процессе формоизменения на трубогибочном оборудовании. Деформации изгиба на большой радиус рассчитывают в тороидальных координатах по формулам:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}, \quad \varepsilon_\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{u_\rho}{\rho}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R}, \quad (1)$$

$$\gamma_{\rho\alpha} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\rho}{\partial \alpha} + \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{u_\alpha}{\rho} \right), \quad \gamma_{\alpha\varphi} = \frac{1}{R} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \alpha}, \quad \gamma_{\varphi\rho} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial \rho} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_\rho}{\partial \varphi},$$

где  $\varphi$  – угол, отсчитываемый в направлении оси трубы, изогнутой на радиус  $R$ ;  
 $u_\rho$  и  $u_\alpha$  – перемещения в поперечных направлениях, рисунке 1.

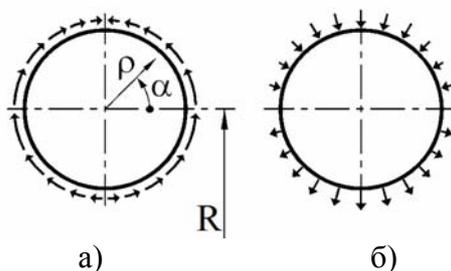


Рисунок 1 – Перемещения  $u_\alpha$  (а) и  $u_\rho$  (б) в сечении изгибаемой трубы

При линейном напряженном состоянии  $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\rho = -0,5\varepsilon_\varphi$ . С учетом (1)

$$u_\rho = -\frac{\rho^2 \sin \alpha}{4R} + f(\alpha, \varphi) + C. \quad (2)$$

Произвольная постоянная  $C$  определяется из условия сохранения внутреннего радиуса трубы  $r$ :

$$u_\rho \Big|_{\rho=r} = 0. \quad (3)$$

Игнорируя произвольную функцию  $f(\alpha, \varphi)$  и учитывая соотношение:  $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\rho$ , получаем в результате

$$u_\rho = \frac{\sin \alpha}{4R} (r^2 - \rho^2), \quad u_\alpha = \frac{\cos \alpha}{4R_0} (r^2 + \rho^2). \quad (4)$$

Из этих формул следует равенство нулю деформации  $\gamma_{\rho\alpha}$ ; что касается деформаций  $\gamma_{\alpha\varphi}$  и  $\gamma_{\varphi\rho}$ , то они обращаются в нуль, если подставить в формулу (2)  $f(\alpha, \varphi) = -0,5R\varphi^2 \sin \alpha$ . К выражению перемещения  $u_\alpha$  (4) соответственно добавится компонента  $-0,5R\varphi^2 \cos \alpha$ .

При изгибе на малый радиус напряженное состояние трубы отличается от линейного, и соотношение деформаций  $\varepsilon_\alpha$  и  $\varepsilon_\rho$  не может быть задано априорно. Деформация в направлении изогнутой оси трубы

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R} + \frac{\sin \alpha}{R} u_\rho + \frac{\cos \alpha}{R} u_\alpha. \quad (5)$$

Согласно (4)  $|u_\rho| \ll |u_\alpha|$ , поэтому пренебрегаем слагаемым правой части (5), содержащим  $u_\rho$ . Запишем равенство нулю суммы линейных деформаций в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{\rho \sin \alpha}{R} + \frac{\cos \alpha}{R} u_\alpha + \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{u_\rho}{\rho} = 0. \quad (6)$$

Зададим соотношение

$$u_\alpha = \frac{\nu \cos \alpha}{R} (r^2 + \rho^2), \quad (7)$$

подобное полученному выше (4) и содержащее варьируемый параметр  $\nu$ , значение которого находим согласно методу Ритца из условия [1]:

$$\int \int \int_V \tau_s \frac{\partial \Gamma^2}{\partial \nu} dV = 0. \quad (8)$$

Здесь  $\tau_s$  – предел текучести,  $\Gamma$  – интенсивность деформаций сдвига,  $V$  – объем деформируемого тела.

Решение уравнения (6) с подстановкой (7) имеет вид:

$$u_\rho = e^{-\int f(\rho) d\rho} \left[ C + \int e^{\int f(\rho) d\rho} F(\rho) d\rho \right], \quad (9)$$

где  $f(\rho) = \frac{1}{\rho}$ ;

$$F(\rho) = \frac{-\rho \sin \alpha}{R} - \frac{\nu \cos^2 \alpha}{R^2} (r^2 + \rho^2) + \frac{\nu \sin \alpha}{R} \left( \frac{r^2}{\rho} + \rho \right);$$

произвольная постоянная  $C$  определяется из условия (3).

После интегрирования и преобразований формула (9) принимает вид:

$$u_\rho = \frac{\sin \alpha}{R} \left[ \frac{(1-4\nu)r^3}{3\rho R} + \frac{(\nu-1)\rho^2}{3} + \nu r^2 \right] - \frac{\nu \cos^2 \alpha}{2R^2} \left( \frac{\rho^2}{2} + \rho r^2 - \frac{3r^4}{2\rho} \right). \quad (10)$$

Полученное выражение  $u_\rho$  вместе с формулой  $u_\alpha$  (7) используем для записи деформаций  $\varepsilon_\rho$ ,  $\gamma_{\rho\alpha}$  (1),  $\varepsilon_\varphi$  (5) а также развернутого выражения интенсивности деформаций сдвига

$$\Gamma = 2 \left[ \varepsilon_\varphi^2 + 2\mu \varepsilon_\varphi \varepsilon_\rho + \varepsilon_\rho^2 + \frac{1-\mu}{2} 0,25 \gamma_{\rho\alpha}^2 \right]^{0,5}.$$

Используем показатель цилиндрической анизотропии материала трубы  $\mu = (\varepsilon_\rho/\varepsilon_\alpha)/[(\varepsilon_\rho/\varepsilon_\alpha) + 1]$ . В данном выражении  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\alpha$  означают деформации по толщине и ширине образца, вырезанного из трубы вдоль ее оси и подвергнутого испытанию на растяжение. В диапазоне значений  $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\alpha$ , равном  $0,5 \dots 2$ , коэффициент  $\mu$  изменяется от  $0,33$  до  $0,66$ , при  $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\alpha = 1$  имеем  $\mu = 0,5$  (изотропный материал). Действительные пределы изменения  $\mu$  могут быть несколько больше – в зависимости от марки материала, толщины стенки и технологии производства труб [2].

Решаем уравнение (8) относительно варьируемого параметра, заменяя тройной интеграл двойным – по площади сечения трубы. Предел текучести  $\tau_s$  принимаем постоянным, что приводит к его сокращению. Результат решения:

$$v = \frac{f_1}{2f_2 + \frac{3f_3}{256\bar{d}^2\bar{R}^2}},$$

где  $f_1 = (\bar{d}^6 + 4\bar{d}^3)(3 - 4\mu) - 9\bar{d}^2(1 - 2\mu) - 2(3 - \mu)$ ,  $f_2 = \bar{d}^6(3 - 2\mu) + 16\mu\bar{d}^3 + 9\bar{d}^2(1 - 2\mu) - 4(3 - \mu)$ ,  $f_3 = \bar{d}^8(77 - 74\mu) + \bar{d}^6(210 - 192\mu) + \bar{d}^4(330 - 348\mu) - \bar{d}^2(482 - 560\mu) - 144(1 - \mu)\bar{d} \ln \bar{d} - 135 + 54\mu$ .

Здесь  $\bar{d}$  и  $\bar{R}$  обозначают соответственно отношение наружного диаметра трубы к внутреннему  $d/(2r)$  и относительный радиус изгиба  $R/d$ . Подборка рассчитанных значений  $v$  содержится в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость варьируемого параметра от коэффициента анизотропии  $\mu$ , толщины стенки  $t$  и радиуса оси изогнутой трубы  $R$

| R/d | 2     |       | 4     |       | $\mu$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| t/d | 0,05  | 0,1   | 0,05  | 0,1   |       |
|     | 0,324 | 0,331 | 0,338 | 0,345 | 0,33  |
| v   | 0,239 | 0,240 | 0,247 | 0,247 | 0,5   |
|     | 0,157 | 0,151 | 0,161 | 0,154 | 0,66  |

Представленные значения  $v$  в большой степени зависят от показателя анизотропии и в малой – от прочих факторов. Упрощенная формула варьируемого параметра  $v = 0,5f_1/f_2$  позволяет рассчитывать данный параметр с некоторым завышением, которое не превышает 5% при  $R/d = 2$  и 1,5% при  $R/d = 4$ .

Формулы деформаций  $\varepsilon_\varphi$  (5),  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\alpha$  (1) записываем в развернутом виде, выражая перемещения согласно (7, 10). Они значительно упрощаются, если пренебречь переменным характером деформаций по толщине стенки трубы, что вполне допустимо при малых  $t/d$ . Упрощенные формулы линейных деформаций:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sin \alpha}{2\bar{R}} + \frac{v \cos^2 \alpha}{2\bar{R}^2}, \quad \varepsilon_\rho = \frac{(2v-1)\sin \alpha}{2\bar{R}} - \frac{v \cos^2 \alpha}{2\bar{R}^2}, \quad \varepsilon_\alpha = \frac{-v \sin \alpha}{\bar{R}} \quad (11)$$

проиллюстрированы эпюрами на рисунке 2.

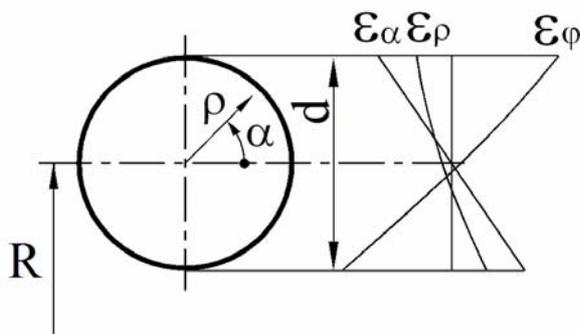


Рисунок 2 – Соотношение линейных деформаций при  $R/d = 4$ ,  $\mu = 0,33$

Отношение  $\varepsilon_\rho/\varepsilon_\alpha$  сильно зависит от коэффициента анизотропии, который присутствует в формулах деформаций неявным образом (содержится в формуле  $v$ ). При  $\mu = 0,66$  эпюры мало отличаются от показанных на рис. 2, но их обозначения –  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\alpha$  меняются местами.

В трубогибочном производстве контролируют минимальную толщину стенки изогнутых труб, формулу для ее прогнозирования получаем согласно (11) при  $\alpha = 90^\circ$ :

$$t_{\min} = t_0 \left( \frac{2v-1}{2\bar{R}} + 1 \right).$$

Графики на рисунке 3 иллюстрируют зависимость этого показателя от относительного радиуса гибки  $R/d$  и коэффициента анизотропии материала трубы.

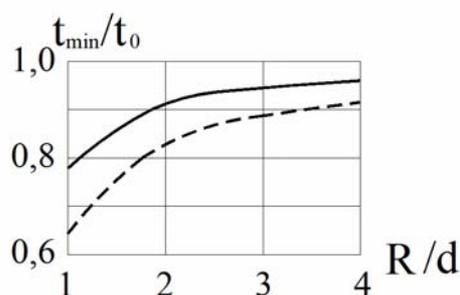


Рисунок 3 – Относительные значения минимальной толщины стенки изогнутой трубы, сплошная и пунктирная линии соответствуют  $\mu = 0,33$  и  $0,66$

Предлагаемый анализ деформаций относится к трубам, изогнутым моментом. Подобные схемы гибки реализуются на некоторых видах трубогибочного оборудования, они обеспечивают существенно меньшую разнотолщинность стенки трубопровода, по сравнению с изгибом поперечной силой [3].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория обработки металлов давлением. Под ред. И.Я.Тарновского /Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А., Колмогоров В.Л., Трубин В.Н., Вайсбурд Р.А., Тарновский В.И. М.: Металлургиздат. 1963. – 672 с.
2. Мордасов В.И. Исследование анизотропии свойств в тонкостенных трубах из цветных сплавов /Теория и технология обработки металлов давлением. Межвузовский сборник. Вып. 71. Под ред. Арышенского Ю.М. Куйбышев: КуАИ. 1975. С. 111 – 117.
3. Гальперин А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. М.: “НЕДРА”. 1983. – 203 с.

#### **Вдовин Сергей Иванович**

Орловский государственный технического университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор  
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
 Тел.: (4862) 41-68-77 и 55-98-25  
 E-mail: [avtopl@yandex.ru](mailto:avtopl@yandex.ru)

#### **Михайлов Валерий Николаевич**

Орловский государственный технического университет, г. Орел  
 Доцент  
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
 Тел.: (4862) 41-98-59  
 E-mail: [avtopl@yandex.ru](mailto:avtopl@yandex.ru)

#### **Татарченков Николай Владимирович**

Орловский государственный технического университет, г. Орел  
 Заведующий лабораторией  
 Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
 Тел.: (4862) 41-98-35  
 E-mail: [avtopl@yandex.ru](mailto:avtopl@yandex.ru)

В.С. ВАНИН, В.А. ДАНИЛОВ

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧИЙ ОРДИНАТ ПРОФИЛЯ ДОРОГИ ПОД ПРАВЫМИ И ЛЕВЫМИ КОЛЕСАМИ МАШИНЫ НА ВИБРАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА

*В данной работе проводится анализ и экспериментальные исследования по влиянию различий ординат профиля дороги под правыми и левыми колесами машины с симметричным расположением рабочего места оператора на характер образования ошибки измерения.*

**Ключевые слова:** машиностроение, металлообработка, строительно-дорожные машины, вибрация, параметр.

*In the given work the analysis and experimental researches on influence of distinctions of ordinates of a profile of road under the right and left wheels of the machine with a symmetric arrangement of a workplace of the operator on character of education of an error of measurement is carried out.*

**Key words:** engineering, metal working, road building machinery, vibration, parameter.

Воздействие вибраций на операторов мобильных строительно-дорожных машин приводит к снижению производительности труда, а в отдельных случаях к профессиональной заболеваемости.

Оценку уровней низкочастотных вибраций на рабочих местах мобильных необходимо выполнять в типовых стандартных условиях (нормированные параметры дороги в виде среднеквадратических высот неровностей  $\sigma(f)$ , осредненных в октавных полосах частот). К нормируемым величинам отклонений профилей приводятся результаты измерений фактических вибраций полученных при фактических профилях.

Чтобы исключить необходимость приведения и уменьшить ошибки измерений используют треки [1, 2] – искусственные дорожки с нормативными неровностями, имитирующие стандартные профили дороги.

Таким образом, реализация типовых условий испытаний достигается двумя путями:

- 1) приведением результатов измерений параметров вибрации на сиденье оператора к типовым условиям с учетом стандартной высоты неровностей микро рельефа;
- 2) проведение измерений уровней вибрации на искусственных треках, имитирующих микропрофиль дороги.

По общему замыслу проезд мобильной машины по треку создает такие вибрации на сиденье, которые реализовались бы при проезде по стандартному микропрофилю. Результаты измерений можно непосредственно сопоставлять с допустимыми уровнями вибраций. В таблице 1 представлены среднеквадратические отклонения неровностей различных треков, рассчитанные по методике [3] для нормируемых диапазонов частот.

Таблица 1 – среднеквадратические значения высот неровностей профилей  $\sigma(f)$  треков, имитирующих дорогу

| Характеристики треков  | Среднеквадратические значения высот неровностей профиля, $\sigma$ , см для диапазона частот, Гц |           |           |          |
|--|---|-----------|-----------|----------|
|  | 0,88–1,4  | 1,4 – 2,8 | 2,8 – 5,6 | 5,6 – 11 |
| 1  | 2   | 3         | 4         | 5        |
| 1) ГОСТ 12.2.002-81<br>одноколейный, скорость движения<br>длина, $L = 200\text{ м}$<br>$\vartheta = 15 - 20\text{ км/ч}$ ; | 0,62  | 0,53      | 0,36      | 0,26     |
| 2) зарубежный, одноколейный,<br>скорость движения, $\vartheta = 15\text{ км/ч}$ ;<br>длина, $L = 240\text{ м}$             | 0,39  | 0,35      | 0,23      | 0,18     |

| Продолжение таблицы 1   |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|
| 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 3) зарубежный, двухколейный, скорость движения, $\vartheta = 12 \text{ км/ч}$ ;<br>длина, $L = 100 \text{ м}$ : |      |      |      |      |
| левая колея   | 0,41 | 0,38 | 0,23 | 0,30 |
| правая колея  | 0,47 | 0,36 | 0,27 | 0,30 |
| общий   | 0,44 | 0,37 | 0,25 | 0,30 |

Из анализа данных таблицы следует, что отечественные треки отличаются от зарубежных величинами неровностей, нормируемых для оценок качества мобильных машин по транспортным вибрациям, имеют одинаковый профиль под правыми и левыми колесами без сдвига по фазе или по времени. Зарубежные треки, имитирующие профиль грунтовой дороги, отличаются меньшими величинами неровностей.

По ГОСТ допускается оценивать уровни низкочастотных вибраций при проезде мобильной машины по фактическому микропрофилю. Это связано с субъективным выбором зачетного участка микропрофиля. В данном случае возможен сдвиг неровностей профилей под правым и левым колесами, который не учитывается при приведении результатов измерений параметров вибрации к типовым условиям по высоте неровностей микрорельефа.

Предложенный экспресс-метод оценки транспортной вибрации, заключающийся в воспроизведении и регистрации переходной функции реакции элементов машины на единичное ступенчатое возмущение, предполагает последующий пересчет результатов к виду, нормируемому по ГОСТ.

Исследование влияния различий ординат профиля дороги под правыми и левыми колесами машины на вибрации рабочего места оператора проводилось на тракторе МТЗ-80Л.

При воздействии на вход машины (правые и левые колеса) 2-х гармонических сигналов одинаковой частоты со сдвигом по фазе возникают колебания передних и задних осей с той же частотой. Результирующая амплитуда сложения 2-х гармонических колебаний определяется по следующей зависимости [4]:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 \times A_2 \times \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где  $A_1, A_2$  - амплитуды 2-х колебаний;

$\varphi_2 - \varphi_1$  - сдвиг сигналов по фазе.

Расчет амплитуды результирующего входного сигнала производился для сдвига по фазе между правыми и левыми колесами  $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$  (таблица 2).

Таблица 2 – характеристики типовых профилей при сдвиге неровностей под правыми и левыми колесами по фазе,  $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ .

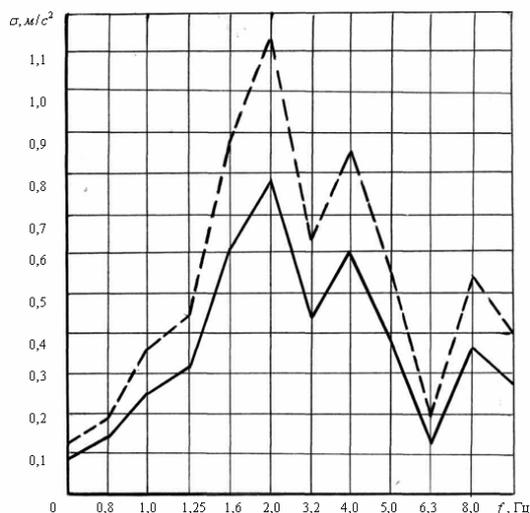
| Наименование типового профиля  | Среднеквадратические значения высот неровностей типового микропрофиля, $\sigma$ , см для диапазона частот, Гц |         |         |        |
|--|---|---------|---------|--------|
|  | 0,88–1,4  | 1,4–2,8 | 2,8–5,6 | 5,6–11 |
| Дорога грунтовая:<br>- преобразованный профиль<br>( $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ ); | 0,44  | 0,37    | 0,25    | 0,18   |
| - не преобразованный<br>( $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ )  | 0,62  | 0,53    | 0,36    | 0,26   |

Для случая, когда на машину воздействуют два гармонических сигнала с различными входами, необходимо в расчетах учитывать соотношение расстояний точек приложения сигналов относительно продольной оси машины.

Для количественной оценки влияния сдвига неровностей по фазе на результаты измерений [5] определялись уровни вибраций на сиденье оператора для случаев:  $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ;

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2} \text{ (рис. 1).}$$

Анализируя полученные данные, очевидно, что при сдвиге неровностей по фазе ( $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ ) между правыми и левыми колесами трактора с симметричным расположением рабочего места оператора различие оценок достигает 15%.



**Рисунок 1 – Уровни виброускорений на рабочем месте оператора при движении по профилям**

\_\_\_\_\_ - сдвиг неровностей по фазе между правыми и левыми колесами  $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ;

----- - сдвиг неровностей по фазе между правыми и левыми колесами  $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Методы измерения параметров вибрации на рабочем месте /СТ СЭВ 3472-81. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 40 с.
2. Арутюнян В.С. Обоснование параметров и разработка конструкции типового трека для испытаний колесных сельскохозяйственных тракторов по оценке вибрации: Автореф. дис. канд.техн.наук. – М., 1983. – 24 с.
3. Межотраслевая методика испытаний тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин по оценке уровня низкочастотной вибрации на рабочем месте механизатора //ГОНТИ НАТИ. – М., 1980. – 27 с.
4. Ванин В.С. Экспресс-метод оценки транспортной вибрации. //Строительные и дорожные машины. - 2006. - №10.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1968. – С. 109-113.

