

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., секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редакция

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

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

Члены редколлегии

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-корр. 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
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Корндорф С.Ф. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. 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 редакции

302020, г. Орел, Нагорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
43-48-90

www.gu-unpk.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе

по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года

Подписной индекс **29504**

по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2011

Содержание

Естественные науки

<i>Фоминова О.В., Барбашова Т.А., Чернышев В.И.</i> Виброзащитная система с управляемым динамическим гасителем.....	3
<i>Александров М.В.</i> Анализ влияния нестационарной тепловой конвекции расплава на интенсивность теплообмена между затвердевающей отливкой и литейной формой.....	12
<i>Ермошенко Ю.В., Большаков Р.С., Абросимова Ю.О.</i> Динамическое гашение колебаний в системах с сочленениями.....	17
<i>Петрова В.Ю.</i> Статистическое моделирование электромагнитной совместимости электроэнергетических объектов.....	25
<i>Елисейев С.В., Хоменко А.П.</i> Математические модели механических систем с г-образными динамическими гасителями колебаний.....	30

Моделирование технологических процессов

<i>Грибовский А.А.</i> Автоматизация поиска деталей-аналогов на базе трехмерных моделей...	43
--	----

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Игнатова А.М., Артемов А.О., Игнатов М.Н., Ханов А.М.</i> Изучение структурных изменений симбиоза при деформации и разрушении методом акустической эмиссии.....	50
<i>Химухин С.Н., Теслина М.А., Астапов И.А., Гостищев В.В.</i> Формирование дефектов и изменение свойств металла отливок при внешней обработке расплава АЛ9.....	61

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Агеенко А.В.</i> Методика настройки параметров УЧПУ токарных станков для обеспечения заданной точности контура детали.....	67
<i>Бабичев А.П., Иванов В.В.</i> Нанесение вибрационного твердосмазочного механохимического покрытия на внутреннюю поверхность гильзы гидроцилиндра из титанового сплава VT-20.....	73
<i>Кудряшов Е.А., Лунин Д.Ю., Павлов Е.В.</i> Преимущества лезвийной технологии обработки деталей инструментом из композита.....	77
<i>Смоленцев В.П., Коровин А.А.</i> Изготовление турбулизаторов в каналах охлаждения жидкостных ракетных двигателей.....	81

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Мулюкин О.П.</i> Выбор научной карьеры. Инновационный подход.....	90
<i>Морозова А.В., Егоров М.В.</i> Проектирование системы конкурентных преимуществ специалистов в области технической эксплуатации и обслуживания электрического и электромеханического оборудования.....	96

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Тютякин А.В., Семашко Е.А., Демидов А.В., Силаев П.П.</i> Функциональная модель исследования алгоритмов сжатия изображений в системах технической диагностики.....	102
<i>Лобанова В.А., Воронина О.А.</i> Электронные и виртуальные средства контроля качества нефтепродуктов.....	109
<i>Дунаев А.В., Иножарская О.В., Шураева Е.В.</i> Исследование возможностей лазерной доплеровской флоуметрии для оценки эффективности применения ортопедических средств.....	114

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Марков В.В.</i> Методы и средства контроля, исследований и анализа смазочных материалов: результаты патентных исследований.....	121
<i>Кобзев И.О., Подмастерьев К.В.</i> Моделирование скорости термической деструкции смазочного материала в подшипнике качения.....	130
<i>Корндорф С.Ф., Костин М.С.</i> Исследование нелинейных свойств машинного масла.....	135
<i>Анцифорова Е.В., Пахолкин Е.В.</i> Экспериментальные исследования характера изменения диагностических параметров в процессе формирования модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения.....	141
<i>Пузырев С.Г., Сычев С.Н.</i> Способы определения адгезии на поверхностях металлов методом ВЭЖХ.....	148



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 5 (289) 2011
September - October

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution
«State University – Education-Scientific-Production Complex»
(State University – ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidate Sc.
Tech., Assistant Prof., secretary
Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

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.