#### **Ванин Владимир Семенович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, декан факультета «Легкая промышленность»  
Тел. (4862) 541685  
E-mail: [mapp@ostu.ru](mailto:mapp@ostu.ru)

#### **Данилов Виталий Александрович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Студент факультета «Легкая промышленность»  
Тел. 89192687390  
E-mail: [dan\\_vitalik@rambler.ru](mailto:dan_vitalik@rambler.ru)

УДК 621.383

Д.Ю. БАГРИНЦЕВ, Б.Р. ИВАНОВ

## **КОРРЕЛОМЕТР ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ДЛИНЫ ВИТЫХ ПРОВОДОВ**

*Для цифрового измерения скорости и длины витых проводов предложено использовать корреляционный метод измерения, основанный на логическом умножении импульсных сигналов, формируемых двумя фотодатчиками, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга.*

**Ключевые слова:** измерение скорости, измерение длины, измерение корреляции, фотодатчик.

*For digital measurement of speed and length of twisted wire we suggested use of correlation method of measurement, based on logical multiplexing of pulse signals, formed by two photosensors, placed on fixed distance on from another.*

**Key words:** measurement of speed, measurement of length, measurement of correlation, photosensor.

При модернизации современного производства, связанного с изготовлением канатов, электрических кабелей и металлокорда, возникает технологическая задача измерения и контроля длины и скорости продольного перемещения изготавливаемых изделий. Характерной особенностью данных объектов является равномерное изменение формы, которое не зависит от скорости движения и определяется только длиной шага скрутки проводов, зависящей от диаметра проводов и технологии изготовления. Скрутка отдельных проводов выполняется на производстве с некоторым допуском, поэтому длина шага скрутки может изменяться относительно среднего или расчетного значения. Вместе с тем наличие равномерного изменения формы или диаметра витых проводов позволяет реализовать предварительное преобразование выходных сигналов датчиков в импульсную форму и затем выполнять цифровое измерение длительностей получаемых импульсов с суммированием результатов отдельных измерений в течение цикла контроля. Использование такого принципа построения позволяет значительно упростить аппаратуру контроля и автоматизировать процесс измерений в производственных условиях.

Сложность точного измерения длины и скорости протяжки витых проводов обусловлена неравномерностью движения и изменением расстояния между датчиками и объектом бесконтактного контроля, а также влиянием внешних факторов на результаты измерений. В связи с этим наиболее привлекательным для решения этой технической задачи является корреляционный метод измерений. К преимуществам этого метода относится возможность уменьшения погрешности за счет усреднения результатов отдельных измерений, выполняемого непосредственно в процессе корреляционного преобразования.

Несмотря на теоретическое обоснование преимуществ корреляционного метода, в настоящее время коррелометры изготавливают в ограниченном количестве и с учетом особенностей контролируемых процессов или изделий. Это связано с высокими требованиями к быстрдействию таких приборов, которые должны выполнять в реальном масштабе времени статистическую обработку непрерывно поступающих данных о динамических параметрах объектов контроля и реализовать поиск экстремума корреляционной функции посредством варьирования интервала времени корреляции. Вследствие этого необходимо выполнять большое количество вычислительных операций, что приводит к снижению точности из-за появления динамической погрешности в случаях неравномерной скорости движения объекта контроля.

Учитывая основное свойство витых проводов – неровность поверхности – для преобразования механических параметров в электрические лучше всего использовать фотодатчики, работающие на просвет. Поверхность витого провода можно освещать с одной стороны светодиодом, а с противоположной стороны контролируемого провода устанавливать фотоэлектрический преобразователь светового потока в электрический сигнал. Протяжка провода металлокорда изменяет площадь освещаемой поверхности фотодиода, что позволяет получать на выходе фотодатчика периодический сигнал, из которого можно получить прямоугольные импульсы для последующего цифрового измерения их длительности или частоты.

Трудность измерения длины витых проводов обусловлена широким диапазоном изменения скорости протяжки  $V_{CP} \approx (0,1 \dots 5)$  м/с и среднего шага скрутки  $l_{CP} \approx (2 \dots 30)$  мм, причем относительная нестабильность любого ( $k$ -го) шага скрутки достигает значения  $\delta_l = \Delta l_k / l_{CP} \approx \pm 0,05$  (или 5 %). Вследствие этого не удастся реализовать точное измерение длины и скорости протяжки проводов одним фотодатчиком. Поэтому при разработке коррелометра использованы два отдельных измерительных канала, в каждом из которых установлены однотипные блоки светодиодных излучателей и фотодатчиков, размещенных на фиксированном расстоянии  $L = \text{const}$  друг относительно друга. Данное расстояние  $L$  между датчиками выполняет функцию меры измерения длины, поэтому должно задаваться с высокой точностью.

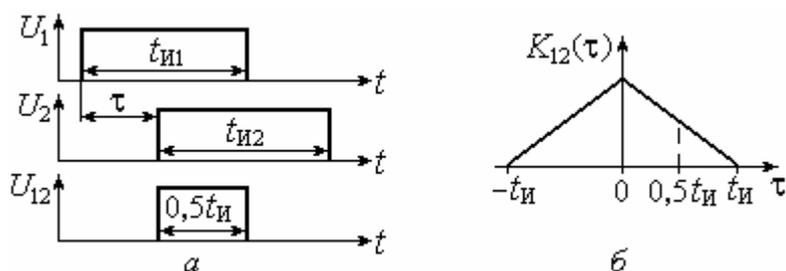


Рисунок 1 – Временные диаграммы импульсных сигналов (а) и форма корреляционной функции (б)

При постоянной скорости протяжки витого провода  $V_{CP} = \text{const}$  на выходах двух фотодатчиков формируются импульсы одинаковой длительности  $t_{И1} = t_{И2} = t_{И}$ , смещенные во времени на интервал корреляции  $\tau = L / V_{CP} \approx 0,5t_{И}$  (рисунок 1, а). Поэтому корреляционная функция, формируемая в процессе такого преобразования, изменяется в диапазоне длительности импульсов  $\pm t_{И}$  по линейному закону (рисунок 1, б) [ ]. При установке интервала корреляции примерно равным половине длительности импульсов  $\tau \approx 0,5t_{И}$  возможное изменение шага скрутки проводов будет приводить к пропорциональному увеличению либо уменьшению корреляционной функции  $K_{12}(\tau)$  относительно начального значения  $K_{12}(0,5t_{И})$  (рис. 1, б). Приращения корреляционной функции можно использовать для компенсации погрешности от изменения шага скрутки проводов относительно среднего значения  $l_{CP}$ , обеспечив повышение точности измерения.

Практически при корреляционном измерении длины витых проводов достаточно установить на фиксированном расстоянии  $L = \text{const}$  два фотодатчика, преобразовать их выходные сигналы в импульсную форму, и для работы устройства на линейном участке корреляционной функции задержать выходные импульсы второго фотодатчика на половину длительности импульса первого фотодатчика  $\tau \approx 0,5t_{И}$ . Для получения цифрового значения корреляционной функции  $K_{12}(\tau)$  нужно подать импульсы от фотодатчиков на схему совпадения (логический элемент типа 2И) и цифровым способом измерить длительность импульса на выходе элемента 2И посредством его заполнения высокой тактовой частотой  $f_T$ . Применение такого преобразования позволяет упростить вычислительный алгоритм и, в конечном итоге, значительно уменьшить сложность и стоимость коррелометра.

В структурной схеме двухканального коррелометра (рисунок 2, а) применены светодиодные излучатели оптического сигнала (СИ1, СИ2) и фотоэлектрические

преобразователи (ФП1, ФП2), установленные с противоположных сторон витого провода и служащие для преобразования светового излучения в электрические сигналы. Выходные сигналы фотопреобразователей ФП1, ФП2 поступают на формирователи ФИ1, ФИ2 и преобразуются в импульсы, частота которых прямо пропорциональна скорости  $V$  протяжки витого провода. Цифровые счетчики  $D1, D2$  используются для деления частоты импульсов, поступающих от формирователей ФИ1, ФИ2, и имеют номинальный коэффициент деления  $K_d = 32$ . Логический элемент "Исключающее ИЛИ"  $D3$  служит для выделения разности длительностей интервалов времени между фронтами  $\Delta t_{И1}$  и между срезами  $\Delta t_{И2}$  импульсов, получаемых от двух фотодатчиков. Схема совпадения  $D4$  типа 2И, генератор импульсов ГИ тактовой частоты  $f_T \gg 1/t_{И}$  и реверсивный счетчик  $D6$  служат для цифрового измерения разностной длительности импульсов  $\Delta t_{И}$ . Реверсивный счетчик  $D6$  работает в режиме суммирования импульсов тактовой частоты только при наличии импульсов на выходе делителя частоты  $D1$ , и переходит в режим вычитания в паузах между этими импульсами.

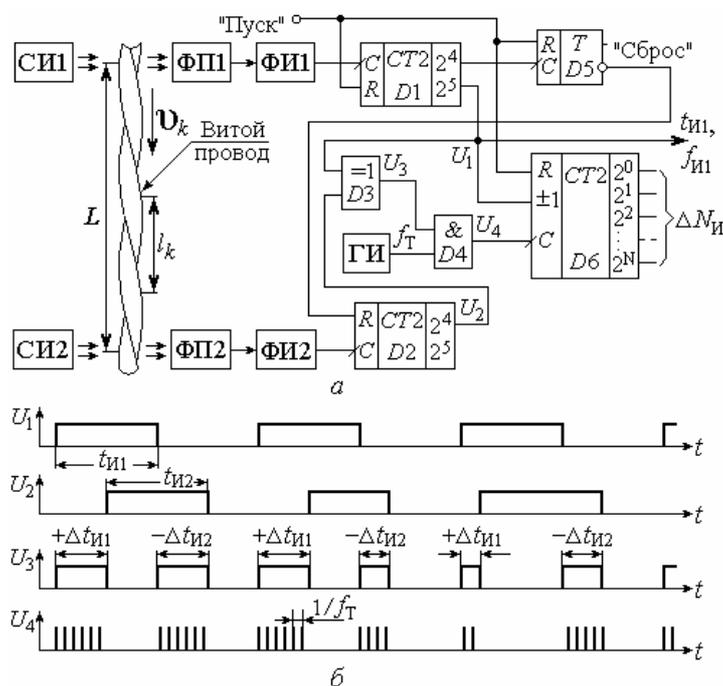


Рисунок 2 – Структурная схема (а) и диаграммы работы двухканального коррелометра (б)

В разработанной структуре прибора (рисунок 2, а) выполняется сравнение интервалов времени между фронтами и срезами импульсов, формируемых двумя фотодатчиками. Это позволяет в два раза повысить быстродействие устройства корреляционного контроля скорости протяжки и длины витых проводов без изменения принципа корреляционного преобразования электрических сигналов.

Процесс измерения в структурной схеме коррелометра (рисунок 2, а) начинается с подачи импульса "Пуск", поступающего на R-входы счетчиков  $D1, D6$  и триггера  $D5$ , выходным сигналом которого производится предварительная установка нуля и запрет работы второго счетчика  $D2$ .

После суммирования в цифровом счетчике  $D1$  первых 16-ти импульсов, поступающих от формирователя ФИ1, на выходе "2<sup>4</sup>" счетчика  $D1$  появляется выходной импульс, устанавливающий триггер  $D5$  в высокое логическое состояние. При этом разрешается работа счетчика  $D2$ , который начинает делить частоту импульсов, поступающих от второго формирователя ФИ2, в  $K_d = 32$  раза, причем первый импульс на его выходе появляется с задержкой во времени относительно счетчика  $D1$ .

В процессе протяжки витого провода на выходах двух фотодатчиков и, соответственно, на выходах счетчиков  $D1$  и  $D2$  формируются импульсы с частичным

наложением друг на друга (рисунок 2, б). Разность длительностей импульсов  $\Delta t_{И1} - \Delta t_{И2}$  выделяется элементом "Исключающее ИЛИ"  $D3$  и измеряется с помощью реверсивного счетчика  $D6$ , на выходе которого формируется разностный код, пропорциональный изменению интервалов времени между фронтами срезами импульсов:  $\Delta N_{И} = (\Delta t_{И1} - \Delta t_{И2}) f_T$ .

Код  $\Delta N_{И}$  на выходе реверсивного счетчика, эквивалентный изменению шага скрутки проводов, подается на микропроцессор для последующей коррекции результатов измерений скорости и длины провода после окончания каждого импульса на выходе второго счетчика  $D2$ .

При постоянной скорости протяжки металлокорда  $V = \text{const}$  уменьшение шага скрутки на величину  $\Delta l$  относительно среднего значения  $l_{CP}$  приводит к увеличению разности импульсов  $\Delta t_{И1} - \Delta t_{И2}$  и повышению кода  $\Delta N_{И}$  на выходе счетчика  $D6$ , а отрицательное значение этой разности  $\Delta t_{И1} - \Delta t_{И2} < 0$  указывает на увеличение шага скрутки проводов.

При изменении скорости протяжки  $V \neq \text{const}$  проводов с постоянным шагом скрутки  $l_{CP}$  разность длительностей импульсов  $\Delta t_{И1} - \Delta t_{И2}$  не изменяется, поэтому длина контролируемого провода определяется числом импульсов на выходе формирователя ФИ1, следующих с изменяющейся во времени частотой и подсчитанных на интервале времени протяжки  $T_{ИЗМ}$  витого провода перед двумя фотодатчиками.

Задержка прямоугольных импульсов на время  $\tau \approx 0,5t_{И1}$  зависит от расстояния  $L = \text{const}$  между двумя фотодатчиками, которое целесообразно выбирать с учетом трех условий:

1) минимальное расстояние  $L$  между фотодатчиками должно быть вдвое больше максимального шага скрутки контролируемых проводов, чтобы исключить наложение выходных импульсов двух фотодатчиков в процессе измерения длины и скорости протяжки проводов:  $L_{MIN} > 2(l_{CP} + \Delta l_{MAX})$ ;

2) максимальное расстояние  $L$  между двумя фотодатчиками при корреляционном измерении должно исключать возможность появления дополнительного  $(n + 1)$ -го импульса на выходе одного из датчиков в случае формирования  $n$  импульсов на выходе другого фотодатчика:  $L_{MAX} \approx n \cdot l_{CP} < (n + 1)(l_{CP} - \Delta l_{MAX})$ ;

3) расстояние  $L$  между фотодатчиками необходимо задавать с высокой точностью, так как относительная погрешность установки фотодатчиков  $\delta_L = \Delta L / L$  ограничивает снизу минимальную погрешность корреляционного измерения длины провода:  $\delta_S = \Delta l_S / l_S \geq \Delta L / L$ .

По технологии изготовления средняя длина шага скрутки проводов зависит от диаметра и изменяется в диапазоне  $l_{CP} \approx (2 \dots 15)$  мм при допуске на длину шага скрутки  $\Delta l_{MAX} / l_{CP} \leq \pm 0,05$  (до 5%). Погрешность установки фотодатчиков ограничивается на уровне  $\Delta L_{MIN} \approx (0,3 \dots 0,5)$  мм шириной светового потока, и при допустимой погрешности  $\delta_S \leq 0,2\%$  нужно устанавливать датчики на расстоянии  $L \geq 25$  см.

Таким образом, при корреляционном измерении скорости протяжки и длины витых проводов нужно формировать импульсы, соответствующие каждому шагу скрутки проводов. Для получения таких импульсов нужно ослабить влияние внешней засветки на результат фотоэлектрического преобразования.

Практически требуется учитывать наличие еще одного мешающего фактора – возможного перемещения провода в поперечном направлении, которое влияет на процесс преобразования светового сигнала в электрический.

В связи с этим необходима разработка надежных и удобных в эксплуатации конструкций и схем фотодатчиков для приборов технологического контроля механических величин, обеспечивающих высокую точность измерений скорости протяжки и длины витых проводов в условиях производства.

Согласно теории измерительных устройств, погрешности первичных измерительных преобразователей и датчиков трудно скомпенсировать любыми способами дальнейшего преобразования. Поэтому к чувствительности и стабильности параметров таких устройств предъявляются особые требования.

Основными требованиями к любым датчикам являются: простота и надежность конструкции, широкий диапазон преобразования, высокая чувствительность и

помехозащищенность, бесконтактность измерения и универсальность применения для проведения испытаний разного вида. Всем этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют фотоэлектрические датчики. Высокую чувствительность фотодатчиков обеспечивают двумя способами: увеличением яркости светового излучения, например, при работе источника света в импульсном режиме, и повышением чувствительности фотоприемника излучения.

Для повышения точности измерений предлагается установить перед светочувствительными окнами фотодиодов светонепроницаемые экраны с отверстиями прямоугольной формы (рисунок 3, а). При использовании в приемниках излучения фотодиодов типа ФД-24К с диаметром светоприемного окна около 10 мм, можно контролировать скорость движения проводов с диаметром до 4...6 мм, что вполне достаточно для контроля витых пар проводов и металлокорда корреляционным методом. Если размах амплитуды вибрации в вертикальной плоскости не превышает высоту светочувствительного окна фотодиода, то изменение диаметра витых проводов приводит к изменению светового потока. При продольном движении витого провода будет изменяться площадь засветки приемника излучения, приводящая к периодической модуляции выходного тока фотодиода, частота которого будет прямо пропорциональна скорости движения контролируемого провода и может быть измерена цифровым частотомером.

Применение светозащитных экранов перед фотодиодами приводит к уменьшению чувствительности вследствие уменьшения эквивалентной площади светочувствительной площадки. Для исключения данного недостатка целесообразно использовать в качестве преобразователя фототока в напряжение операционный усилитель с комбинированной обратной связью. Применение отрицательной обратной связи по постоянному току позволяет уменьшить влияние внешней засветки и температуры эксплуатации на стабильность начального уровня выходного напряжения, а введение цепи положительной обратной связи по переменному току обеспечивает большой коэффициент усиления и высокую чувствительность датчика.

В схеме фотодатчика, предназначенного для контроля скорости движения витого провода (рисунок 3, б), применены световой излучатель (СИ) на усилителе  $D1$  и светодиоде  $VD1$ , фотоприемник (ФП) на усилителе  $D2$  с фотодиодом  $VD2$  и формирователь импульсов (ФИ) на элементе  $D3$  "Исключающее ИЛИ". Этот элемент выполняет функцию триггера Шмитта за счет цепи положительной обратной связи на резисторах  $R_9$ ,  $R_{10}$  и имеет зону гистерезиса  $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} R_9 / R_{10} \approx 0,2 \text{ В}$ .

Малая амплитуда выходного сигнала фотоприемника  $U_{\text{вых}} \leq 0,5 \text{ В}$  не влияет на ток, протекающий через светодиод  $VD1$  излучателя, который зависит от начального напряжения  $U_{\text{нач}} = U_{\text{пит}} R_5 / (R_4 + R_5)$  на выходе усилителя  $D1$  и ограничивается резистором  $R_7$  на уровне  $I_{VD1} \approx 10 \text{ мА}$ . При повышении амплитуды выходного напряжения усилителя  $D2$  до уровня  $U_{\text{вых}} \geq 0,6 \text{ В}$  открывается диод  $VD3$ , выполняющий совместно с конденсатором  $C_2$  функцию амплитудного детектора, и на усилитель  $D1$  поступает сигнал обратной связи, уменьшающий его выходное напряжение и, соответственно, ток светодиода  $VD1$ .

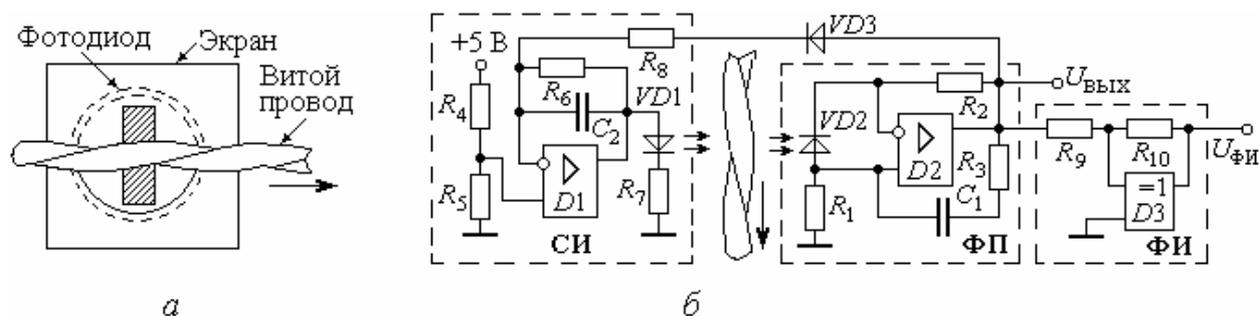


Рисунок 3 – Конструкция фотоприемника (а) и схема фотодатчика одного канала коррелометра (б)

В приведенной схеме фотодатчика начальное напряжение на выходе усилителя  $DA2$  зависит только от постоянного тока  $I_{Ф.П}$  фотодиода, определяемого уровнем внешней фоновой засветки, и при использовании одинаковых резисторов  $R_2 \approx R_1$  определяется выражением:

$$U_{ВЫХнач} \approx I_{Ф.П}(R_1 + R_2) \approx 2I_{Ф.П}R_1.$$

Переменная составляющая фототока  $I_{Ф}$  за счет использования элементов  $R_3, C_1$  в цепи положительной обратной связи усилителя  $DA2$  преобразуется в его выходной сигнал с большим коэффициентом преобразования, причем амплитуда импульсов выходного напряжения возрастает при уменьшении резистора  $R_3$ , и при выполнении неравенства  $R_3 \ll R_1$  определяется приближенным выражением

$$U_{ВЫХ} \approx I_{Ф}(R_1 + R_2 + R_1R_2/R_3) \approx 2I_{Ф}R_2(1 + 0,5R_2 / R_3).$$

При выборе резисторов в схеме (рисунок 3, а) по условию  $R_1/R_3 \geq 100$  усилитель  $DA$  обеспечивает значительное – в  $K_U \geq 50$  раз – усиление амплитуды переменного фототока  $I_{Ф}$  по сравнению с начальным током  $I_T$  фотодиода  $VD2$ . Вследствие этого применение резисторов  $R_1, R_2, R_3$  с относительно небольшими номиналами (до 100 кОм) позволяет обеспечить хорошую стабильность характеристик фотодатчика в сочетании с его высокой чувствительностью за счет большого усиления переменного фототока.

При экспериментальных исследованиях фотодатчиков в схемах источников света применялись инфракрасные светодиоды типа АЛ107Б, в фотоприемниках – фотодиоды типа ФД7К с усилителями типа  $LMP2011$ , имеющими однополярное напряжение питания, а также с микромощными усилителями  $KP140UD1208$ , имеющими низкие входные токи, не превышающие 10 нА. В качестве элемента "Исключающее ИЛИ" в схеме триггера Шмитта использовалась микросхема типа К561ЛП2.

В результате проведенных исследований установлено, что чувствительность фотодатчиков на усилителях с комбинированной обратной связью составляет около 50 мВ/мкм при мощности излучения диода, составляющей 4 мВт. При проведении испытаний принимались меры конструктивного характера для уменьшения внешней засветки фотодиодов – они размещались в светонепроницаемых корпусах черного цвета. Сравнительная оценка параметров таких устройств с известными фотодатчиками показала, что применение усилителей с положительной обратной связью позволяет в 12... 25 раз повысить чувствительность аппаратуры корреляционного контроля при минимальных аппаратурных затратах.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 409-414.
- 2 Загорский Я. Т., Котюк А. Ф. Основы метрологического обеспечения лазерной энергетической фотометрии. – М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 41-44.
- 3 Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1975. – С. 195. (Всего 439 с.)
- 4 Коломьцев В. Н. Размещение магнетронных систем ионного распыления в вакуумных установках // Радиопромышленность. – М.: 1992. – Вып. 4. – С. 35-41.

**Багринцев Дмитрий Юрьевич**

начальник курса – преподаватель Академии ФСО России,

**Иванов Борис Рудольфович**

д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехники и электроники  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Телефон: 8(4862)41-99-47

Н.Н. МИЛЮШИН

## АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА ПРИБЛИЖЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ И КОММУТИРУЕМОГО ПЛОСКОГО КОНТУРА

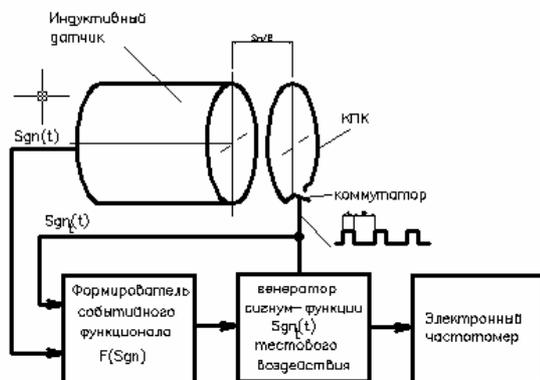
*В статье рассматривается механизм взаимодействия коммутируемого плоского контура и индуктивного датчика приближения токопроводящей среды с целью определения быстродействия датчика. Проведено сопоставление результатов измерения быстродействия датчика традиционным способом и способом коммутируемого плоского контура путем сравнительной оценки значений вносимых сопротивлений в каждом из способов.*

**Ключевые слова:** индуктивный датчик приближения, плоский коммутируемый контур, максимальная частота срабатывания.

*The paper handles the procedure of interaction if the swathing flat loop and inductive proximity sensor of conducting medium while evaluating the response speed of the sensor by means of switching of flat loop. It was conducted an analysis of the comparability of result for the measurement of sensor velocity by conventional method and by switching flat loop using the comparative qualification of reflected resistance value in each method.*

**Key words:** swathing flat loop, inductive proximity sensor, evaluating, response speed, medium, measurement.

Разработка и реализация фазогенераторных индуктивных датчиков приближения токопроводящей среды [1, 2], быстродействие которых существенно [2] превышает быстродействие традиционных индуктивных датчиков [3], требует разработки способов определения их быстродействия. Одним из таких способов является способ коммутируемого плоского контура (КПК), техническая сущность которого описана в [4, 5] и поясняется рисунком 1.



**Рисунок 1 – Схема установки для определения частоты срабатывания индуктивного датчика способом КПК**

Внесение в активную зону индуктивного датчика приближения тестовой пластины из немагнитного металла уменьшает индуктивность колебательного контура датчика и повышает его резонансную частоту, внесение тестовой пластины из ферромагнитного металла, наоборот, увеличивает индуктивность контура и снижает его резонансную частоту. Известно [6], что при питании катушки индуктивности переменным напряжением с частотой  $\omega$ , чувствительность катушки к внесённому сопротивлению зависит от постоянной  $k$  вихревых токов, определяемой соотношением:

$$k = \sqrt{\sigma \mu \omega},$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\sigma$  – электропроводность.

При диаметре катушки индуктивности, равном  $D$ , должно выполняться соотношение:

$$D\sqrt{\sigma \mu \omega} = 3...5.$$

Обычно катушка индуктивности типового датчика приближения представляет собой короткую цилиндрическую многослойную катушку, как правило, размещенную в чашеобразном ферритовом сердечнике той или иной конструкции. Так как ферритовый сердечник осуществляет локализацию магнитного поля в более ограниченном объеме пространства по сравнению с объемом пространства поля катушки без сердечника, можно допустить, что взаимодействие катушки индуктивности, снабженной ферритовым сердечником, с плоским контуром будет характеризоваться соотношениями, аналогичными для катушки без сердечника.

Для анализа взаимодействия КПК и активного элемента индуктивного датчика приближения воспользуемся положениями теории воздушного трансформатора. При этом будем считать, что: источником энергии  $E$  является колебательный  $LC$ -контур индуктивного датчика приближения, роль первичной обмотки трансформатора играет катушка индуктивности этого контура, роль вторичной обмотки – виток КПК, нагрузкой вторичной обмотки служит полное сопротивление КПК в замкнутом состоянии. Такой трансформатор может быть представлен эквивалентной схемой, изображенной на рисунке 2.

На эквивалентной схеме используются следующие обозначения:  $R_1$  – активное сопротивление катушки индуктивности колебательного контура типового датчика приближения;  $L_k$  – индуктивность катушки такого датчика;  $E$  – источник синусоидального напряжения частотой  $\omega$ ;  $L_{КПК}$  – индуктивность коммутируемого плоского контура;  $R_2$  – активное сопротивление плоского коммутируемого контура;  $S$  – аналоговый коммутатор;  $G$  – генератор управляющего напряжения  $Uc(t)$ , соответствующего сигнум-функции  $S_{gn}(t)$  тестового воздействия.

Обозначим:

$$\omega L_k = x_1, \quad (1)$$

$$\omega L_{КПК} = x_2, \quad (2)$$

$$R_2 = R_S + R_L + R_H, \quad (3)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – реактивные сопротивления катушек индуктивности датчика положения и КПК;  $R_S, R_L, R_H$  – активные сопротивления аналогового коммутатора  $S$ , катушки индуктивности  $L_{КПК}$  и нагрузки соответственно.

Используя метод контурных токов, составим систему уравнений:

$$\begin{aligned} R_1 \cdot \dot{I}_1 + jx_1 \cdot \dot{I}_1 - j\omega M \cdot \dot{I}_2 &= \dot{E} \\ R_2 \cdot \dot{I}_2 + jx_2 \cdot \dot{I}_2 - j\omega M \cdot \dot{I}_1 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Решая систему уравнений (4) относительно тока  $\dot{I}_1$  в контуре первичной обмотки трансформатора и соответственно в контуре типового индуктивного датчика приближения, получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{(R_1 + R_{\text{вн}}) + j(x_1 + X_{\text{вн}})}, \quad (5)$$

где  $R_{\text{вн}}$  и  $X_{\text{вн}}$  – внесенные в контур типового индуктивного датчика приближения активное и реактивное сопротивления, при этом  $R_{\text{вн}}$  и  $X_{\text{вн}}$  определяются как:

$$R_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + x_2^2} R_2, \quad (6)$$

$$X_{\text{вн}} = -\frac{\omega^2 M^2 \omega L_{КПК}}{(R_L + R_S + R_H)^2 + \omega^2 L_{КПК}^2}. \quad (7)$$

Известна формула для определения индуктивности плоского одновиткового контура с внутренним радиусом  $r_2$  и диаметром провода  $d_n$  [7], которая может быть применена для определения индуктивности  $L_{КПК}$  КПК:

$$L_{КПК} = \mu_0 \int_0^\pi \frac{(r_2 + \frac{d_n}{2})r_2 \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{(r_2 + \frac{d_n}{2})^2 + r_2^2 - 2r_2(r_2 + \frac{d_n}{2}) \cos \varphi}}. \quad (8)$$

Однако, вычисление индуктивности  $L_{КПК}$  КПК по данной формуле затруднительно, поэтому воспользуемся другой более простой формулой, позволяющей определить индуктивность кольцевого контура из провода круглого сечения с достаточно хорошим приближением:

$$L_{КПК} = \mu_0 R (\ln \frac{8R}{r_n} - 2), \quad (9)$$

где  $R$  и  $r_n$  – радиусы кольцевого контура и провода соответственно.

Зависимость  $L_{КПК}$  от радиуса витка КПК приведена на рисунке 3 для значений радиуса  $r_n$  проводника контура – 0,5 и 0,8 мм.

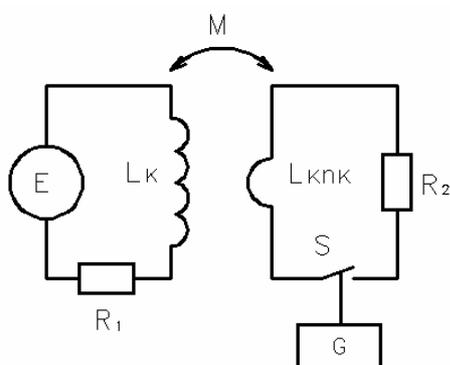


Рисунок 2 – Эквивалентная схема трансформатора, поясняющая взаимодействие типового индуктивного датчика приближения и КПК

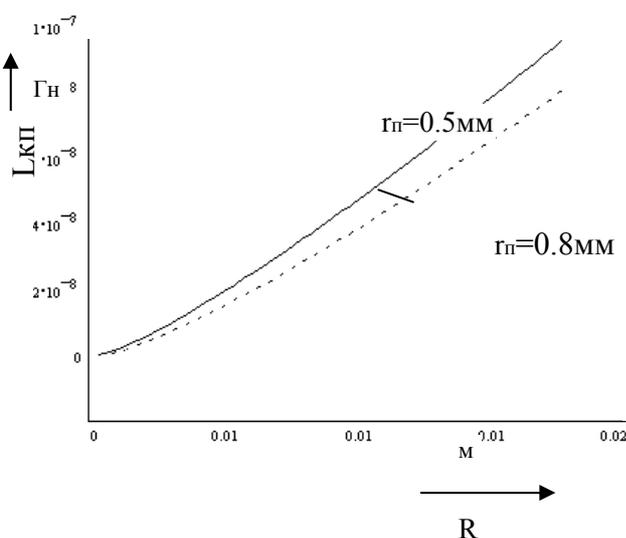


Рисунок 3 – Зависимость  $L_{КПК}$  от радиуса КПК

Взаимная индуктивность  $M$  коммутируемого плоского контура и катушки индуктивности без магнитного экрана, соосно-расположенных на расстоянии  $X$  друг от друга, определяется соотношением [8]:

$$M = M_{X+A} - M_X \quad (10)$$

где  $M_{X+A}$  – взаимная индуктивность катушки длиной  $X + A$  и плоского контура, лежащего в его торцевой плоскости;  $M_X$  – то же для катушки длиной  $X$ , при этом предполагается, что обе катушки имеют такое же число витков на длину, что и катушка длиной  $A$ .

Каждая из взаимных индуктивностей  $M_{X+A}, M_X$  определяется по формуле:

$$M = \frac{\mu_0 n \sqrt{Dd}}{4} \left\{ \left[ 1 + \frac{3}{4}\gamma^2 - \frac{15}{16}\gamma^4 + \frac{35}{256}\gamma^6 + \frac{\alpha^2}{4} \left( 1 - \frac{5}{8}\gamma^2 + \frac{35}{64}\gamma^4 \right) - \frac{3}{64}\alpha^4 \left( 1 - \frac{7}{4}\gamma^2 \right) + \frac{5}{256}\alpha^6 \dots \right] \ln \frac{16}{\gamma^2 + \alpha^2} - 2 \frac{\gamma}{\alpha} \left( 1 + \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma^4}{8} + \frac{\gamma^6}{16} \right) \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\gamma} + \right. \quad (11)$$

$$\left. + \left( -2 + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{15}{64}\gamma^4 - \frac{151}{768}\gamma^6 \right) + \alpha^2 \left( \frac{\gamma^2}{4} - \frac{209}{768}\gamma^4 \right) + \alpha^4 \left( \frac{5}{64} - \frac{43}{256}\gamma^2 \right) - \frac{31}{768}\alpha^6 \dots \right\}$$

где  $\alpha = \frac{A}{\sqrt{Dd}}$ ,  $\gamma^2 = \frac{(1-\delta)^2}{4\delta}$ ,  $\delta = \frac{d}{D}$ .

Так как катушка индуктивности колебательного контура датчика приближения имеет ферритовый открытый чашеобразный сердечник, то аналитическое описание взаимной индуктивности  $M$  катушки колебательного контура датчика и КПК представляется весьма сложным. В то же время степень взаимодействия катушек индуктивности  $L_k$  датчика положения и  $L_{КПК}$  КПК, то есть их взаимная индуктивность  $M$ , может быть определена с помощью коэффициентом их связи  $\kappa_{св}$  [9]:

$$\kappa_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_k L_{КПК}}}, \text{ а} \quad (12)$$

$$M = \kappa_{св} \sqrt{L_k L_{КПК}}. \quad (13)$$

Коэффициент связи  $\kappa_{св}$  может быть определен экспериментальным путем, его значение зависит только от размеров катушек индуктивности и расстояния между ними и не зависит от числа витков и типа намотки, при этом  $\kappa_{св} \leq 1$ . На рис.4 представлена зависимость  $\kappa_{св}$  от расстояния  $X$ , полученная экспериментально для макетного образца фазогенераторного датчика приближения.

Используя выражения (2) и (13), соотношение (6) можно записать в виде:

$$R_{вн} = \frac{\omega^2 \kappa_{св}^2 R_2 L_k L_{КПК}}{R_2^2 + \omega^2 L_{КПК}^2}. \quad (14)$$

Зависимость значения внесенного сопротивления  $R_{вн}$  от коэффициента связи  $\kappa_{св}$ , рассчитанная для параметров макетного образца фазогенераторного датчика приближения, представлена на рисунке 5.

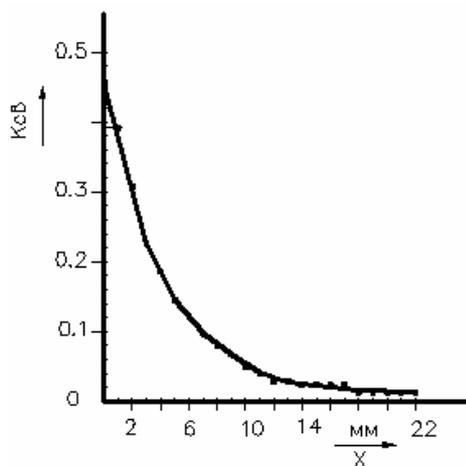


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента связи от расстояния  $X$

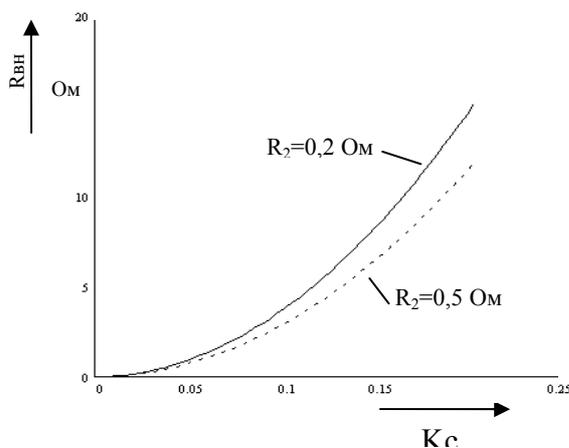


Рисунок 5 – Зависимость внесенного сопротивления  $R_{вн}$  от коэффициента связи  $\kappa_{св}$

Характер изменения функции  $R_{вн} = f(R_2)$  при прочих параметрах, соответствующих макетному образцу фазогенераторного датчика приближения, представлен на рисунке 6. Из графика на рисунке 6 видно, что функция  $R_{вн} = f(R_2)$  имеет максимум. Исследование этой функции на экстремум путем приравнивания ее первой производной по аргументу  $R_2$  нулю и последующего решения относительно  $R_2$  показывает, что максимум функция принимает при:

$$R_2 = \omega L_{КПК}. \quad (15)$$

На рисунке 7, представлена функция  $R_{вн} = f(R_2)$  в области изменений аргумента, близкой к экстремуму функции.

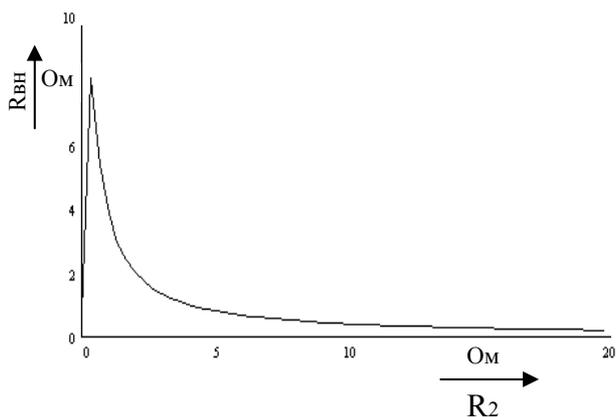


Рисунок 6 – Зависимость значения внесенного сопротивления  $R_{вн}$  от сопротивления КПК

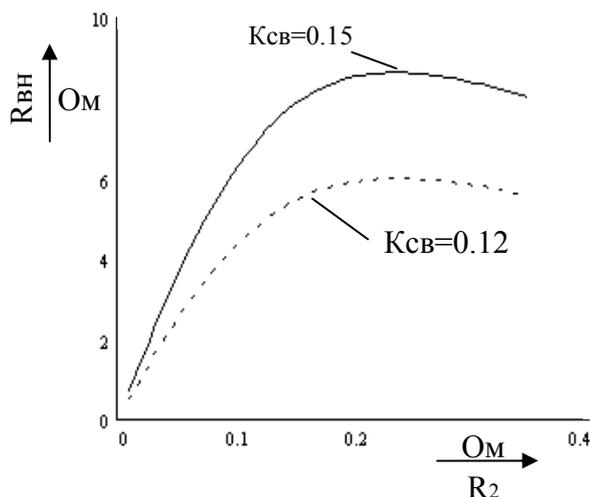


Рисунок 7 – Поведение функции  $R_{вн} = f(R_2)$  в зоне максимума

Из (14) следует, что оптимальное значение  $R_2$  при фиксированном значении коэффициента связи  $\kappa_{св}$  определяется частотой автогенератора датчика и индуктивностью КПК.

Сопоставим результаты определения максимальной частоты срабатывания фазогенераторного датчика приближения механическим методом и методом КПК. Тестовая токопроводящая пластина (ТТП), применяемая при механическом методе выполняется из стали и представляет собой квадрат со стороной, равной диаметру  $D$  исследуемого датчика. При взаимодействии с колебательным контуром датчика приближения ТТП вносит в его контур активное сопротивление и вызывает срабатывание электронной схемы датчика. Приблизительно сопротивление ТТП может быть определено из соотношения [9]:

$$R_{ТТП} = \rho\pi \frac{D}{l\theta}, \quad (16)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала ТТП;  $l$  – длина пути контурного тока;  $\theta$  – глубина проникновения тока в материале ТТП.

Значение  $\theta$  (в см) может быть определено по формуле [10]:

$$\theta = 50.3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (17)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $f$  – частота автогенератора индуктивного датчика.

Сопротивление КПК в соответствии с (3) является суммой сопротивлений:  $R_L$  – собственно кругового контура,  $R_S$  – коммутатора и  $R_H$  – нагрузки. Выше было установлено, что максимальное значение внесенного сопротивления  $R_{вн}$  в колебательный контур датчика приближения осуществляется при небольшом по значению общем сопротивлении КПК, поэтому сопротивление  $R_H$  можно принять равным нулю. Сопротивление  $R_L$  кругового контура определяется сопротивлением отрезка медного провода, составляющего собственно контур КПК радиусом  $R$ :

$$R_L = \frac{8R\rho}{d_n^2}. \quad (18)$$

Учитывая, что диаметр КПК принят равным диаметру катушки индуктивности датчика, т.е.  $2R = D$ , получим:

$$R_L = \frac{4D\rho}{d_n^2}. \quad (19)$$

Соотношение сопротивлений  $R_L$  и  $R_{ТПП}$  равно:

$$\frac{R_L}{R_{ТПП}} = \frac{4B\rho}{d_n^2} \frac{l\theta}{\pi\rho D} = \frac{4l\theta}{d_n^2}. \quad (20)$$

Подставляя в (20) реальные значения параметров соответствующих макетному образцу фазогенераторного датчика приближения, например  $d_n = 1$  мм,  $\theta = 0.02$  мм,  $l = 18$  мм, получим численное значение отношения (20), равное 1.44. Это значение отношения свидетельствует о том, что значения сопротивлений  $R_L$  и  $R_{ТПП}$ , определяемых выражениями (16) и (19), являются величинами одного порядка и в конкретном расчете достаточно близки даже с учетом принятых допущений. Отсюда следует требование к значению сопротивления коммутатора  $R_S$  в замкнутом состоянии – оно должно быть минимальным.

Полученные результаты могут быть применены при разработке и реализации полностью электронных (не содержащих перемещаемых тестовых механических элементов) технических средств определения максимальной частоты срабатывания индуктивных датчиков приближения, изготовленных как на основе традиционного схемотехнического подхода, так и на основе применения фазогенераторного принципа функционирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2036434, МПК G 01 D 5/22. Быстродействующий датчик приближения объекта./ Милюшин Н.Н., Клейменов В.Б.-Опубликован 27.05.1995, Бюл. № 15
2. Милюшин, Н.Н. Фазогенераторный индуктивный датчик приближения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - М., 2006. - №8-С.34-36.
3. TURCK / Sensors Catalog. - 1994.
4. Милюшин, Н.Н. Способ определения быстродействия датчика приближения токопроводящей среды посредством коммутируемого плоского контура // Известия ОрелГТУ. Серия Машиностроение. Приборостроение. - Орел, 2005. - № 3. - С.2-5.
5. Патент РФ № 2046362, МПК G 01 R 27/26. Способ определения максимальной частоты срабатывания индуктивного датчика приближения / Милюшин Н.Н., Клейменов В.Б.-Опубликован 20.10.1995, Бюл. № 29.
6. Белокур, И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П.Белокур, В.А.Коваленко.-Киев: Тэхника, 1989. - 171 с.
7. Немцов, М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 192 с.
8. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. - М.: Энергия, 1972. - 415 с.
9. Волгов, В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. -М.:Энергия, 1977.- 656 с.
10. Михлин, Б.З. Высоочастотные емкостные и индуктивные датчики. – М.: Госэнергоиздат, 1960. - 72 с.