Member of editorial board

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.
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., 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,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-21
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication.
The certificate of registration III № ФС77-35719
from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

© State University – ESPC, 2011

Contents

Natural science

<i>Fominova O.V., Barbashova T.A., Chernyshjov V.I.</i> Vibration isolation system with guided dynamic damper.....	3
<i>Aleksandrov M.V.</i> Analysis of the influence of nonstationary thermal convection of the melt on the heat exchange rate between a casting and a mould.....	12
<i>Ermoshenko YU.V., Bolshakov R.S., Abrosimova YU.O.</i> Dynamical absorbers in systems with couplings.....	17
<i>Petrova V.Yu.</i> Statistic modeling of electromagnetic compatibility of power objects.....	25
<i>Eliseev S.V., Khomenko A.P.</i> Mathematical models of mechanical systems with lever dynamical absorber of oscillations.....	30

Process modeling

<i>A.A. Gribovsky</i> Automate the search analog of details based on three-dimensional model.....	43
---	----

Construction, calculation, material

<i>Ignatov A.M., Artyomov A.O., Ignatov M.N., Khanov A.M.</i> Studying of structural changes synthetic mineral alloy at deformation and destruction by the method acoustic issue.....	50
<i>Khimukhin S.N., Teslina M.A., Astapov I.A., Gostishchev V.V.</i> Defects formation and change of cast metal properties under external treatment of AL9 melt.....	61

Machine building technology and toolware

<i>Ageenko A.V.</i> Method of settings cnc turning machine for the accuracy of a given circuit details.....	67
<i>Babichev A.P., Ivanov V.V.</i> Outlook of the disulphureous molybdenum application for forming of vibratory chemimechanical solid oil coverings.....	73
<i>Kudryashov E.A., Lunin D.Y., Pavlov E.V.</i> Advantages edge of technology of processing of details the tool from the composite.....	77
<i>Smolentsev V.P., Korovin A.A.</i> Making of turbulence promoters in cooling canals of liquid-propellant engines.....	81

Innovation and frame in machine building

<i>Mulyukin O.P.</i> The choice of scientific career. Innovative approach.....	90
<i>Morozova A.V., Yegorov M.V.</i> Development of competitive advantage system for experts in technical maintenance of electrical and electromechanical equipment.....	96

Instrument making and biotechnological system

<i>Tyutyakin A.V., Semashko E.A., Demidov A.V., Silaev P.P.</i> Functional model of images compression algorithms research in technical diagnostics systems.....	102
<i>Lobanova V.A., Voronina O.A.</i> About development of new decisions of the task of quality control of oil products.....	109
<i>Dunaev A.V., Inozharskaya O.V., Shuraeva E.V.</i> Investigation of laser dopper flowmetry possibilities for assessment of effectiveness of application of orthopedic devices.....	114

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Markov V.V.</i> Methods and means of control, researches and analysis of lubricants: results of patent researches.....	121
<i>Kobzev I.O., Podmasteryev K.V.</i> Simulation speed thermal degradation of lubricants at the bearings.....	130
<i>Korndorf S.F., Kostin M.S.</i> Investigation of nonlinear properties lube.....	135
<i>Antsiforova E.V., Pakholkin E.V.</i> The experimental researches of the behavior of testing parameters in the process of the generation of modified layers on the working surfaces of friction units.....	141
<i>Puzyrev S.G., Sychev S.N.</i> Ways of definition of adhesion on surfaces of metals the method of the highly effective liquid chromatography.....	148

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

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 681.587'5–752.2:001.891.573

О.В. ФОМИНОВА, Т.А. БАРБАШОВА, В.И. ЧЕРНЫШЕВ

ВИБРОЗАЩИТНАЯ СИСТЕМА С УПРАВЛЯЕМЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ

В статье рассматривается система виброзащиты с управляемым динамическим гасителем, который эффективен на любой частоте рабочего диапазона. В конструкции динамического гасителя используется демпфер прерывистого действия, алгоритм переключений которого и соответствующая позиционная функция управления найдены по методу гармонического баланса.

Ключевые слова: виброзащита; динамический гаситель; демпфер; управление.

Влияние динамического гасителя на колебания защищаемого объекта при силовом и кинематическом возмущении исследовались многими авторами [1, 2, 3]. Динамический гаситель в пассивном исполнении позволяет существенно снизить уровень колебаний защищаемого объекта при определенной настройке его параметров в зависимости от частоты детерминированного возмущения. Однако, при изменении частоты детерминированного возмущения динамический гаситель, как правило, усиливает колебания защищаемого объекта.