**Милюшин Николай Николаевич**

инженер ООО «Лаборатория инженерных разработок», г. Калуга

Телефон: 8.(4842)541034

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

О.С. ПЕТРОВА

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

*Представлены результаты исследований динамических характеристик датчика температуры устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении.*

**Ключевые слова:** температура, устройство контроля и регулирования, датчик температуры, динамические характеристики.

*Results of researches of dynamic characteristics of the gauge of temperature of the device of the control and regulation of temperature of air in the room are submitted.*

**Key words:** temperature, the device of the control and regulation, the gauge of temperature, dynamic characteristics.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ОрелГТУ разработан датчик температуры [1-2] для устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении. Датчик отличается малой величиной гистерезиса, незначительной неравномерностью статической характеристики при прямом и обратном ходе и увеличенным по сравнению с аналогичными датчиками температурой ходом штока [3].

С целью изучения динамических характеристик разработанного датчика температуры в устройстве контроля и регулирования и эффективности работы устройства в системе управления температурой воздуха в помещении возникла необходимость в проведении экспериментальных исследований по определению переходной характеристики датчика температуры, а также проведении анализа устойчивости и управляемости системы управления температурой воздуха в помещении. Результаты исследований приведены в настоящей работе.

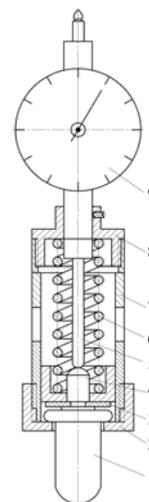
### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

**Объектом** экспериментальных исследований являлся опытный образец датчика температуры устройства контроля и регулирования [1, 2]. Устройство имеет рабочий диапазон температур от 18 до 25 °С и ход штока 9,3 мм.

**Контрольно-измерительное оборудование.** Для проведения исследований использовался индикатор часового типа ИЧ 10 (предел допускаемой погрешности – 0,01 мм), секундомер типа СОПпр-2а-3-000 (предел допускаемой погрешности – 1,8 с), два термометра технических ртутных прямых типа ТПП (предел допускаемой погрешности 1 °С) и специальное приспособление для определения хода штока датчика температуры (рисунок 1), которое состоит из датчика 1, закрепленного к приспособлению гайкой 2, штока 4, соединенного с плунжером 5, размещенным в корпусе 7. Ход штока датчика температуры 1 ограничен стопорной шайбой 3. На плунжер 5 воздействует пружина 6, причем при полностью закрученных гайках 2 и 8 обеспечивается усилие предварительного поджатия 45 Н. Перемещение штока контролируется индикатором часового типа 9.

#### Алгоритм проведения исследований.

Исследования переходной характеристики датчика температуры проводились в два этапа. На первом этапе определялась переходная характеристика прямого хода штока датчика температуры, на втором этапе – переходная характеристика обратного хода штока датчика температуры.



**Рисунок 1 – Приспособление для определения хода штока датчика температуры**

1 – датчик температуры; 2, 8 – гайка; 3 – стопорная шайба; 4 – шток датчика температуры; 5 – плунжер; 6 – пружина; 7 – корпус; 9 – индикатор часового типа

Алгоритм проведения исследований переходной характеристики прямого хода датчика температуры следующий:

- приспособление с датчиком температуры выдерживалось в помещении с температурой воздуха 18 °С в течение 30 мин, после чего с помощью гайки 2 штока датчика температуры вводился в соприкосновение с плунжером индикатора часового типа;
- приспособление с датчиком температуры помещалось в помещение с температурой воздуха 25 °С и закреплялось на штативе, момент внесения приспособления с датчиком температуры в помещение считался нулевой точкой отсчета времени;
- измерение хода штока производилось каждые 30 с. Когда ход штока достигал установившегося значения, процесс измерения прекращался.

Алгоритм проведения исследования переходной характеристики обратного хода датчика температуры заключался в следующем:

- приспособление с датчиком температуры выдерживалось в помещении с температурой воздуха 25 °С в течение 30 мин, после чего с помощью гайки 2 штока датчика температуры вводился в соприкосновение с плунжером индикатора часового типа;
- приспособление с датчиком температуры переносилось в помещение с температурой воздуха 18 °С и закреплялось на штативе, момент внесения приспособления с датчиком температуры в помещение считался нулевой точкой отсчета времени;
- измерение хода штока производилось каждые 30 с. Когда ход штока достигал установившегося значения, процесс измерения прекращался.

**Результаты экспериментальных исследований.**

В результате экспериментальных исследований получено пять переходных характеристик прямого хода (рисунок 2а) и обратного хода (рисунок 3а) штока датчика температуры, а также построена средняя переходная характеристика прямого (рисунок 2б) и обратного хода штока датчика температуры (рисунок 3б).

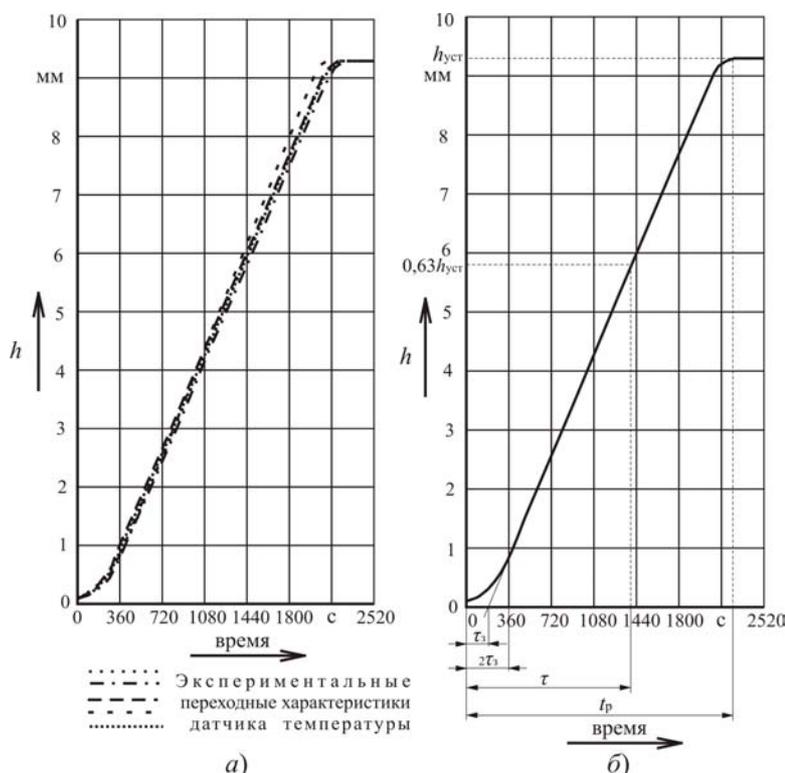


Рисунок 2 – Экспериментальные (а) и средняя (б) переходные характеристики для прямого хода штока датчика температуры

На рисунках  $h_{уст}$  – установившееся значение хода штока;  $\tau_3$  – время запаздывания;  $\tau$  – постоянная времени для уровня 63,7%;  $t_p$  – время регулирования.

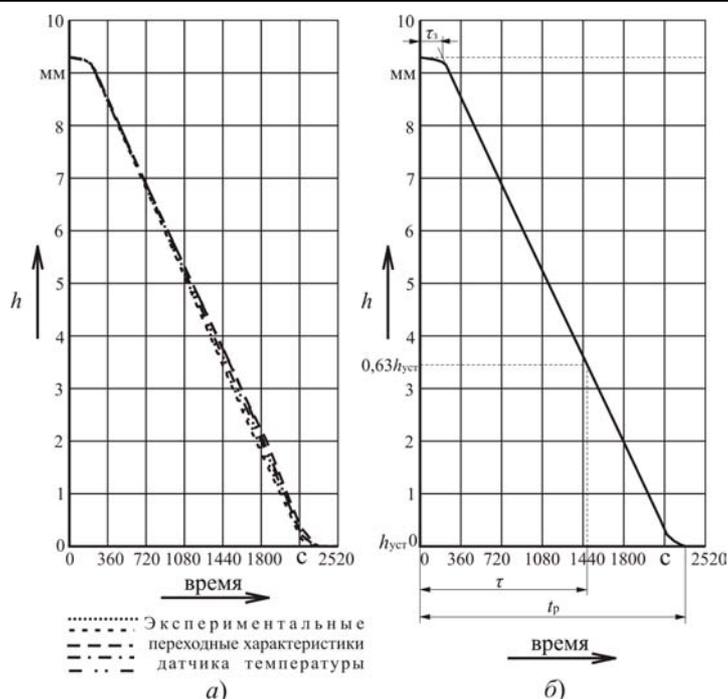


Рисунок 3 – Экспериментальные (а) и средняя (б) переходные характеристики для обратного хода штока датчика температуры

### АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ полученных экспериментальных данных проводился по следующим направлениям:

- оценивались динамические характеристики прямого и обратного хода штока датчика температуры;
- анализировалась динамика работы устройства контроля и регулирования в помещении, оборудованном однотрубной системой отопления.

#### *Анализ частных динамических характеристик датчика температуры.*

Переходная характеристика является полной динамической характеристикой и определяет свойства датчика температуры.

Важной для описания объекта является частная динамическая характеристика – постоянная времени объекта, которая определялась по переходной характеристике для порогового уровня 63,7% от установившегося значения хода штока  $h_{уст}$  [4]. Установлено, что постоянная времени датчика температуры для прямого хода  $\tau = 1410$  с, а для обратного хода  $\tau = 1470$  с. По переходной характеристике определялись также время регулирования  $t_p$  и время запаздывания  $\tau_3$ . Установлено, что для прямого хода  $t_p = 2310$  с,  $\tau_3 = 180$  с, а для обратного хода  $t_p = 2340$  с,  $\tau_3 = 240$  с.

Анализ переходной характеристики показывает, что ход штока изменяется нелинейно в течение времени  $2\tau_3$ , после чего его изменение происходит с постоянной скоростью. Таким образом, при прямом ходе штока датчика температуры линейная характеристика начинается после 360 с, а для обратного хода после 480 с.

Полученные данные в сравнении с метрологическими характеристиками ближайшего аналога (датчик типа ТД 5, выпускаемый ЗАО «ОРЛЭКС») позволяют сделать следующие выводы:

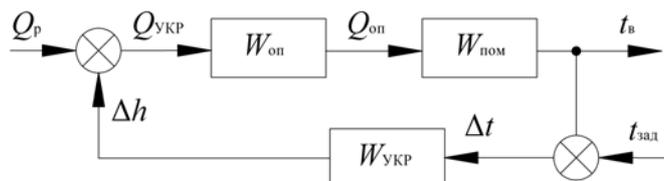
- динамические характеристики предложенного датчика при прямом и обратном ходе различны, при этом характеристики прямого хода лучше аналогичных характеристик обратного хода: постоянная времени и время запаздывания при прямом ходе меньше, соответственно на 5 % и на 25 %).

– динамические характеристики предложенного датчика лучше, чем у аналога, в среднем на 18,3 % (постоянная времени меньше на 330 с);

**Анализ динамики работы устройства контроля и регулирования в отапливаемом помещении, оборудованном однотрубной системой отопления.**

Устройство контроля и регулирования устанавливается по СНиП 41-01-2003 у отопительного прибора с целью контроля и регулирования температуры воздуха в помещении. Устройство осуществляет активный командный контроль, суть которого заключается в непосредственном воздействии датчика температуры на клапан регулирующего органа, изменяющего расход теплоносителя через отопительный прибор.

Структурная схема контроля и регулирования температуры воздуха в помещении, оборудованном устройством контроля и регулирования, представлена на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Структурная схема контроля и регулирования температуры воздуха в отапливаемом помещении, оборудованном устройством контроля и регулирования**

$W_{оп}$  - передаточная функция отопительного прибора;  $W_{пом}$  - передаточная функция помещения;  $W_{укр}$  - передаточная функция устройства контроля и регулирования;  $Q_p$  - расчетное количество тепловой энергии, подаваемое на вход в отопительный прибор;  $Q_{укр}$  - количество тепловой энергии потока теплоносителя, поступающее в отопительный прибор после устройства контроля и регулирования;  $Q_{оп}$  - количество тепловой энергии, поступающее в помещение от отопительного прибора;  $t_в$  - температура воздуха в помещении;  $t_{зад}$  - температура воздуха в помещении, задаваемая ручкой настройки устройством контроля и регулирования;  $\Delta t$  - разность между температурой воздуха в помещении и температурой в помещении, задаваемой ручкой настройки устройством контроля и регулирования;  $\Delta h$  - перемещение штока датчика температуры устройства контроля и регулирования

Температура воздуха в помещении определялась расчетным количеством тепловой энергии, поступающим от отопительного прибора. У отопительного прибора установлено устройство контроля и регулирования. При превышении фактической температуры заданного значения (по шкале настройки устройства контроля и регулирования) температура датчика повышалась на величину, в результате чего формировался управляющий сигнал, уменьшающий количество тепловой энергии, поступающей в отопительный прибор. Теплоотдача отопительного прибора уменьшалась, в результате чего уменьшалась температура воздуха в помещении. При понижении температуры происходил обратный процесс.

Объектом управления является помещение, оборудованное устройством контроля и регулирования.

Для исследования системы управления температурой воздуха в помещении применялся операторный метод [4]. Согласно этому методу отопительный прибор, помещение, устройство контроля и регулирования описываются передаточными функциями:

$$W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{\tau_{оп} \cdot p + 1}; \quad W_{пом}(p) = \frac{k_{пом}}{\tau_{пом} \cdot p + 1}; \quad W_{укр}(p) = \frac{k_{укр}}{\tau_{укр} \cdot p + 1}, \quad (1)$$

где  $k_{оп}$ ,  $k_{пом}$ ,  $k_{укр}$  – коэффициенты передачи отопительного прибора, помещения, устройства контроля и регулирования соответственно;

$\tau_{оп}$ ,  $\tau_{пом}$ ,  $\tau_{укр}$  – постоянные времени отопительного прибора, помещения, устройства контроля и регулирования соответственно;

Передаточная функция системы (рисунок 4) равна:

$$W(p) = \frac{W_{\text{оп}}(p) \cdot W_{\text{пом}}(p)}{1 + W_{\text{оп}}(p) \cdot W_{\text{пом}}(p) \cdot W_{\text{укр}}(p)} \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), после преобразования получим обобщенное выражение передаточной функции в операторной форме:

$$W(p) = [k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{пом}} \cdot (1 + \tau_{\text{укр}} \cdot p)] / \left[ \begin{array}{l} \tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{пом}} \cdot \tau_{\text{укр}} \cdot p^3 + (\tau_{\text{пом}} \cdot \tau_{\text{укр}} + \\ \tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{укр}} + \tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{пом}}) p^2 + (\tau_{\text{оп}} + \tau_{\text{пом}} + \\ + \tau_{\text{укр}}) p + k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{пом}} \cdot k_{\text{укр}} + 1 \end{array} \right] \quad (3)$$

Проведем анализ устойчивости замкнутой системы по критерию Михайлова. Характеристическое уравнение системы:

$$\tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{пом}} \cdot \tau_{\text{укр}} \cdot p^3 + (\tau_{\text{пом}} \cdot \tau_{\text{укр}} + \tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{укр}} + \tau_{\text{оп}} \cdot \tau_{\text{пом}}) p^2 + (\tau_{\text{оп}} + \tau_{\text{пом}} + \tau_{\text{укр}}) p + k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{пом}} \cdot k_{\text{укр}} + 1 = 0 \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим помещение, оборудованное устройством контроля и регулирования, в котором постоянные времени отопительного прибора и отапливаемого помещения равны:  $\tau_{\text{оп}} = 0,5$  ч,  $\tau_{\text{пом}} = 2,5$  ч,  $k_{\text{оп}} = 0,7$ ,  $k_{\text{пом}} = 1$ ,  $k_{\text{укр}} = 1,3$ . Постоянная времени датчика температуры получена экспериментально и равна  $\tau_{\text{укр}} = 0,4$  ч. Подставив указанные значения в уравнение (4), получим:

$$0,5 \cdot p^3 + 2,45 \cdot p^2 + 0,5 \cdot p + 1,91 = 0 \quad (5)$$

Для построения годографа Михайлова заменим оператор  $p$  на  $j\omega$ :

$$0,5 \cdot (j\omega)^3 + 2,45(j\omega)^2 + 0,5 \cdot (j\omega) + 1,91 = 0 \quad (6)$$

После преобразований и деления на действительную и мнимую части получим выражения:

$$P(\omega) = 2,45\omega^2 - 1,91; \quad (7)$$

$$jQ(\omega) = 0,5\omega - 0,5\omega^3 \quad (8)$$

Находим точки пересечения годографа с действительной и мнимой осью. Изменяя  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , строим годограф Михайлова (рисунок 5).

Из рисунка 5 видно:

– годограф Михайлова начинается на действительной положительной полуоси и при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  в направлении против часовой стрелки пересекает три квадранта, следовательно, система управления является устойчивой;

– критический коэффициент усиления равен  $k_{\text{макс}} = 2,4$ .

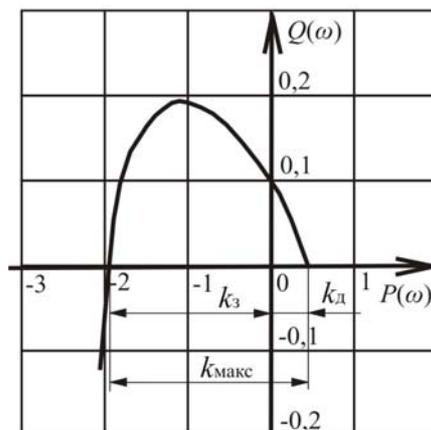


Рисунок 5 – Годограф Михайлова для исследуемой системы

$k_з$  - коэффициент запаса;  $k_д$  - действительный коэффициент усиления;

$k_{\text{макс}}$  - критический коэффициент усиления

*Управляемость системы (s)*. Оценка управляемости системы, представленной на рисунке 4, производится по формуле[4]:

$$s = \tau_{\text{УКР}} / \tau_{\text{ПОМ}} . \quad (9)$$

Учитывая, что  $s = 0,16$  (находится в пределах от 0,1 до 0,2), можно сделать вывод о хорошей управляемости системы.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате экспериментальных исследований получена переходная характеристика для предложенного датчика температуры, с помощью которой определены его частные (отдельные) динамические характеристики (постоянная времени и время запаздывания) при прямом и обратном ходе.

Исследования системы управления температурой воздуха в помещении, оборудованном предложенным устройством контроля и регулирования, выполненные операторным методом, подтвердили устойчивость системы по критерию Михайлова (критический коэффициент усиления составил  $k_{\text{макс}} = 2,4$ ) и хорошую ее управляемость ( $s = 0,16$ ).

### **ЛИТЕРАТУРА**

1 Патент № 75065 РФ на полезную модель МПК G 05 В 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.07.2008, Бюл. № 20.

2 Патент № 79192 РФ на полезную модель МПК G 05 В 23/00 Датчик температуры / К.В. Подмастерьев, С.П. Петров, О.С. Петрова. – Оpubл. 20.12.2008, Бюл. № 35.

3 Подмастерьев, К.В. Экспериментальные исследования статической характеристики датчика температуры устройства контроля и регулирования температуры воздуха в помещении лечебно-профилактического учреждения / К.В. Подмастерьев, О.С. Петрова // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ, 2008, № 2. – С. 71-76.

4 Бекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Изд-во "Профессия", 2003. – 752 с.

#### **Петрова Ольга Сергеевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирантка кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"

Тел. (4862) 419876

E-mail: E-mail: [lavanda777@bk.ru](mailto:lavanda777@bk.ru)

А.В. ИЗОТОВ, А.В. ПОЛОВИНКИН

**АКУСТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА УТЕЧЕК ВОДЫ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*Рассмотрена задача точного определения места повреждения подземных трубопроводов. Показано, что наиболее эффективным является использование акустического прибора со специальными датчиками для разных грунтов. Представлена функциональная схема прибора и конструктивная проработка датчиков.*

**Ключевые слова:** подземный трубопровод; место повреждения; акустический прибор; датчики для разных грунтов.

*Reviewed a question of locating leaks from the underground pipelines. Stated that the application of acoustic device with special sensors for various soils is the most effective method. Presented the schematic diagram of the structure of sensors.*

**Key words:** underground pipeline; locating leak; acoustic device; sensors for various soils.

Наряду с существенными потерями воды при эксплуатации инженерных систем и оборудования существенную роль играют потери при транспортировке, которые значительно возрастают с каждым годом. При этом основная причина кроется в состоянии подземных коммуникаций. Система современных трубопроводных коммуникаций несовершенна. В них по прежнему преобладают недолговечные металлические трубы (в среднем по России 70 %). Уже через 5-10 лет они начинают терять герметичность и пропускную способность. Как следствие, уровень износа основных фондов отрасли водо-канализационного хозяйства в последнее время достиг более 40 %, 300 тыс. км трубопроводов (в целом по России) нуждаются в срочном капитальном ремонте, а более 50 000 км подлежат замене из-за аварийного состояния. По расчетам специалистов при сохранении нынешних темпов ремонта в XXI веке инженерные сети ЖКХ будут изношены до 70 % и более, потери воды возрастут до 60 %, и стоимость жилищно-коммунальных услуг возрастет в 2-2,5 раза.

Так только стоимость ежегодных потерь холодной воды в трубопроводах по России оценивается свыше 80 млрд. рублей, а если к этим потерям прибавить свыше 140 млрд. рублей дополнительных затрат электроэнергии на перекачку воды, то величина потерь становится сопоставимой с размерами федерального бюджета.

Опытным путем подтверждено, что ухудшение работы систем водоснабжения, построенных из металлических труб, связано главным образом с зарастанием внутренней поверхности труб и потерей воды вследствие сквозных коррозионных повреждений трубопровода.

Возникновение в стенках трубопровода сквозных отверстий (вследствие коррозии и блуждающих токов) приводит к большим потерям транспортируемой воды, ибо только через одно отверстие диаметром 3 мм при давлении воды в трубопроводе  $5 \cdot 10^5$  Па. Теряется более 13 куб. м воды в сутки.

Для снижения потерь ресурсов при транспортировке особенно важным является знание состояния водопроводных сетей, необходимость и срочность замены отдельных участков трубопровода, оперативное обнаружение места повреждения трубопровода и его ремонта. Для успешного решения этих задач обязательным условием является наличие у предприятий жилищно-коммунального хозяйства соответствующего приборного оборудования.

Основными требованиями, предъявляемыми к приборам течеискания должны быть:

- прибор должен быть переносным;
- прибор должен быть простым в работе;
- прибор должен быть помехоустойчив к окружающему производственному шуму;
- прибор должен обладать чувствительностью, достаточной для определения повреждения в трубопроводе, находящемся на глубине 6 м;

- прибор должен быть надежен в работе;
- прибор должен иметь рабочий диапазон температур от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Прибор для определения мест утечек воды в подземных трубопроводах должен работать в условиях наличия высокого уровня акустических помех (шум городского транспорта, производственные шумы предприятий). Помехоустойчивость от внешних шумов может быть повышена за счет конструктивных решений.

На рисунке 1 представлена функциональная схема разработанного прибора, который конструктивно выполнен в виде электронного блока и двух датчиков (датчика для мягкого грунта и датчика для твердого грунта), соединенных кабелем.

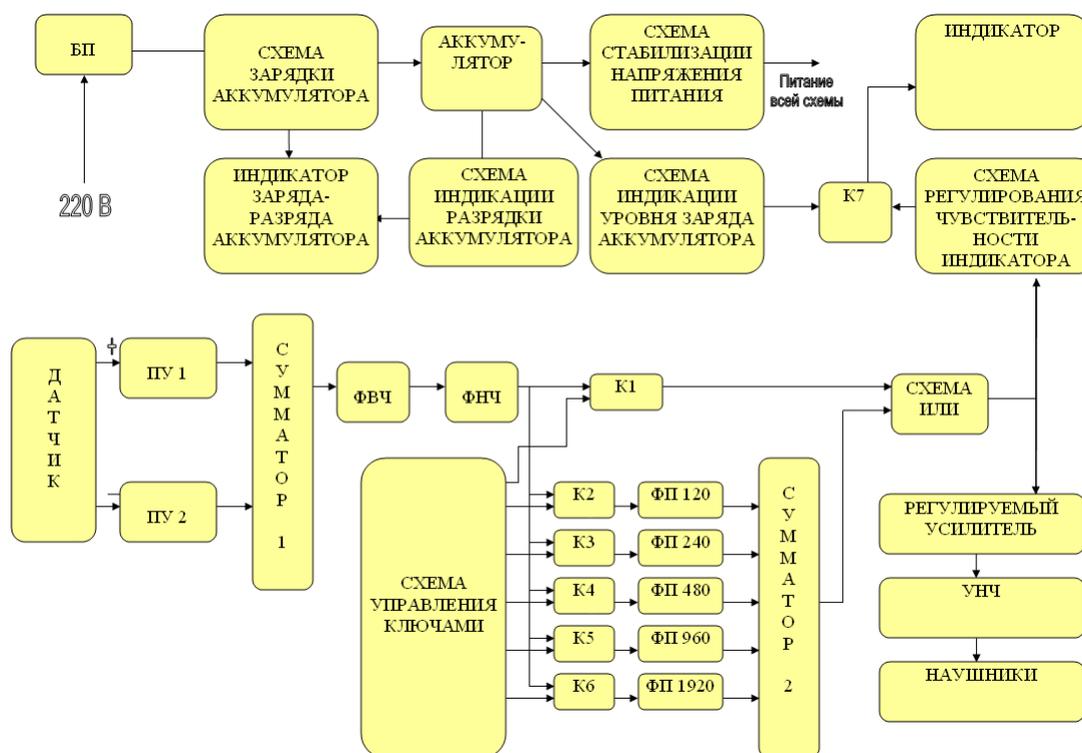


Рисунок 1 – Функциональная схема прибора для определения места утечек воды

Прибор представляет собой последовательное соединение пьезоэлектрического преобразователя, предварительного усилителя, блока полосовых фильтров, окончного усилителя и схемы индикации. Преобразователь находится в корпусе, который является для него экраном от электромагнитных помех и различных акустических шумов. Пьезоэлектрический преобразователь, выполненный из пьезокерамики, преобразует механические колебания грунта в электрический сигнал, который после предварительного усиления поступает на блок фильтров и затем на окончный усилитель. Предварительный усилитель выполнен по дифференциальной схеме. Сигнал с предварительного усилителя через фильтры низких и высоких частот (ФНЧ и ФВЧ) поступает на окончный усилитель либо непосредственно, либо через любой из пяти полосовых фильтров с центральными частотами 120, 240, 480, 960, 1920 Гц. Коэффициент усиления окончного усилителя может изменяться при помощи регулятора. Сигнал с выхода окончного усилителя поступает на головные телефоны, для непосредственного прослушивания шумов оператором. Кроме того сигнал с выхода фильтров поступает на линейный светодиодный индикатор, чувствительность которого может быть изменена при помощи регулятора.

Акустический сигнал с датчика поступает на блок предварительного усилителя ПУ1 и ПУ2 (рисунок 1). После ПУ1 и ПУ2 сигнал проходит суммирование и поступает на систему ФВЧ, ФНЧ полосовых фильтров (ПФ). В качестве ФВЧ использован двоянный фильтр:

фильтр Баттерворта (ФБ) второго порядка и полосовой фильтр Чебышева второго порядка на частоте среза ФБ. Для ФНЧ использован фильтр Чебышева второго порядка. В качестве полосовых фильтров использованы активные фильтры, построенные на основе на полосовых фильтров Чебышева второго порядка. Структура фильтров одинакова, отличие состоит в настройке последних на разные центральные частоты. ФВЧ и ФНЧ являются активными фильтрами. Активный РС – фильтр верхних частот реализован на операционном усилителе обеспечивает ослабление выходного сигнала на половине частоты среза не менее 52 дБ относительно уровня выходного сигнала частотой среза. Достоинства ФВЧ – простота конструкции, легкость настройки, устойчивость в работе. К недостаткам же можно отнести тот факт, что крутизна спада амплитудно-частотной характеристики на частоте ниже  $0,5f_{cl}$  не превышает 6...12 дБ на октаву. ФВЧ состоит из РС – звена верхних частот второго порядка, заграждающего фильтра, нагруженного резисторами и корректирующих резисторов.

Для очистки полезного сигнала от посторонних шумов необходимо иметь несложный ФНЧ с большой крутизной спада АЧХ за частотой среза. Такой фильтр реализован из ФНЧ второго порядка и заграждающего фильтра с использованием всего лишь одного операционного усилителя. На удвоенной частоте среза такой фильтр обеспечивает при оптимальном выборе частоты заграждения ослабление выходного сигнала не менее 43 дБ. К достоинствам такого фильтра относится простота и легкость в налаживании, устойчивость в работе.

Внешний вид датчика для твердого грунта представлен на рисунке 2.

Продольная волна, образуемая в жестком грунте при прохождении акустических сигналов создает помехи, имеющие амплитуду, соизмеримую, а в отдельных случаях превышающую полезный сигнал. Для устранения влияния продольной волны на основании корпуса закреплено резиновое кольцо 4, играющее роль демпфера. Пьезодатчик 2, состоящий из пяти пьезопластин, размещенных внутри металлического цилиндра, включенных акустически последовательно, а электрически параллельно, акустически развязан от корпуса при помощи резиновой мембраны 7. Диаграмма направленности пьезодатчика формируется за счет специального наконечника 3, закрепленного на штоке 8. Корпус 1 выполнен из металла или ударопрочного полистирола и играет роль акустического экрана ( $\rho_{ск} > \rho_{возд}$ ). К корпусу прикреплена ручка 6, акустически развязанная от корпуса 1 резиновой прокладкой 5.

Внешний вид датчика для мягкого грунта представлен на рисунке 3

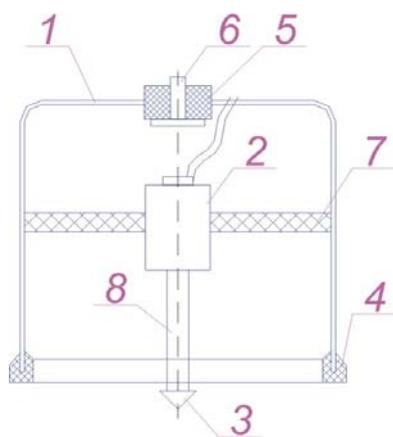


Рисунок 2 – Датчик для твердого грунта

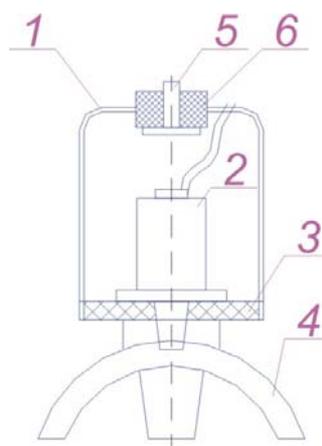


Рисунок 3 – Датчик для мягкого грунта

Отличие в конструкции датчика для мягкого грунта от датчика для твердого грунта вызвано отсутствием продольной волны акустического сигнала. Сигнал распространяется с большим затуханием. Поэтому основная задача – увеличение площади, с которой может восприниматься сигнал. Приемник 4 преобразователя 2 выполнен в виде треноги, что эквивалентно приему сигнала с плоскости, а диаграмма направленности формируется за счет

эллипсности внутренней поверхности приемника 4. Грани приемника 4 имеют специальную конструкцию, позволяющую датчику не воспринимать сигналы от внешних помех и в совокупности с эллипсностью иметь направленную вниз диаграмму направленности. От внешних шумов преобразователь 2 защищен экраном 1. Сам преобразователь 2 развязан с корпусом при помощи резинового демпфера 6. Ручка акустически изолирована.

Данные датчики применяются в приборе ПТ 14 МВ. Приборы применяются для точного определения места повреждения в водоканалах г. Челябинска, Копейска, Магнитогорска, Краснодара и зарекомендовали себя, как надежный и простой в работе прибор.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т 2: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филинов, А.В.Изотов и др.; Под. Ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
3. Изотов, А.В Повышение чувствительности акустических приборов течеискания / А.В. Изотов, А.В Половинкин, Ю.А. Кондратьев // Тезисы доклада, 3-я международной конференции «Диагностика трубопроводов». – М., 2001.

### **Изотов Алексей Викторович**

аспирант кафедры «Электротехника и электроника» МГУПИ

### **Половинкин А.В.**

канд. техн. наук., г.н.с., ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», г. Москва

Телефон 8-916-568-59-76

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

В. Г. ЛИСИЧКИН, С. Н. ШВЕДОВ

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДВУХКОНТУРНЫЕ  
УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ**

*Для повышения чувствительности цифровых влагомеров, применяемых для измерения влажности почвы, предлагается включать емкостные преобразователи в колебательные контуры и выполнять следящую подстройку частоты возбуждающего сигнала до момента изменения разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами преобразователей и измерять резонансную частоту.*

**Ключевые слова:** влажность почвы, емкостный преобразователь, измерение резонансной частоты.

*For increase of digital measuring devices sensitivity, for meter of relative soil humidity to use, to propose a capacitive transformer in oscillatory circuit inclusion and following frequency adjustment of actuating signal to moment of difference in phase change between actuating and output signals of transformers and resonance frequency to measure.*

**Key words:** relative soil humidity, capacitive transformer, resonance frequency measuring.

При контроле влажности почвы широкое применение находят диэлькометрические методы. Чаще всего в основе этих методов лежит использование измерительных приборов (ИП) с первичным измерительным преобразователем в виде емкостного датчика. Изменение диэлектрической проницаемости почвы, являющейся функцией влажности, приводит к соответствующему изменению емкости датчика, что изменяет резонансную частоту настройки контура, к которому подключен датчик. Благодаря точности, стабильности и высокой помехоустойчивости, характерным для частотных методов, существует возможность бесконтактного неразрушающего контроля свойств различных сред с использованием достаточно простых схемных решений. Большое значение для точности измерений имеет правильный выбор типа датчика, рабочей частоты и вида колебательной системы, а также методики измерений. При этом необходимо учитывать множество факторов, влияющих на точность измерений: частотную дисперсию электрических и магнитных свойств контролируемой среды, влияние электропроводности, солености, гранулометрического состава и плотности почвы, ее капиллярной структуры, температуры и т. д. Почва – это многокомпонентная среда, которая относится к несовершенным диэлектрикам, то есть обладает одновременно свойствами диэлектриков и проводников. Особый интерес представляет исследование вопросов достижения более высоких точности и стабильности измерений влажности в условиях повышенной электропроводности почвы. Наличие активных потерь, величина которых изменяется при различных значениях влажности и других перечисленных факторов, серьезно усложняет реализацию диэлькометрических методов. Это положение обусловлено следующими обстоятельствами:

1. При увеличении активных потерь диэлектрическая проницаемость, а, следовательно, и емкость датчика становятся функцией не только количества влаги в почве, но и ранее перечисленных сопутствующих факторов. При этом на значения резонансной частоты  $\omega_p$  рабочего контура оказывает влияние дополнительная погрешность, зависящая от угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в почве и добротности  $Q_L$  катушки индуктивности резонансного контура [1]:

$$\Delta\omega_p = \sqrt{(1 + \text{tg}^2\delta)/(1 + Q_L^2)}.$$

2. При увеличении потерь снижается добротность резонансного контура, что может привести к срыву колебаний автогенератора из-за невыполнения амплитудного условия самовозбуждения.

3. С ростом потерь ухудшается форма резонансной кривой – она становится более широкой и пологой, а ее максимум – расплывчатым, что уменьшает точность настройки резонанса и увеличивает погрешность измерения резонансной частоты.

Физическая природа диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь влажной почвы различна. Связь между этими параметрами зависит как от изменения влажности, так и от ряда трудно учитываемых ранее перечисленных факторов. В этих условиях очень важно для повышения точности измерений исключить или уменьшить влияние активной проводимости почвы на результаты измерения влажности.

Известные способы контроля влажности с помощью автогенераторных приборов характеризуются различными вариантами построения схем автогенераторов, выбора типов датчиков и используемой методики измерений. В частности, применяют способ контроля влажности, согласно которому емкостный датчик включен в одноконтурную или двухконтурную схему автогенератора [2]. Сигналом, пропорциональным измеряемой влажности почвы, является амплитуда высокочастотного напряжения резонансного контура. Основным недостатком этого способа является низкая точность измерений, особенно в условиях большой активной проводимости контролируемой почвы.

Находит применение также способ контроля с включением емкостного датчика в нагрузочный контур двухконтурного автогенератора [2]. При этом измерение емкости датчика основано на явлении срыва генерации колебаний при нарушении резонансной настройки контура. Недостатком этого способа является малый диапазон контроля измеряемой влажности, так как для измерения емкости датчика используется относительно узкая зона резких изменений в характеристике срыва колебаний.

Для повышения точности диэлькометрических измерений влажности почвы при многофакторных влияниях целесообразно применять методы многопараметрического контроля, позволяющие компенсировать погрешности измерений различного вида. Определение множества контролируемых параметров реализуют следующие способы:

- применение различных схем формирования и обработки сигналов при неизменном типе выбранного измерительного преобразователя;
- использование неизменной схемы формирования и обработки сигнала в комбинации с измерительными преобразователями различных типов;
- комбинированные способы измерения.

При выборе типа измерительного преобразователя нужно учитывать свойства одноконтурной и двухконтурной схем построения автогенераторов. Для контроля влажности почвы наиболее целесообразным является применение двухконтурной колебательной системы с емкостным датчиком в качестве первичного измерительного преобразователя, что обеспечивает большую точность измерений по сравнению с одноконтурной резонансной системой, применяемой для контроля влажности воздуха.

При анализе амплитудно-фазовых параметров емкостных преобразователей влажности, работающих в системе взаимосвязанных контуров, проведено схемотехническое моделирование устройств на ПЭВМ по программе *Electronics Workbench (EWB)* при различном сочетании эквивалентных *RLC*-параметров.

Для построения графиков амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик использовались модели генератора гармонических колебаний и характеристикографа (*Bode plotter*). Расчетная погрешность моделирования и установки параметров по программе *EWB* не превышала значения 0,1%.

Модель типовой схемы измерителя влажности почвы с двумя контурами приведена на рисунке 1, а.

Для получения плоской формы амплитудно-частотной характеристики конденсатор связи  $C_{CB}$  между двумя *LC*-контурами при одинаковых параметрах образцового и рабочего преобразователей  $L_0 = L$ ,  $C_0 = C$  выбирался в модели (рисунок 1, а) по условию  $C_{CB} \approx 0,03C$ . Подключение конденсатора связи  $C_{CB}$  понижает частоту квазирезонанса  $f_p$ , которая отличается от резонансной частоты настройки  $f_0$  каждого контура:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_{CB})}} \approx f_0(1 - C_{CB}/2C_0).$$

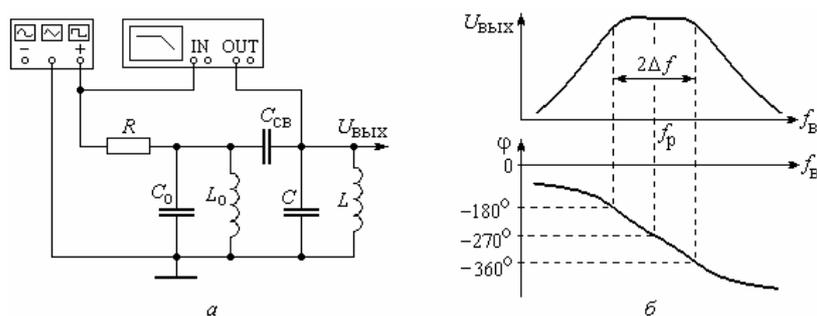


Рисунок 1 – Моделируемая двухконтурная схема (а) и ее частотные характеристики (б)

При изменении частоты возбуждающего сигнала  $f_B$  в полосе пропускания  $2\Delta f$  двух взаимосвязанных  $LC$ -контуров амплитуда выходного напряжения практически не зависит от частоты, а фаза  $\varphi$  выходного сигнала на рабочем  $LC$ -контуре равномерно уменьшается от  $-180^\circ$  до  $-360^\circ$ , а ее значение на частоте квазирезонанса  $f_p$  составляет  $-270^\circ$  (рисунок 1, б). Следовательно, применение емкостного датчика в двухконтурной системе позволяет обеспечить два существенных преимущества по сравнению с одноконтурным преобразователем:

- при относительно малом изменении емкости датчика (в диапазоне  $\Delta C/C \approx \pm 2\%$ ) амплитуда выходного напряжения остается постоянной, что позволяет уменьшить инструментальную погрешность при ее последующем преобразовании в импульсную форму или детектировании;

- вдвое расширяется диапазон изменения фазы выходного сигнала в полосе пропускания ( $\Delta\varphi \approx 180^\circ$ ) по сравнению с диапазоном отдельного  $LC$ -контра, для которого изменение фазы в полосе пропускания составляет всего  $\Delta\varphi \approx 90^\circ$  и лежит в пределах от  $+45^\circ$  до  $-45^\circ$ .

Фазовая чувствительность емкостного датчика при использовании взаимосвязанных контуров зависит от эквивалентной добротности контура  $Q \approx R/\sqrt{L_0/C_0}$ , т. е. повышается при увеличении сопротивления  $R$  в эквивалентной схеме (рис. 1, а). В частности, при добротности  $Q = 20$  и отклонении частоты возбуждающего сигнала  $f_B$  от частоты квазирезонанса  $f_p$  на  $\pm 1\%$  (что соответствует изменению емкости датчика примерно на  $\Delta C/C \approx \pm 2\%$ ), фаза выходного сигнала изменяется в пределах  $\Delta\varphi \approx \pm 30^\circ$ . Согласно полученным результатам моделирования, фазовая чувствительность к относительному изменению емкостного параметра составляет  $\Delta\varphi/(\Delta L/L) \approx \Delta\varphi/(\Delta C/C) \approx 15^\circ/\%$ . При этом относительная чувствительность частоты квазирезонанса при аналогичной девиации  $LC$ -параметров контура существенно ниже и составляет всего  $\Delta f_p/f_p \approx 1\%$  при изменении его параметров на  $\Delta L/L = \Delta C/C \approx 2\%$ .

Для получения результатов контроля влажности почвы необходимо выполнять дальнейшие функциональные преобразования сигналов. При этом значительно проще реализовать высокоточное измерение частоты, а не разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами измерительного преобразователя. Современные цифровые частотомеры позволяют измерять частоту в диапазоне до 100 МГц методом прямого счета с погрешностью менее 0,01%, в то время как точность фазометров в радиочастотном диапазоне относительно невысока. В частности, для цифрового измерения фазы сигналов на частотах выше 1 МГц, в схемах современных фазометров выполняют в аналоговой форме несколько преобразований опорного и измеряемого сигналов. При этом нормируют амплитуды входных сигналов переключением коэффициентов усиления предварительных усилителей в каждом канале фазометра, выполняют аналоговое умножение входных

сигналов на образцовый высокочастотный сигнал, после чего выделяют с помощью фильтров сигналы суммарной частоты, и лишь затем измеряют разность фаз.

Большинство перечисленных операций реализуют в аналоговой форме, поэтому погрешность измерения фазы на высоких частотах достигает единиц градусов. Данная погрешность зависит от отношения амплитуд сигналов в каналах фазометра, а также от стабильности статических и динамических параметров аналоговых устройств, в частности, полосовых фильтров. Вследствие этого для повышения точности измерений и уменьшения сложности и стоимости аппаратуры контроля более целесообразно реализовать цифровое измерение частоты квазирезонанса, а не разности фаз двух сигналов.

Согласно полученной при моделировании зависимости напряжения  $U_{\text{ВЫХ}} = F(f_{\text{В}})$  (рисунок 1, б), амплитудно-частотная характеристика взаимосвязанных контуров имеет плоскую форму в полосе пропускания. Поэтому для выделения частоты квазирезонанса  $f_{\text{В}}$  нужно дополнительно измерять фазу выходного сигнала и выделять момент ее перехода через расчетное значение  $\varphi = -270^\circ$ . Однако, даже использование современной элементной базы и быстродействующих цифровых микросхем не позволяет обеспечить погрешность измерения фазы ниже  $\pm 1^\circ$ . Вследствие этого необходимо изменить алгоритм преобразования, чтобы получить высокую чувствительность устройств контроля к изменению влажности почвы.

Возможность улучшения фазовой чувствительности проверена моделированием модифицированной схемы с установкой  $LC$ -параметров аналогично параметрам элементов предыдущей модели (рисунок 2, а).