Предполагается, что устранить этот недостаток возможно, используя в составе виброзащитной системы управляемый динамический гаситель (рис. 1):

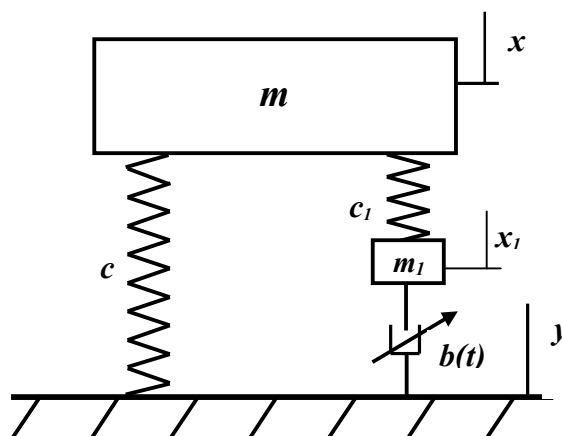


Рисунок 1 – Виброзащитная система с управляемым динамическим гасителем

x, x_1 – координата защищаемого объекта и динамического гасителя, м;

$y = y_0 \sin \omega t$ – кинематическое возмущение, м;

m, m_1 – масса защищаемого объекта и динамического гасителя, кг;

$b(t)$ – вязкое сопротивление, $H \cdot c/м$;

c – жесткость несущего упругого элемента, $H/м$;

c_1 – жесткость дополнительного упругого элемента (динамического гасителя), $H/м$.

Динамика данной системы описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c(x - y) + c_1(x - x_1) = 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x) + b(t)(\dot{x}_1 - \dot{y}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

которые можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \ddot{x} + k^2(x - y_0 \sin \omega t) + \lambda k^2 \cdot (x - x_1) = 0, \\ \ddot{x}_1 + \frac{\lambda k^2}{\mu}(x_1 - x) + \frac{b(t)}{m\mu}(\dot{x}_1 - y_0 \omega \cos \omega t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях (2) приняты следующие обозначения:

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}} \text{ – основная частота, } c^{-1};$$

$$\lambda = \frac{c_1}{c} \text{ – отношение коэффициентов жесткостей пружин};$$

$$\mu = \frac{m_1}{m} \text{ – отношение массы динамического гасителя к массе защищаемого объекта};$$

$$\omega \text{ – частота кинематического возмущения, } c^{-1};$$

$$y_0 \text{ – амплитуда кинематического возмущения, } m.$$

Умножая каждое уравнение системы (2) на $\frac{1}{y_0 \omega^2}$, переходим к безразмерной форме за-

писи системы уравнений (2):

$$\begin{cases} \ddot{\xi} + \frac{1}{\eta^2}(\xi - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2}(\xi - \xi_1) = 0, \\ \ddot{\xi}_1 + \frac{\lambda}{\mu \eta^2}(\xi_1 - \xi) + \frac{\varepsilon(\tau)}{\mu \eta}(\dot{\xi}_1 - \cos \tau) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В (3) приняты следующие безразмерные параметры и переменные:

$$\eta = \frac{\omega}{k} \text{ – относительная частота};$$

$$\tau = \omega t \text{ – безразмерное время};$$

$$\varepsilon(\tau) = \frac{b(\tau)}{mk} \text{ – относительное демпфирование};$$

$$\xi = \frac{x}{y_0}, \quad \ddot{\xi} = \frac{\ddot{x}}{y_0 \omega^2} \text{ – смещение и ускорение защищаемого объекта};$$

$$\xi_1 = \frac{x_1}{y_0}, \quad \dot{\xi}_1 = \frac{\dot{x}_1}{y_0 \omega}, \quad \ddot{\xi}_1 = \frac{\ddot{x}_1}{y_0 \omega^2} \text{ – смещение, скорость и ускорение динамического гаси-}$$

теля.

Будем исследовать установившиеся колебания виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем.

Полагаем, что реализуется прерывистый процесс демпфирования [4, 5].