В результате проведенного моделирования установлено, что при аналогичной плоской форме амплитудно-частотной характеристики выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}} = F(f_{\text{В}})$  наблюдается резкое, практически вертикальное изменение фазы сигнала на выходе образцового контура на частоте квазирезонанса  $f_{\text{Р}}$  в пределах от  $-85^\circ$  до  $+85^\circ$  (рисунок 2, б). При этом фаза переходит через нулевые значения не только на частоте квазирезонанса  $f_{\text{Р}}$ , но и на границах полосы пропускания резонансного контура. Следовательно, в устройстве контроля влажности на взаимосвязанных контурах нужно выполнять регулирование амплитуды напряжения на выходе рабочего контура, а фазовый угол выделять по сигналу на выходе образцового контура. При этом можно определить частоту резонанса по изменению знака фазы, а не по ее значению. Такой алгоритм позволяет заменить процесс измерения фазы операцией ее сравнения с нулевым уровнем. При этом отклонение порогов срабатывания фазового компаратора в несколько угловых градусов не будет оказывать влияния на точность выделения частоты резонанса  $f_{\text{Р}}$  вследствие большой крутизны фазочастотной характеристики взаимосвязанных контуров  $\varphi = F(f_{\text{В}})$  на частоте  $f_{\text{Р}}$ .

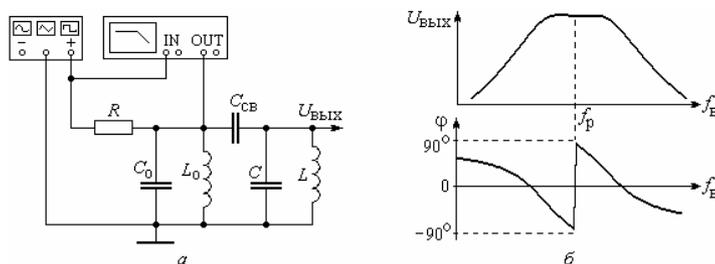


Рисунок 2 – Улучшенная двухконтурная схема (а) и ее частотные характеристики (б)

Анализ данных, полученных в результате моделирования, показал, что чувствительность частоты квазирезонанса к изменению  $LC$ -параметров в двух контурах с емкостной связью практически аналогична чувствительности одиночного резонансного  $LC$ -контура при одинаковой добротности сравниваемых контуров. Однако использование двухконтурной схемы построения влагомера позволяет значительно повысить фазовую чувствительность в области частоты квазирезонанса, что является существенным

преимуществом данного способа построения приборов, предназначенных для контроля влажности почвы.

Понижение добротности второго резонансного контура приводит к некоторому уменьшению крутизны фазочастотной характеристики взаимосвязанных контуров. Установлено, что при подключении дополнительной нагрузки  $R_H$  параллельно второму  $LC$ -контуру (рисунок 3, а) диапазон изменения фазы вблизи частоты резонанса уменьшается от типовых значений, составляющих  $\pm 85^\circ$  до уровня  $\varphi \approx \pm(15...20)^\circ$ . Такое влияние связано со снижением эквивалентной добротности взаимосвязанных контуров (рисунок 3, б), которую практически можно повысить несколькими способами.

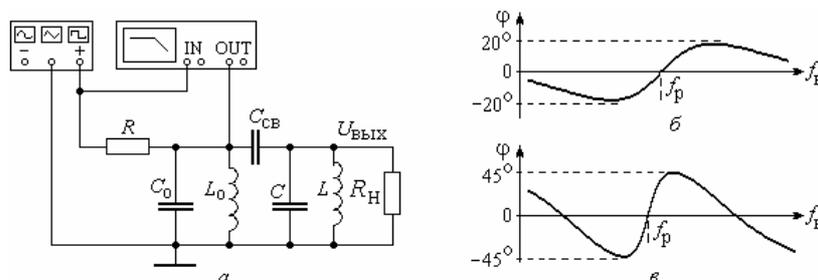


Рисунок 3 – Двухконтурная схема влагомера с резистором нагрузки  $R_H$  (а) и ее фазочастотные характеристики при добротности  $Q = 20$  (б) и  $Q = 200$  (в)

В частности, для исключения подобного эффекта необходимо уменьшать характеристическое сопротивление контуров  $\rho = \sqrt{L/C}$ , например, одновременным уменьшением индуктивности  $L$  преобразователя и увеличением емкости  $C$  резонансного контура, чтобы при контроле влажности не изменять расчетную частоту квазирезонанса:

$$f_p = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \approx 1/(2\pi\sqrt{L_0C_0})$$

Согласно рисунку 3, в, уменьшение характеристического сопротивления  $LC$ -контура на порядок (от исходного значения  $\rho = 1$  кОм до  $\rho = 100$  Ом) приводит к двукратному увеличению диапазона изменения фазы и повышению крутизны фазочастотной характеристики в окрестности частоты резонанса  $f_p$ .

Уменьшение влияния эквивалентной нагрузки  $R_H$  можно обеспечить также подключением к емкостному датчику вторичных измерительных преобразователей (усилителя или амплитудного детектора) с большими входными сопротивлениями (на полевых транзисторах). Кроме того, для повышения эквивалентной добротности  $Q$  целесообразно применять в качестве источника возбуждающего сигнала генератор переменного тока с большим выходным сопротивлением  $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow \infty$ , а не источник переменного напряжения, выходное сопротивление которого обычно мало ( $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ ).

Таким образом, применение двухконтурной схемы измерительного автогенератора при контроле влажности почвы дает ряд преимуществ, к которым относятся:

- повышение частоты возбуждающего сигнала вплоть до десятков мегагерц не оказывает существенного влияния на фазовую погрешность, так как при высокой добротности связанных контуров процесс измерения фазы заменяется измерением частоты при простом сравнении фазы с нулевым или опорным значением;

- высокая крутизна фазочастотной характеристики на частоте квазирезонанса позволяет снизить требования к чувствительности и ширине зоны гистерезиса фазовых компараторов и тем самым повысить диапазон частоты возбуждающего сигнала, подаваемого на датчик при контроле влажности;

- благодаря плоской форме амплитудно-частотной характеристики контуров с емкостной связью можно повысить точность детектирования амплитудных значений выходного сигнала емкостного преобразователя.

На рисунке 4 приведена структурная схема двухконтурного устройства контроля влажности. Учитывая ограничения по точности измерения фазовых параметров

высокочастотных сигналов, в данном устройстве реализовано непрерывное слежение за резонансной частотой параллельного  $LC$ -контура в процессе контроля, и по ее изменению можно судить о влажности контролируемой почвы. Для повышения фазовой чувствительности и обеспечения высокой добротности взаимосвязанных  $LC$ -контуров необходимо использовать катушки намагничивания без ферромагнитных сердечников, чтобы исключить дополнительные потери на вихревые токи в области высоких частот.

Принцип следящего регулирования частоты возбуждающих импульсов заключается в том, что в цикле контроля влажности изменяется направление развертки частоты импульсов при каждом изменении знака разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами рабочего преобразователя. При этом амплитудный детектор подключается к выходу рабочего преобразователя влажности, а формирователь импульсов для выделения фазы сигнала – к образцовому резонансному преобразователю. Такое разделение цепей позволяет сочетать высокую фазовую чувствительность с равномерностью амплитудно-частотной характеристики устройства в широком диапазоне контроля влажности почвы.

В схеме устройства используются управляемый генератор импульсов УГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ с высоким выходным сопротивлением и система из двух связанных колебательных контуров. Амплитудным детектором АД и дифференциальным усилителем ДУ выделяется и усиливается сигнал разбаланса  $U_p = K_U (U_{пор} - U_M)$  между пороговым напряжением ( $U_{пор} \geq 2$  В), формируемым источником опорных напряжений ИОН, и амплитудой  $U_M$  выходного сигнала рабочего преобразователя, входящего в состав второго  $LC$ -контура. Напряжением разбаланса  $U_p$  регулируется амплитуда выходных импульсов тока  $I_B$  в преобразователе напряжения в ток ПНТ, что позволяет обеспечить постоянную амплитуду напряжения на резонансных  $LC$ -контурах с емкостными преобразователями.

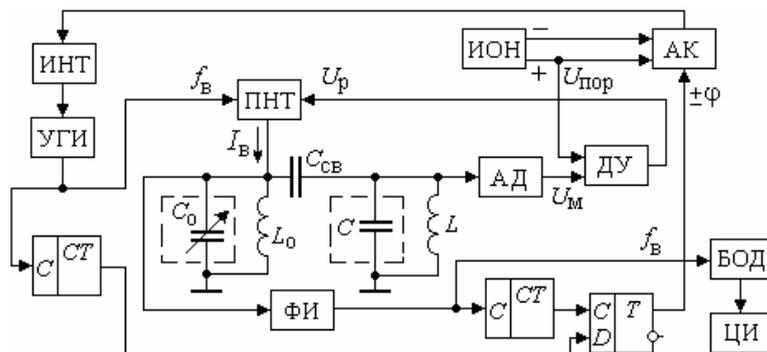


Рисунок 4 – Структурная схема прибора контроля влажности со следящей разверткой частоты

Формирователь ФИ преобразует выходной сигнал образцового преобразователя в импульсы, которые сравниваются по фазе  $D$ -триггером с выходными импульсами управляемого генератора УГИ. Интегратор ИНТ и аналоговый коммутатор АК служат для линейной развертки частоты импульсов управляемого генератора УГИ и для изменения направления развертки частоты в разных тактах преобразования.

Если частота  $f_B$  выходных импульсов генератора УГИ не превышает резонансной частоты связанных  $LC$ -контуров ( $f_B < f_p$ ), то разность фаз между импульсами возбуждающего тока  $I_B$  и выходным сигналом образцового  $L_0C_0$ -контура будет положительной ( $\varphi > 0$ ). При равенстве данных частот  $f_B = f_p$  фазовый угол  $\varphi$  резко переходит через нулевое значение ( $\varphi = 0$ ), и при дальнейшем повышении частоты импульсов УГИ  $f_B > f_p$  разность фаз становится отрицательной ( $\varphi < 0$ ).

В зависимости от знака разности фаз изменяется выходной сигнал фазового компаратора на  $D$ -триггере – при  $\varphi > 0$   $D$ -триггер находится в высоком (единичном) состоянии, а при фазе  $\varphi < 0$  – в низком (нулевом) состоянии. При каждом срабатывании  $D$ -триггера коммутатор АК переводится в противоположное состояние, изменяя полярность напряжения, подаваемого на вход интегратора ИНТ от двухполярного источника опорного напряжения ИОН. При этом

выходное напряжение интегратора ИНТ начинает линейно повышаться или уменьшаться во времени, что приводит к пропорциональному возрастанию или снижению частоты  $f_B$  импульсов на выходе управляемого генератора УГИ.

Непрерывность процесса контроля влажности почвы позволяет уменьшить скорость нарастания и спада частоты возбуждающих импульсов  $f_B$  в соседних тактах преобразования и тем самым практически исключить погрешность от "сноса" частоты резонанса  $\Delta f_p$ .

Например, при возбуждении  $LC$ -контура, имеющего частоту резонанса  $f_p = 1$  МГц и добротность  $Q = 100$ , прямоугольными импульсами со скоростью развертки частоты  $V_f = 10$  кГц/с "снос" частоты резонанса составит всего  $\Delta f_p \approx V_f T_k = V_f Q/\pi f_p \approx 3$  Гц, что пренебрежимо мало по сравнению со значением частоты  $f_p$ .

При использовании  $D$ -триггера в качестве фазового компаратора нужно учитывать, что при одновременной подаче импульсов на его  $D$ - и  $C$ -входы триггер не срабатывает и остается в предыдущем логическом состоянии. Вследствие этого появляется зона фазовой нечувствительности  $\Delta\phi$ , которая для микросхем быстродействующей серии КР1554 составляет примерно  $t_{\text{ФР}} \approx t_{\text{СП}} \approx 4$  нс. Наличие зоны фазовой нечувствительности  $\Delta\phi$  может привести к флуктуации частоты возбуждающего сигнала  $\Delta f_B$  относительно резонансной  $f_p$  при следящем регулировании частоты возбуждающего тока. Так, при частоте резонанса  $f_p = 1$  МГц средняя длительность периода импульсов возбуждающего сигнала составляет  $T_B = 1/f_p = 1$  мкс, и при ее относительном изменении от нечувствительности  $D$ -триггера на  $t_{\text{ФР}}/T_p \approx 0,4$  % частота возбуждающих импульсов в режиме слежения может изменяться в диапазоне от 998 до 1002 кГц или на  $\Delta f_B = 4$  кГц, что ограничивает точность измерения влажности.

Для повышения фазовой чувствительности в структурной схеме влагомера (рисунок 4) установлены два цифровых счетчика на входах  $D$ -триггера, которые увеличивают период следования импульсов. При использовании 8-разрядных двоичных счетчиков с коэффициентом деления  $K_d = 2^8 = 256$  зона нечувствительности  $D$ -триггера снижается до уровня  $t_{\text{ФР}}/(T_p K_d) \approx 0,0016$  %, а изменение частоты возбуждающего сигнала в окрестности резонанса уменьшается до значения  $\Delta f_B \approx 16$  Гц.

Применение двух микросхем счетчиков позволяет уменьшить влияние запаздывания  $D$ -триггера на точность выделения знака фазы. При этом также существенно ослабляются требования к быстродействию аналогового коммутатора АК и интегратора при реализации процесса следящего преобразования.

Например, при аналогичных параметрах контура  $f_p = 1$  МГц и скорости развертки частоты возбуждающих импульсов  $V_f = 10$  кГц/с срабатывание  $D$ -триггера и соответствующее ему переключение направления развертки будет происходить с относительно низкой частотой, составляющей  $f_{\text{ТГ}} = V_f / 2\Delta f_B = 312,5$  Гц.

Применение двухконтурной схемы построения влагомера со следящей подстройкой частоты позволяет обеспечить высокую фазовую чувствительность и реализовать достаточно точное сравнение параметров эталонного и рабочего преобразователей влажности почвы. Дополнительным преимуществом схемы (рисунок 4) является разделение процессов слежения за резонансной частотой и ее измерения в блоке обработки данных БОД. Это позволяет использовать один микроконтроллер в блоке обработки данных БОД для поочередного измерения резонансных частот нескольких влагомеров, установленных в разных теплицах, и при небольших аппаратурных затратах автоматизировать процесс полива и выращивания различных овощных культур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
2. Арш Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.

**Лисичкин Владимир Георгиевич**

к.т.н., доцент, доцент кафедры радиотехники и электроники

**Шведов Сергей Николаевич**

преподаватель кафедры радиотехники и электроники

Академия ФСО России, г. Орёл

Телефон: 8(4862)41-99-47

УДК 531.43/.46;539.62;621.891;621.004.6;621.89

С.Н. СЫЧЕВ, Е.В. ПАХОЛКИН, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Д.А. КУЗЬМИЧЕВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ МАСЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*В работе предлагается метод исследования адгезионных свойств смазочных материалов. Показано, что данные свойства имеют особую важность при граничном трении. Функциональная эффективность поверхностного смазочного слоя может быть оценена с помощью электрического параметра смазочного материала.*

***Ключевые слова:** смазочное действие, адгезионные свойства, третье тело, диэлектрическая проницаемость, диагностика*

*In work the method of probe of adhesive properties of greases is offered. It is shown that the given properties have special importance at a boundary friction. Functional efficiency of adsorption film of lubricant can be estimated by means of electric parameter of a grease.*

***Key words:** lubrication, lubricity, the third body, dielectric permeability, diagnostics*

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Общепринятым методом испытаний смазочных свойств жидких материалов является метод четырех шариков (использование четырехшариковой машины трения). При этом комплексную оценку качества масла производят по различным показателям, а именно: по силе трения, развивающейся во время испытания; по давлению, которое выдерживает смазочная пленка; по износу шариков и т. д. При этом известно, что непосредственную связь между оценкой смазочных свойств на машине трения и фактическими свойствами масел в реальных условиях применения установить не всегда возможно. Кроме того, названный метод испытаний, как и многие другие, не позволяет дифференцировать отдельные проявления смазывающего свойства масла, так как это свойство является комплексным и базируется на таких понятиях, как противоизносные, противозадирные, антифрикционные свойства, а также смазывающая и несущая способность.

В настоящее время существует отдельная проблема оценки адгезионных свойств (маслянистости, смазывающей способности) масел, в виду отсутствия общепризнанного метода, который позволил бы надежно измерить или диагностировать это важнейшее свойство. Степень маслянистости масел в качестве диагностического признака имеет особую актуальность при оценке технического состояния узлов, работающих в условиях граничного и смешанного трения, когда к постулируемым свойствам смазочного материала относят поверхностную физическую и химическую активность [1]. Механизм проявления смазочной способности заключается в образовании на трущихся поверхностях адсорбированной пленки масла толщиной порядка 0,1 мкм [2], которая играет главную роль в предотвращении изнашивания. В концепции «третьего тела» речь можно вести также о прочих адсорбируемых веществах помимо базовой основы масел.

Известные принципы электрорезистивных методов трибодиагностики, уровень проработки которых доведен до практического внедрения, основываются на исследовании характеристик электрического сопротивления трибосопряжения, детали которого разделены слоем смазочного материала, который формируется вследствие гидродинамического (и/или гидростатического) эффекта. Очевидно, что указанные принципы и модели процессов в зоне трения смазанного фрикционного контакта неприменимы (частично или полностью) при решении задачи оценки маслянистости. Таким образом, актуальным представляется поиск иных диагностических признаков и разработка альтернативных методов диагностирования.

**ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Смазочные свойства моторных масел в существенной степени зависят от адгезии компонентов масел на металлических поверхностях трибосопряжений. В свою очередь, адгезия может быть охарактеризована адсорбцией компонентов масла на рабочих поверхностях (модификация поверхности).

Изменение степени заполнения трущихся поверхностей антифрикционными компонентами масла в виде монослоя (защитный слой, «третее тело») может быть описано уравнением Лэнгмюра в виде:

$$\Theta = \Theta_a + \Theta_{ot} = \frac{[(K_{aa} \cdot C_a) + (K_{oa} \cdot C_{ot}(t, n, K_o))]}{[1 + K_{oa} \cdot C_{ot}(t, n, K_o) + K_{ka} \cdot C_{kt}(t, n, K_o) + K_{aa} \cdot C_a]}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – степень заполнения поверхности антифрикционными компонентами моторного масла;

$\Theta_a$  – степень заполнения поверхности антифрикционной добавкой;

$\Theta_{ot}$  – степень заполнения поверхности углеводородами;

$K_{aa}$  – константа адсорбции антифрикционной добавки;

$K_{oa}$  – средняя константа адсорбции углеводородных соединений;

$K_{ka}$  – средняя константа адсорбции кислородсодержащих соединений;

$C_a$  – молярная концентрация антифрикционной добавки;

$C_{ot}$  – текущая (мгновенная) концентрация углеводородов в масле (функция);

$C_{kt}$  – текущая (мгновенная) концентрация кислородсодержащих соединений (функция);

$t$  – время реакции (текущее время эксплуатации масла);

$n$  – порядок реакции окисления, больший 1;

$K_o$  – константа скорости окисления углеводородов.

Расчеты степени заполнения удобно вести в объемных долях. Объемная доля вещества в растворе может быть определена по формуле

$$\varphi = \frac{(C \cdot M)}{\rho}, \quad (2)$$

где  $C$  – молярная концентрация;

$M$  – молекулярная масса;

$\rho$  – плотность.

Согласно формуле (2), функции  $C_{ot}(t, n, K_o)$  и  $C_{kt}(t, n, K_o)$  будут выглядеть следующим образом:

$$C_{ot}(t, n, K_o) = \left( \frac{\rho_o}{M_o} \right) \cdot \varphi_{ot}(t, n, K_o), \quad (3)$$

$$C_{kt}(t, n, K_o) = \left( \frac{\rho_k}{M_k} \right) \cdot \varphi_{kt}(t, n, K_o), \quad (4)$$

где  $\rho_o$  – плотность углеводородов;

$M_o$  – молекулярная масса углеводородов;

$\rho_k$  – плотность кислородсодержащих соединений;

$M_k$  – молекулярная масса кислородсодержащих соединений;

$\varphi_{ot}$  – текущая объемная доля углеводородов (функция);

$\varphi_{kt}$  – текущая объемная доля кислородсодержащих соединений (функция).

Уравнение (1) можно преобразовать в более удобный для расчетов вид:

$$\Theta = \frac{\left[ \left( K_{aa} \cdot \left( \frac{\rho_a \cdot \rho_a}{M_a} \right) \right) + \left( K_{oa} \cdot \left( \frac{\rho_o}{M_o} \right) \cdot \varphi_{ot}(t, n, K_o) \right) \right]}{\left[ 1 + K_{oa} \cdot \left( \frac{\rho_o}{M_o} \right) \cdot \varphi_{ot}(t, n, K_o) + K_{ka} \cdot \left( \frac{\rho_k}{M_k} \right) \cdot \varphi_{kt}(t, n, K_o) + K_{aa} \cdot \left( \frac{\rho_a \cdot \rho_a}{M_a} \right) \right]} \quad (5)$$

Диэлектрическая проницаемость в явном виде не присутствует в уравнении (5), однако, эта величина входит в число параметров, определяющих константы адсорбции  $K_{aa}$ ,  $K_{oa}$  и  $K_{ka}$ . В работе [3] показано, что в обращенно-фазовой жидкостной хроматографии, основой которой, как и в случае адгезии на металлах, являются дисперсионные взаимодействия, величины удерживания соединений определяются в том числе и диэлектрической проницаемостью. Константы адсорбции пропорциональны величинам удерживания:

$$K_a = A \cdot \ln(V_{Ri}''), \quad (6)$$

где  $K_a$  – константа адсорбции;

$A$  – константа;

$V_{Ri}''$  – удерживаемый объем сорбата.

В свою очередь, величины  $\ln(V_{Ri}'')$  и  $K_a$  могут быть оценены следующим образом:

$$\ln(V_{Ri}'') = B \cdot n_h - C \cdot (\mu^2 \cdot \varepsilon), \quad (7)$$

$$K_a = A \cdot B \cdot n_h - A \cdot C \cdot (\mu^2 \cdot \varepsilon), \quad (8)$$

где  $n_h$  – число элементарных гидрофобных фрагментов в молекуле, т.е. сумма атомов углерода;

$\mu$  – дипольный момент сорбируемой молекулы;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость сорбируемой молекулы;

$B$  и  $C$  – константы.

Вводя константы  $A' = A \cdot B$  и  $C' = A \cdot C$ , получим:

$$K_a = A' \cdot n_h - C' \cdot (\mu^2 \cdot \varepsilon). \quad (9)$$

По аналогии с (9) можно записать

$$K_{aa} = A'_a \cdot n_{ha} - C'_a \cdot (\mu_a^2 \cdot \varepsilon_a), \quad (10)$$

$$K_{oa} = A'_o \cdot n_{ho} - C'_o \cdot (\mu_o^2 \cdot \varepsilon_o), \quad (11)$$

$$K_{ka} = A'_k \cdot n_{hk} - C'_k \cdot (\mu_k^2 \cdot \varepsilon_k), \quad (12)$$

где  $n_{ha}$  – среднее число элементарных гидрофобных фрагментов в молекулах антифрикционной добавки;

$n_{ho}$  – среднее число элементарных гидрофобных фрагментов в молекулах углеводородов;

$n_{hk}$  – среднее число элементарных гидрофобных фрагментов в молекулах кислородсодержащих соединений;

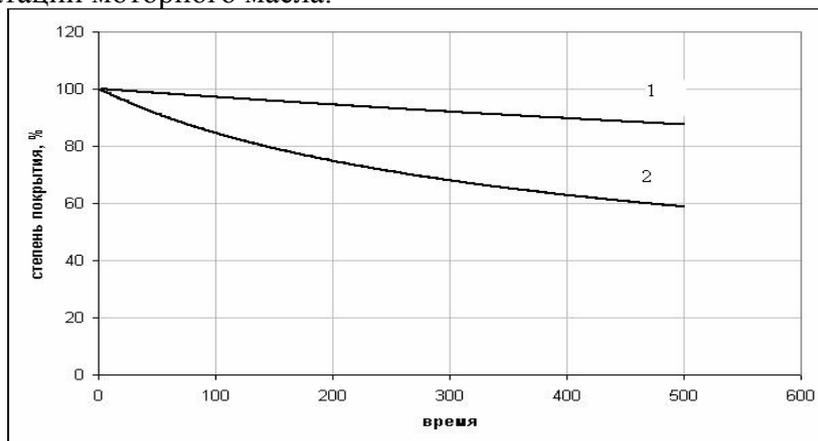
$\mu_a$  и  $\varepsilon_a$  – средний дипольный момент и средняя диэлектрическая проницаемость молекул антифрикционной присадки;

$\mu_o$  и  $\varepsilon_o$  – средний дипольный момент и средняя диэлектрическая проницаемость молекул углеводородов;

$\mu_k$  и  $\varepsilon_k$  – средний дипольный момент и средняя диэлектрическая проницаемость молекул кислородсодержащих соединений.

Подставляя уравнения (10), (11) и (12) в уравнение (5), можно получить общий вид зависимости степени заполнения от диэлектрической проницаемости компонентов.

На рисунке 1 показан вид зависимости степени покрытия рабочих поверхностей от времени эксплуатации моторного масла.



**Рисунок 1 – Изменение степени покрытия деталей двигателя в зависимости от времени использования моторного масла**

**Кривая 1:  $n = 2,5, k = 1$ .**

**Кривая 2:  $n = 3, k = 100$ .**

## **ВЫВОДЫ**

1. Для разработки метода исследования смазывающей способности масел может быть применен в качестве информативного электрический диагностический параметр (диэлектрическая проницаемость).

2. Процессы деструкции (старения) масел связаны с ухудшением смазывающей способности масел, при этом мониторинг процессов деструкции, в том числе в части ухудшения адгезионных свойств, может выполняться на основании периодических измерений предлагаемого диагностического параметра.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Моторные масла [Текст] / Р. Балтенас, А.С.Сафронов, А.И.Ушаков, В.Шергалес. – Москва-Спб.: Альфа-Лаб, 2000. -272 с.
3. Сычев, С.Н. Теоретическое обоснование контроля моторных масел электрическим методом (по значению диэлектрической проницаемости) [Текст] / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12.

### **Сычев Сергей Николаевич**

д.т.н., профессор кафедры «Химия»,  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419892

### **Пахолкин Евгений Васильевич**

к.т.н., доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация",  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419876,  
E-mail: [Eugene\\_P@bk.ru](mailto:Eugene_P@bk.ru)

### **Подмастерьев Константин Валентинович**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Приборостроение, метрология и сертификация",  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419876,  
E-mail: [Pms35@ostu.ru](mailto:Pms35@ostu.ru)

### **Кузьмичев Денис Александрович**

аспирант кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация",  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29,  
тел. (4862) 419876

## ПРИМЕНЕНИЕ УТОЧНЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПЛЕКСНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

*Комплексный диагностический параметр может быть использован для получения объективной информации о состоянии фрикционного контакта. Для повышения достоверности диагностирования в состав этого параметра необходимо включить электрическую мощность, вибрацию и температуру. Основой для моделирования комплексного параметра служит математическая модель электрического сопротивления фрикционного контакта.*

**Ключевые слова:** комплексный диагностический параметр; трибомониторинг; трибосопряжение; фрикционный контакт; электрическая мощность; вибрация; температура; электрическое сопротивление фрикционного контакта; математическая модель.

*The complex diagnostically parameter may be use for the received of objective information on the condition of friction contact. For the rise of reliability the diagnostician in consist of this parameter is necessary of include the electrical power, vibration and temperature. The base for the modeling of complex diagnostically parameter is serving the mathematical model of electrical resistance of the friction contact.*

**Key words:** complex diagnostically parameter; tribomonitoring; tribojunction; friction contact; electrical power, vibration and temperature; electrical resistance of friction contact; mathematical model.

### **Актуальность проблемы и цель работы**

Совершенствование механизмов и машин в значительной степени зависит от качества оценки их технического состояния, то есть от достоверности диагностической информации. Современной тенденцией повышения достоверности диагностирования технических систем является переход от использования традиционных источников информации к *комплексным диагностическим параметрам*, позволяющим оценивать состояние объекта по результатам совместных измерений нескольких физических величин. Этим достигается более высокая, по сравнению с традиционными методами, достоверность диагностирования, так как ни один из диагностических параметров в отдельности не может обеспечить получение полной информации о состоянии объекта исследований, а совокупность нескольких параметров расширяет ограниченные области применения каждого из них в отдельности.

В настоящее время известно немало примеров успешного использования комплексных диагностических параметров в области неразрушающего контроля и диагностирования технического состояния трибосопряжений; многие технические решения в этой области защищены авторскими свидетельствами и патентами. Например, в авторском свидетельстве (АС) СССР № 1312429 авторы В.В. Воинов, В.В. Кругликов и И.С. Ледовской (опубликовано в 1987 году) заявляют о совместных измерениях электрической мощности и сопротивления подшипника качения на частотах, кратных частоте вращения внутреннего кольца. В АС СССР № 1597691 автор Н.Н. Натаров (опубликовано в 1990 году) указывает на возможность диагностирования трибосопряжения путём измерения скорости вращения, нагрузки в контакте и температуры контактирующих поверхностей; диагностическим параметром служит произведение данных величин. В АС СССР № 1707497 авторы С.Ф. Корндорф, М.Г. Захаров и В.Я. Варгашкин (Орловский филиал Всесоюзного заочного машиностроительного института, опубликовано в 1992 году) предлагают измерять несколько электрических параметров, характеризующих процессы микроконтактирования, и скорость вращения сепаратора, с помощью которых оценивают размерные параметры дефектов рабочих поверхностей деталей трибосопряжения. В патенте РФ № 2006019 авторами В.П.

Чечуевским и В.И. Фроловым (Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, опубликован в 1994 году) предложено одновременно измерять кинематические параметры, параметры электрического микроконтактирования, усреднённые за заданное время. Очень интересно техническое решение, защищённое патентом РФ № 2059230 (авторы Е.В. Бердников, С.С. Гапонов и В.И. Туринов, Государственное научно-производственное объединение «Исток», опубликован в 1996 году); на объект подаётся внешний тепловой импульс, а информацию о дефектах получают путём анализа скорости изменения теплового импульса. Патент РФ № 2165077 (автор С.Е. Буханченко, Томский государственный политехнический университет, опубликован в 2001 году) посвящён совместным измерениям давления в испытательной камере, момента трения, линейного перемещения и температур образца и контрообразца, а также электрического сопротивления смазочной плёнки между ними. В патенте РФ № 2212643 автор В.Н. Яситников (опубликован в 2003 году) указывает на возможность диагностирования трибосопряжения по результатам совместного измерения параметров вибрации объекта и контактной разности потенциалов. Патент РФ № 2281475 (авторы Е.И. Лебедев, И.В. Зорин, Г.И. Соколов и В.И. Лысак, Волгоградский государственный технический университет, опубликован в 2006 году) защищает способ оценки триботехнических характеристик металлических покрытий по механическим и тепловым диагностическим параметрам.

В 2008 году работа по созданию комплексных диагностических параметров активно продолжалась. Так, в работе [1] доцент Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ) М.Г. Захаров предложил проводить комплексирование диагностического параметра НИВ и электрической проводимости трибосопряжения. В работе [2] представители ОрелГТУ – доцент В.В. Мишин, профессор К.В. Подмастерьев и аспирант В.В. Семёнов – предлагают комплексировать электрическое сопротивление трибосопряжения, параметры микроконтактирования и вибрации. Сделанный краткий обзор показывает, что *задача* создания комплексного диагностического параметра для оценки состояния фрикционных контактов *остаётся весьма актуальной* и может иметь несколько направлений решения.

Учитывая положительный опыт известных работ, предлагается создать комплексный диагностический параметр, включающий в себя такие единичные параметры, как электрическая мощность фрикционного контакта, виброскорость и температура (точнее – скорость изменения температуры поверхностей трибосопряжения, доступных для размещения чувствительных элементов измерительных приборов). Описание подхода к решению данной задачи является *целью настоящей работы*.

#### ***Допущения, принятые при моделировании***

Сложность процессов, происходящих в области фрикционного контакта трибосопряжений, не позволяет получить его строгое математическое описание без введения ряда ограничений и допущений. При создании комплексного диагностического параметра в данной работе приняты следующие допущения:

- для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя и по высоте единичного выступа;
- в качестве модели единичной неровности применяется сферический сегмент;
- контакт неровностей считается упругим, для описания макродеформаций поверхностей используется теория Герца;
- для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется распределение Найака;
- расчеты выполняются применительно к контакту шероховатой поверхности с гладкой, переход к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется путем оценки композиции законов распределения;
- влияние центробежных сил и гороскопических моментов не учитывается;
- виброперемещение рассматривается в виде совокупности детерминированной и случайной составляющих, а детерминированная составляющая виброперемещения выражается функцией радиуса поперечного сечения вращающейся поверхности трибосопряжения;

– избыточная температура поверхностей трибосопряжения рассматривается, как совокупность термозумовой, электрической и механической составляющих.

**Структура математической модели комплексного диагностического параметра**

Особенности каждого из выбранных для комплексирования единичных диагностических параметров подробно рассмотрены в работе [3]. В данной работе показано, что в определённой степени основой для комплексного моделирования электрической мощности фрикционного контакта, виброскорости и температуры может служить уточнённая математическая модель электрического сопротивления фрикционного контакта. Модель сопротивления устанавливает вероятностную взаимосвязь между внутренними параметрами фрикционного контакта, режимами эксплуатации трибосопряжения с одной стороны, и его электрическим сопротивлением – с другой стороны. Путём добавления в структуру этой базовой модели дополнительных связей, можно создать логическую схему математической модели комплексного диагностического параметра (рисунок 1).

|   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| <b>Комплексный диагностический параметр: КДП = <math>\nu \cdot P \cdot T</math></b>                     |   |   |  |  |
| 1) виброскорость $\nu$<br>(входные данные 1 – 4, иные промежуточные параметры)                          |   | 2) электрическая мощность $P$<br>(функциональная связь с $R_{ст}$ ) |  | 3) температура $T$<br>(функциональная связь с $R_{ст}$ , входные данные 5.1, трение) |
| <b>в) выходные данные</b>   |   |   |  |  |
| 7) $R_{ст}$ – сопротивление смазочной плёнки ( $R_{ст}$ ; входные данные 3.1; 3.2; 3.3; 4.2)            |   |   |  |  |
| 6) $R_{ст}$ – сопротивление стягивания ( $A_r$ ; $n$ ; входные данные 1.1; 2.1)                         |   |   |  |  |
| 5) $A_r$ – фактическая площадь контакта ( $n$ ; $A_c$ ; $\delta$ ; входные данные 1.3; 2.3)             |   |   |  |  |
| 4) $n$ – число вероятных контактов в пределах контурной площади контакта ( $A_c$ ; $\delta$ ; 1.3; 2.3) |   |   |  |  |
| 3) $A_c$ – контурная площадь контакта ( $\Sigma\rho$ ; входные данные 1.1; 1.4; 2.1; 2.4; 4.1)          |   |   |  |  |
| 2) $\delta$ – сближение контактирующих поверхностей ( $\Sigma\rho$ ; входные данные 1.1; 1.2; 4.1)      |   |   |  |  |
| 1) $\Sigma\rho$ – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей (входные данные 1.2 и 2.2)          |   |   |  |  |
| <b>б) промежуточные параметры</b>   |   |   |  |  |
| 1.4 Локальные дефекты   | 2.4 Локальные дефекты                     | 3.3 Физические свойства смазочной плёнки с учётом её толщины        | 4.2 Скорость взаимного перемещения контактирующих поверхностей | 5.3 Влажность окружающего воздуха  |
| 1.3 Параметры шероховатости   | 2.3 Параметры шероховатости               | 3.2 Геометрические размеры смазочной плёнки                         |  | 5.2 Атмосферное давление   |
| 1.2 Номинальные размеры и макроотклонения   | 2.2 Номинальные размеры и макроотклонения | 3.1 Химический состав и посторонние примеси                         | 4.1 Нормальная нагрузка в контакте                             | 5.1 Температура окружающей среды   |
| 1.1 Физические свойства и структура   | 2.1 Физические свойства и структура       |   |  |  |
| <b>1 Основная поверхность</b>   | <b>2 Дополнительная поверхность</b>       | <b>3 Смазочный материал</b>   | <b>4 Режимы эксплуатации</b>                                   | <b>5 Условия эксплуатации</b>  |
| <b>а) входные данные</b>  |   |   |  |  |

Рисунок 1 – Логическая схема математической модели комплексного диагностического параметра (КДП)

В математической модели комплексного диагностического параметра (КДП) все структурные элементы объединены в три группы (рисунок 1):

а) входные данные – характеристики собственных свойств элементов фрикционного контакта, формирующих его конкретное техническое состояние;

б) промежуточные параметры – показатели, отражающие взаимосвязь входных и выходных данных;

в) выходные данные – диагностические параметры, позволяющие оценить техническое состояние фрикционного контакта и входящие в состав КДП.

*Группа входных данных* включает в себя пять подгрупп показателей.

Подгруппа 1 – характеристики собственных свойств «основной» контактирующей поверхности. В данной работе названия «основная поверхность» и «дополнительная поверхность» даны условно. Основной поверхностью принято считать ту контактирующую поверхность, которая служит опорой для другой контактирующей поверхности; например, в соответствии с принятыми условными названиями, в подшипнике качения основными поверхностями можно считать дорожки качения колец, а дополнительными поверхностями – рабочие поверхности тел качения. Подгруппа 1 включает в себя следующие входные данные:

1) физические свойства и структура (модуль упругости для материала поверхности, коэффициент Пуассона, структурные изменения поверхности вследствие термической обработки, наклёпа, пластической деформации поверхности, эффекта приработки);

2) номинальные размеры и макроотклонения (номинальный размер поверхности, отклонения формы и расположения поверхности, например – овальность, радиальное биение);

3) параметры шероховатости (параметры  $R_a$ ,  $R_q$ , средний шаг микронеровностей);

4) локальные дефекты поверхности (трещины, вмятины, риски, лунки и т.п.).

Подгруппа 2 включает в себя аналогичные входные данные для «дополнительной» контактирующей поверхности (показаны на рисунке 1).

Подгруппа 3 – характеристики смазочного материала. В этой подгруппе характеристик учитываются не столько технические характеристики смазочного материала как самостоятельного «готового» продукта, сколько характеристики разделяющей две контактирующие поверхности «смазочной среды». Примеси, например, продукты износа, могут изменять свойства смазочного материала, а удельное электрическое сопротивление смазочной плёнки зависит от её толщины [4]. Это учтено при формировании входных данных подгруппы 3:

1) химический состав и посторонние примеси (например, частицы металла или наночастицы антифрикционных присадок к смазочному материалу);

2) геометрические размеры смазочной плёнки (для фрикционного контакта основным размерным параметром смазочной плёнки принята её толщина в зоне нагружения);

3) физические свойства смазочной плёнки с учётом её толщины (например, удельное электрическое сопротивление смазочной плёнки толщиной 3...10 нм (туннельные плёнки), удельное сопротивление граничных смазочных плёнок толщиной 0,01...1 мкм, удельное сопротивление смазочной плёнки толщиной более 1 мкм).

Подгруппа 4 – характеристики режимов эксплуатации трибосопряжения в составе механизма или машины. В этой подгруппе учтены следующие входные данные:

1) нормальная нагрузка в контакте;

2) скорость взаимного перемещения контактирующих поверхностей.

Подгруппа 5 – характеристики условий эксплуатации трибосопряжения. В эту подгруппу входят основные параметры окружающей среды: температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность воздуха, окружающего работающее трибосопряжение.

*Группа промежуточных параметров* включает в себя основные показатели, необходимые для определения электрического сопротивления фрикционного контакта в соответствии с известной математической моделью [4]. Названия промежуточных

параметров указаны на рисунке 1, а их расчётные формулы приведены в работе [4]. На рисунке 1 промежуточные параметры расставлены в той последовательности, в которой они рассчитываются при решении модели электрического сопротивления фрикционного контакта. В скобках указаны необходимые для расчёта входные данные и ранее полученные промежуточные параметры. Итогом расчёта значений промежуточных параметров является определение электрического сопротивления фрикционного контакта.

*Группа выходных данных* включает в себя три диагностических параметра: виброскорость, электрическую мощность и температуру (или скорость изменения температуры).

Виброскорость является диагностическим параметром, позволяющим оценить техническое состояние фрикционного контакта и учитывающим входные данные для обоих контактирующих поверхностей (входные данные подгрупп 1 и 2), смазочного материала (входные данные подгруппы 3) и режимов эксплуатации (входные данные группы 4). Однако промежуточные параметры, устанавливающие взаимосвязь между вибрацией и входными данными фрикционного контакта, будут отличаться от параметров, указанных на рисунке 1.

Электрическая мощность фрикционного контакта состоит из двух составляющих:

$$P = I^2 \cdot R_{\text{сн}}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока в электрической цепи, образованной последовательным соединением внешнего источника постоянной ЭДС, фрикционного контакта и электроизмерительным прибором;

$R_{\text{сн}}$  – сопротивление смазочной плёнки (сопротивление фрикционного контакта).

Из формулы (1) видно, что между электрической мощностью и сопротивлением фрикционного контакта может быть функциональная связь, если не учитывать генерируемую трибосопряжением ЭДС. При учёте трибо-ЭДС эта взаимосвязь может стать статистической.

Температура фрикционного контакта может быть определена по формуле:

$$T = \frac{E}{4 \cdot k \cdot R_{\text{сн}} \cdot \Delta f} + \frac{I^2 \cdot R_{\text{сн}} \cdot \Delta t}{c} + T_{\text{окр}} + T_{\text{м}}, \quad (2)$$

где  $E$  – термошумовая ЭДС в измерительной цепи фрикционного контакта;

$k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой измеряется термошумовая ЭДС;

$\Delta t$  – период времени, в течение которого в измерительной цепи протекает ток;

$c$  – удельная теплоёмкость материалов деталей трибосопряжения;

$T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды;

$T_{\text{м}}$  – температура, появление которой вызвано механическими процессами (трением).

Из формулы (2) видно, что две составляющих температуры фрикционного контакта находятся в функциональной взаимосвязи с его электрическим сопротивлением, а две другие составляющие определяются только входными данными. Поэтому между температурой и сопротивлением фрикционного контакта также может существовать статистическая взаимосвязь. Статистическая взаимосвязь может иметь место между электрической мощностью и температурой фрикционного контакта с одной стороны и виброскоростью с другой.

### **Заключение**

Приведённая логическая схема математической модели КДП и формулы диагностических параметров указывают на принципиальную возможность создания КДП в виде функции произведения виброскорости, электрической мощности и температуры (или скорости изменения температуры). Наличие только предполагаемой статистической взаимосвязи между рассмотренными диагностическими параметрами не позволяет получить строгое математическое описание предложенной модели, поэтому для подтверждения

возможности её использования требуется проведение оценочных экспериментальных исследований.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1 Захаров, М.Г. Разработка комплексного параметра диагностирования трибосопряжения [Текст] // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОрелГТУ, 2008. – № 3. – С. 106-110.

2 Подмастерьев К.В. Общие подходы к комплексированию при диагностировании опор качения и частное решение для электрических и вибрационных параметров [Текст] / К.В.Подмастерьев, В.В. Мишин, В.В. Семёнов, П.П. Моисеев, О.В. Щепилова // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – №4.

3 Марков В.В. Теоретические исследования источников первичной информации о состоянии фрикционного контакта [Текст] // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл, ОрелГТУ, 2008. – № 4.

4 Марков В.В. Уточнённая математическая модель электрического сопротивления фрикционного контакта [Текст] // Физика, химия и механика трибосистем: межвуз. сб. науч. тр. вып. 7 / Под ред. В.Н. Латышева. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2008.

### **Марков Владимир Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862)41-98-76  
E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

### **Семёнов Вячеслав Вячеславович**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862)41-98-76  
E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

В.В. МИШИН

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОЙ ФУНКЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ МИКРОКОНТАКТИРОВАНИЯ В ПОДШИПНИКЕ

*Предлагаемые диагностические параметры могут быть использованы для оценки динамических параметров процессов, происходящих в зоне трения работающего подшипника и определяющих его техническое состояние. Для унификации с известными в вибродиагностике диагностическими параметрами предлагается использовать для электрических методов диагностирования подшипников универсальную логарифмическую шкалу децибел.*

**Ключевые слова:** комплексный диагностический параметр; трибомониторинг; трибосопряжение; электрическое сопротивление фрикционного контакта.

*Offered diagnostic parameters can be used for an estimation of dynamic parameters of processes happening in a zone of friction of the working bearing and defining its a technical condition. For unification with known in vibration diagnostics parameters is offered to use a universal logarithmic scale of decibels for electric methods of diagnosing of bearings.*

**Key words:** complex diagnostically parameter; tribomonitoring; tribojunction; electrical resistance of friction contact.

Разработка новых методов и средств диагностирования подшипников (качения и скольжения) является в настоящее время весьма актуальной. Подшипники представлены практически во всех изделиях различных отраслей (машиностроение, приборостроение, энергетика, металлургия), поэтому комплекс проблем технической диагностики подшипников можно признать межотраслевым.

Целью настоящей работы является научно обоснованное предложение группы новых (ранее не опубликованных) диагностических параметров, синтезированных на основе анализа процесса разрушения смазочного слоя (пленки) в зонах трения контактирующих деталей подшипника. Данные процессы хорошо изучены и уже около 20 лет успешно используются в технической диагностике подшипников [1]. Однако для решения конкретных диагностических задач и более подробного анализа состояния подшипника предлагается группа новых диагностических параметров:

- скорость  $VNIT$  изменения вероятности микроконтактирования во времени

$$VNIT = \frac{dP_k}{dt}, \text{ где } P_k - \text{временная функция вероятности микроконтактирования [2];}$$

- ускорение изменения функции вероятности микроконтактирования во времени

$$ANIT = \frac{d^2 P_k}{dt^2};$$

- отношение  $VNITR$  к угловой или линейной скорости вращения вала  $VNITR = \frac{VNIT}{\omega}$ ,

где  $\omega$  – угловая скорость вращения вала контролируемого узла (внутреннего кольца подшипника);

- отношение  $ANIT$  к угловому (линейному) ускорению вращения вала (кольца)

$$\text{контролируемого узла } ANITR = \frac{ANIT}{d\omega/dt} = \frac{ANIT}{\varepsilon};$$

- нормированные (относительные) скорость и ускорение изменения временной функции вероятности микроконтактирования, соответственно:

$$VNIT_{\text{норм}} = \frac{dP_k}{dt} / P_k, \quad ANIT_{\text{норм}} = \frac{d^2 P_k}{dt^2} / P_k.$$

Первые два параметра  $VNIT$ ,  $ANIT$  предположительно будут давать обоснованную информацию процесса приработки (обкатки) подшипника и позволят более глубоко анализировать диагностические процессы, происходящие в зоне трения работающего подшипника. Вторые два параметра  $VNITR$ ,  $ANITR$  позволят более подробно характеризовать критические режимы работы подшипника (разгон и торможение) и, так как вероятность микроконтактирования связана с характеристиками процесса износа, параметры позволят в течение действия критических режимов осуществлять контроль процесса износа (данный вопрос выходит за рамки этой работы).

Теоретическое обоснование информативности указанных параметров строится на математической модели вероятности микроконтактирования как функции времени в работающем подшипнике. Как известно, на мгновенное значение вероятности микроконтактирования наиболее значимо влияют внешние и внутренние факторы: нагрузка в зоне трения деталей, сближение деталей, температура и вязкость смазочного материала, толщина смазочного слоя, микрогеометрия и макрогеометрия поверхностей трения, скоростной режим относительного перемещения контактирующих деталей и пр. Влияние данных факторов на вероятность микроконтактирования как функцию времени, подробно описано в [1,2]. Ниже представлены только основные зависимости, позволяющие синтезировать рассматриваемые диагностические параметры. Впервые вероятность микроконтактирования  $P_k$ , как диагностический параметр, обоснована в работе [3].

По [1,2] вероятность определяется как (на примере подшипника качения):

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - P_{ni} \cdot P_{ei}), \quad (1)$$

где  $P_{ni}, P_{ei}$  – соответственно вероятности контактирования  $i$ -го тела качения с наружным (внутренним) кольцом.

В свою очередь  $P_{n(e)i}$  определяются как:

$$P_{n(e)i} = 1 - (1 - P_{1n(e)})^{\eta_{n(e)}}, \quad \eta_{n(e)} = A_{n(e)} \cdot q \quad (2)$$

где  $\eta_{n(e)}$  – коэффициент, определяемый в зависимости от площади пятна контакта  $A_{n(e)}$  и плотности  $q$  неровностей на единицу площади;

$P_1 = 0,5 - \Phi(\lambda)$  – вероятность микроконтактирования тела качения с кольцом по одной микронеровности;

$\lambda$  – параметр Таллиана, характеризующий соотношение толщины смазочной плёнки  $h$  и высоты микронеровностей.

Как известно, в работающем подшипнике происходит постоянное изменение внутреннего состояния, выражаемое в изменении деформаций, нагрузок и, как следствие, постоянно изменяется толщина смазочного слоя, идут процессы среза и смятия микронеровностей, упругие и пластические деформации поверхности трения, усталостное разрушение и выкрашивание и т.п.. Всё сказанное приводит к динамическому изменению  $\lambda$ , поэтому целесообразно говорить об этом параметре не как о статическом коэффициенте, а как о динамическом параметре или функции времени  $\lambda(t)$ . Причем, в малых интервалах времени, изменение  $\lambda(t)$  наиболее вероятно будет характеризовать влияние кратковременных факторов (локальные дефекты, загрязнения смазки, изменения нагрузочных режимов и т.п.), а в значительных интервалах приращение  $\lambda(t)$  вероятно будет определяться более длительными факторами, например, износом рабочих поверхностей. Аналогичное логическое обоснование относится и к временному изменению площади пятна контакта (фактической площади микроконтакта)  $A_{n(e)}(t)$ .

С учетом вышесказанного вероятность контактирования тел качения  $P_{n(e)i}$  представляется как функция времени:

$$P_{n(e)i}(t) = 1 - (1 - P_{1n(e)}(t))^{n_{n(e)}(t)}, \quad (3)$$

и, следовательно, вероятность микроконтактирования в подшипнике качения аналогично является функцией времени:

$$P_k(t) = 1 - \prod_1^z (1 - P_{ni}(t) \cdot P_{ei}(t)). \quad (4)$$

Методика расчета вероятности микроконтактирования как функции времени для подшипников скольжения аналогична выше рассмотренной, но необходимо учесть отсутствие тел качения (вероятность рассчитывается только в одном трибосопряжении по площади контакта цапфы вала и втулки).

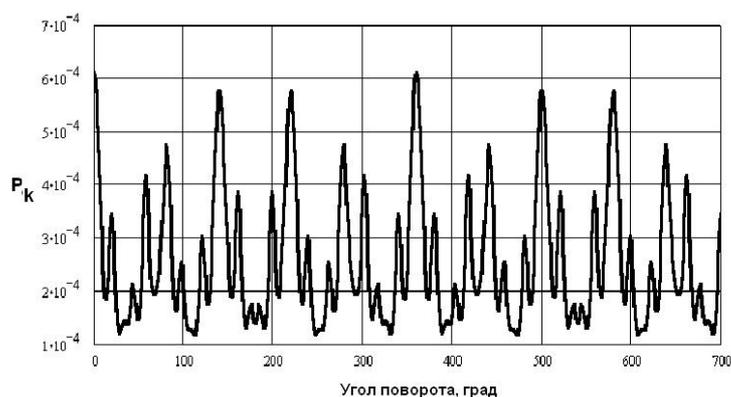
Полная математическая модель вероятности микроконтактирования достаточно громоздка и её невозможно решить аналитически [1, 2, 3], поэтому при синтезе диагностических параметров для конкретных диагностических задач используется численное моделирование. Результатом моделирования является цифровая последовательность  $P_k(t) \Rightarrow P_k[n]$ , которую можно представить в виде дискретно-временного ряда  $P_k[n\tau]$ , где  $\tau$  - период дискретизации модели и, соответственно, моделируемых данных в виде дискретно-временной последовательности. В качестве примера на рисунке 1 представлены результаты моделирования  $P_k[n]$ , приведённые к углу поворота, что при известной угловой скорости вращения вала (кольца) подшипника адекватно представлению  $P_k[\psi] \approx P_k(t) \approx P_k[n\tau]$ . На рисунке 1а представлена теоретически смоделированная при выполнении численного эксперимента функция изменения вероятности микроконтактирования в зависимости от угла поворота кольца подшипника 1000900 при наличии макроотклонения от правильной геометрической формы дорожки качения внутреннего циркуляционно нагруженного кольца. На рисунке 1б представлено аналогичное рассмотрение функции  $P_k(t)$  при изменении значения макроотклонения (двухсторонняя деформация кольца – овальность) внутреннего циркуляционно нагруженного кольца подшипника.

Как видно из результатов, вероятность микроконтактирования действительно зависит от рассмотренных выше факторов и её представление в виде временной функции адекватно. Теоретическая временная функция  $P_k(t)$  за счет численного моделирования сдержит значительные ступенчатые (с шагом моделирования) перегибы и это приводит к резкому изменению значений и знака её производных. Этот фактор необходимо учитывать при проведении численного вычислительного эксперимента при проверке работоспособности предлагаемых выше параметров. При фактическом измерении за счет инерционности средств измерения и особенностей практического метода измерения функция  $P_k(t)$  не будет иметь значительных перегибов и, тем более, делающих невозможным или ограниченным её дифференцирование разрывов первого и второго рода.

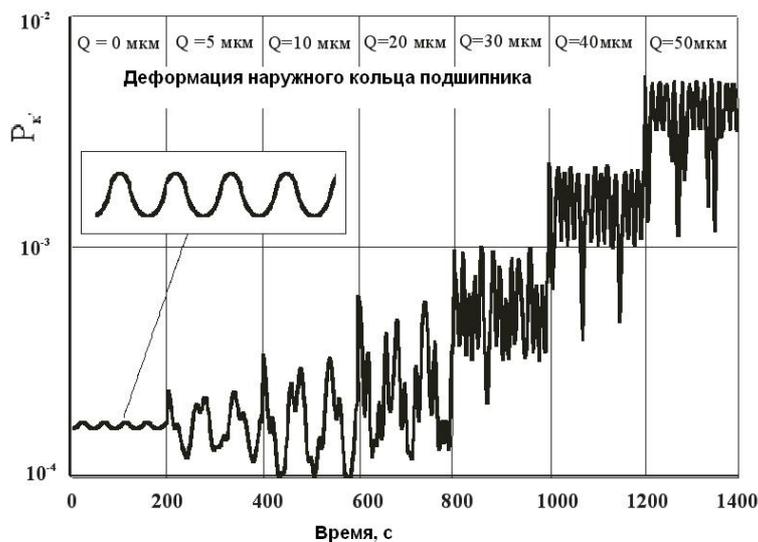
Рассматриваемые диагностические параметры VNIT, ANIT, VNITR, ANITR на базе результатов, аналогичных рисунку 1, моделируются численным методом с учетом следующих выражений:

$$VNIT(t) = \frac{dP_k}{dt} = \frac{P_k(t_i + \tau) - P_k(t_i - \tau)}{2\tau}, \quad ANIT(t) = \frac{d^2P_k}{dt^2} = \frac{P_k(t_i + \tau) - 2P_k(t_i) + P_k(t_i - \tau)}{(2\tau)^2}. \quad (5)$$

Параметры также представляются в виде временных функций или дискретно временных последовательностей. Общее представление предлагаемых параметров может быть как во временной области, так и в частотной. Частотное представление указанных диагностических параметров будет характеризовать динамические повторяющиеся (в случае наличия детерминированной составляющей) или случайные (в случае наличия случайной составляющей) переходы объекта диагностирования в его различные состояния.



*а) изменение вероятности микроконтактирования подшипника от угла поворота при наличии макроотклонения дорожки качества внутреннего кольца*



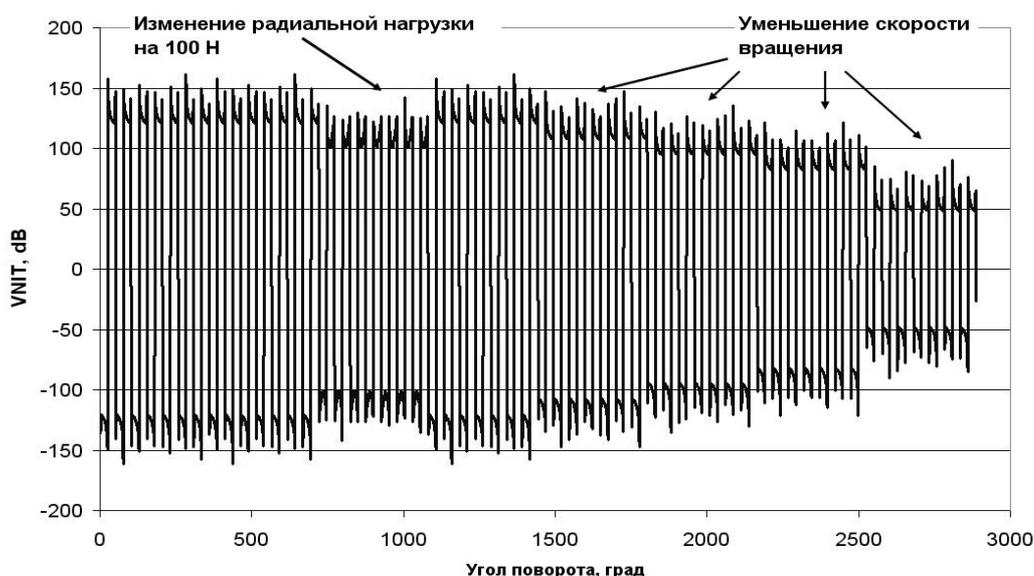
*б) изменение вероятности микроконтактирования подшипника во времени (масштаб условный) при наличии изменяющегося по значению макроотклонения дорожки качества внутреннего кольца*

Рисунок 1 – Примеры временной функции  $P_k(t)$

Результаты теоретического моделирования параметров при различных влияющих факторах представлены на рисунке 2. Как видно из результатов моделирования скорость изменения функции  $P_k(t)$  зависит от факторов, определяющих техническое состояние и режимы работы подшипника.

Для удобства построения средств измерения и унификации результатов измерения предлагается использовать логарифмическую шкалу в общепринятых единицах дБ. Вероятность микроконтактирования не имеет размерности, однако при инструментальной реализации измерения вероятности микроконтактирования электрическими методами через широко применяемый диагностический параметр НИВ вероятность микроконтактирования трактуется как соотношение длительности микроконтактирований к общей длительности  $T$  измерения [1] и изменяется в пределах  $10^{-8} - 1$ . Этот диапазон можно представить в процентном соотношении, т.е.  $P_k, \% = P_k \cdot 100\%$  или в дБ. В этом случае результаты измерений параметра  $VNIT$  будут иметь размерность  $(\%/с)$ . Аналогично определяется размерность остальных предлагаемых диагностических параметров. Так как измерение вероятности микроконтактирования через параметр НИВ (NIT) [1, 2] осуществляется частотным способом, динамический диапазон  $VNIT$  от 0 до 160 дБ реализуется на практике достаточно просто. Аналоговые методы измерения вероятности микроконтактирования (с аналоговым интегрированием) позволяют охватить диапазон от 0 до 80 дБ. Диапазон преобразователей для параметров  $VNIT$ ,  $ANIT$ ,  $VNITR$ ,  $ANITR$  в дискретном исполнении будет определяться дискретизацией данных, а в аналоговом способе параметрами интегрирующих и дифференцирующих цепей для получения сигнала НИВ и последующего

его дифференцирования. Так как обычно параметр НИВ измеряется при значениях времени усреднения 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10 секунд, то максимальный диапазон изменения параметра  $V_{NIT}$  составит 220 дБ при изменении параметра НИВ (NIT) в диапазоне от  $10^{-8}$  до 1 за время 0,001 с. Аналогично при времени измерения 1с (общепринятое время измерения параметра) максимальный диапазон составит 160 дБ. Так как знак предлагаемых параметров определяется возрастанием или убыванием временной функции вероятности микроконтактирования на локальном участке (см. рисунок 2), полный динамический диапазон изменения параметров будет составлять максимальные значения со знаком «+» или «-», например возможный диапазон для параметра  $V_{NIT}$  в описанном выше примере составит от -220 дБ до 220 дБ при цифровом (частотном) методе измерения и от -80 дБ до 80 дБ при аналоговом методе измерения. Аналогично и для других предлагаемых параметров.



*Рисунок 2 – Результат моделирования параметра  $V_{NIT}$  при изменении радиальной нагрузки и скорости вращения внутреннего кольца подшипника*

Для удобства обработки результатов моделирования и измерения для случаев, когда не важен знак предлагаемых параметров, целесообразно использовать абсолютное значение параметров (рисунок 3). Такое представление предлагаемых диагностических параметров несет в себе только обобщенную информацию о динамике изменения технического состояния подшипника, однако оно позволяет решать множество диагностических задач, например, определение времени приработки подшипника.

Для подтверждения информативности предлагаемых диагностических параметров на рисунке 4 в качестве примера представлены результаты экспериментальных исследований по оценке зависимости параметра  $V_{NIT}$  от режима смазывания подшипника. Эксперимент выполнялся на специализированном стенде, представляющем собой двухопорный подшипниковый узел с возможностью радиального и осевого нагружения исследуемого подшипника. Частота вращения в эксперименте составляла  $1200 \text{ мин}^{-1}$ , радиальная нагрузка 50 Н, исследуемый подшипник 1000900. Для реализации электрического метода измерения вероятности микроконтактирования стенд имеет возможность электрической изоляции исследуемого подшипника. Как видно из рисунка 3, при изменении радиальной нагрузки на 100 Н диагностический параметр получил приращение практически на 20 дБ. Аналогично при изменении скорости вращения параметр изменился более чем на 70 дБ. Так же при изменении режима смазывания предлагаемые диагностические параметры изменяются более чем на 60 дБ.

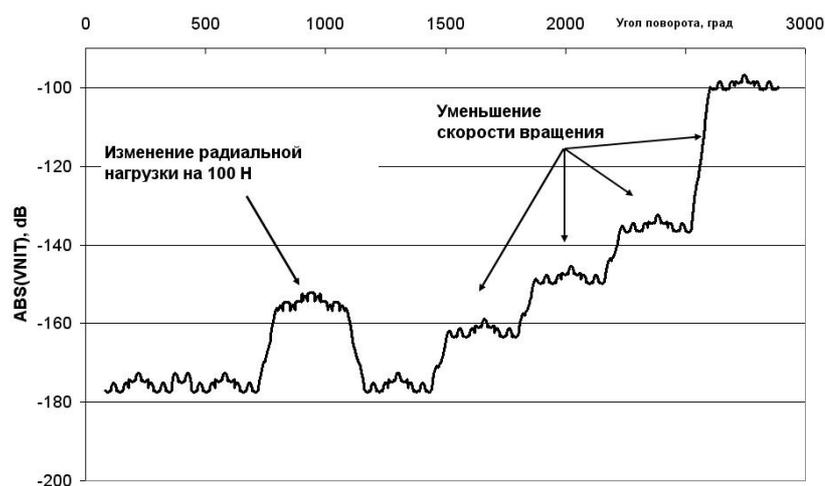


Рисунок 3 – Результат моделирования абсолютного значения параметра VNIT при изменении радиальной нагрузки

Результаты экспериментальных исследований подтвердили принципиальную информативность предлагаемых диагностических параметров, соответственно предлагаемые параметры необходимо более подробно исследовать и рекомендовать для применения в методах диагностирования подшипников.

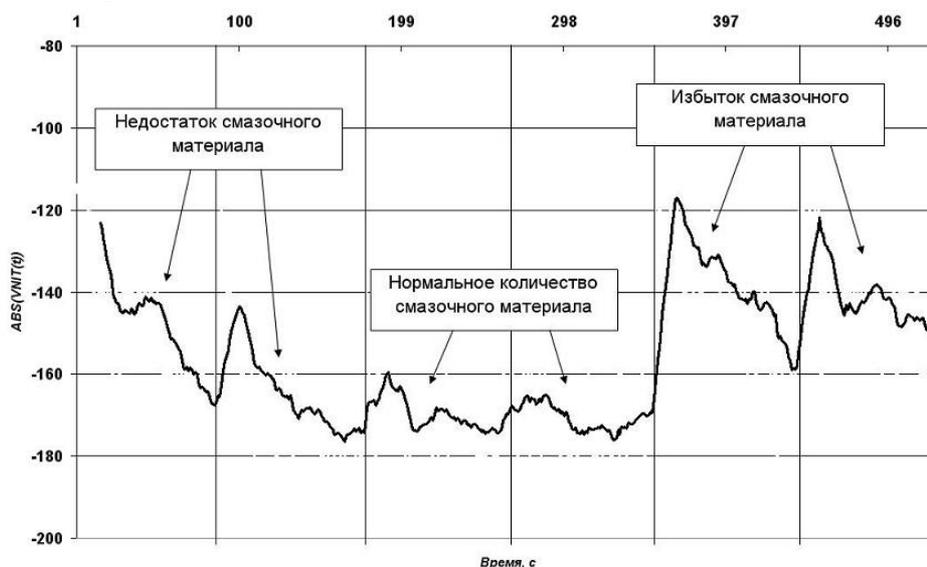


Рисунок 4 – Экспериментальное подтверждение зависимости параметра VNIT от режима смазывания подшипника

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
2. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения: Дисс. канд. техн. наук – Орел, 2000. – 265 с.
3. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства диагностирования подшипников качения (при ремонте и изготовлении машин и механизмов): Дисс. канд. техн. наук – М., 1986. – 244 с.

### Мишин Владислав Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
 К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 Тел. (4862)41-98-76  
 E-mail: [vlad89290@gmail.com](mailto:vlad89290@gmail.com), [vm@rbcmail.ru](mailto:vm@rbcmail.ru)

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей.**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу иверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравнивают по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

*Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.ostu.ru](http://www.ostu.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

*Адрес редакции:*

Орловский государственный технический университет  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24, 41-98-21  
www.ostu.ru  
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева  
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Сдано в набор 16.02.2009 г.  
Подписано в печать 13.04.2009 г.  
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 7,1.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.