В пределах одного периода колебаний выделяем два интервала «включения демпфера» $\tau_1 \dots \tau_2$ и $\tau_3 \dots \tau_4$, (см. рис. 2):

$$\varepsilon(\tau) = \begin{cases} \varepsilon_0, \text{ если } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \text{ или } \tau_3 \leq \tau \leq \tau_4, \text{ или если } f(\bar{\xi}) > 0; \\ 0, \text{ во всех остальных случаях (или } f(\bar{\xi}) < 0), \end{cases} \quad (4)$$

где $\varepsilon_0 \text{ – const}$, а $f(\bar{\xi})$ – позиционная функция управления, определяющая некоторый обобщенный алгоритм переключения демпфера, зависящий от компонентов состояния системы.

Начальные и конечные моменты времени выделенных интервалов связаны следующими зависимостями:

$$\tau_2 - \tau_1 = \tau_4 - \tau_3; \quad \tau_3 = \tau_1 + \pi; \quad \tau_4 = \tau_2 + \pi \quad (5)$$

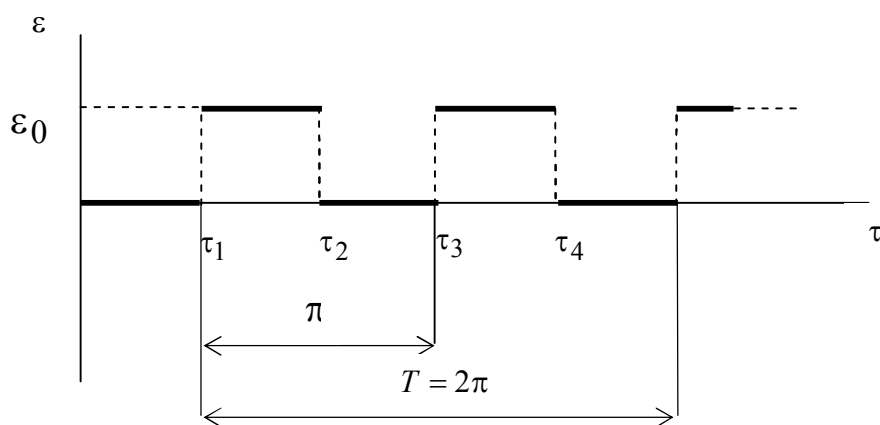


Рисунок 2 – График (циклограмма) прерывистого процесса демпфирования

T – период (безразмерный) установившихся колебаний

$$(T = T^* \cdot \omega, \text{ где } T^* = \frac{2\pi}{\omega}).$$

Для решения системы уравнений (3) используем метод гармонического баланса, полагая, что режим установившихся колебаний защищаемого объекта и динамического гасителя описывается выражениями:

$$\xi = A \cos \tau + B \sin \tau; \quad \xi_1 = C \cos \tau + D \sin \tau, \quad (6)$$

где A, B, C, D неизвестные коэффициенты.

Произведем замену в (3) нелинейного слагаемого (диссипативной силы) приближенным выражением, которое запишем в виде усеченного тригонометрического ряда.

$$\varepsilon(\tau)(\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \approx R_1 \cos \tau + R_2 \sin \tau. \quad (7)$$

Здесь, с учетом соотношений (5) коэффициенты Фурье:

$$R_1(\varepsilon_0, C, D, \tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\pi} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \varepsilon_0 (\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \cos \tau d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{\tau_1 + \pi}^{\tau_2 + \pi} \varepsilon_0 (\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \cos \tau d\tau, \quad (8)$$

$$R_2(\varepsilon_0, C, D, \tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\pi} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \varepsilon_0 (\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \sin \tau d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{\tau_1 + \pi}^{\tau_2 + \pi} \varepsilon_0 (\dot{\xi}_1 - \cos \tau) \sin \tau d\tau. \quad (9)$$

После интегрирования имеем:

$$R_1 = C \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\sin^2 \tau_1 - \sin^2 \tau_2) + D \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right) + \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right), \quad (10)$$

$$R_2 = C \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 \right) + D \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\cos^2 \tau_1 - \cos^2 \tau_2) + \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\cos^2 \tau_2 - \cos^2 \tau_1) \quad (11)$$

В соответствии с методом гармонического баланса, система уравнений (3) преобразована к виду:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} + \frac{1}{\eta^2} (\xi - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2} (\xi - \xi_1) = 0; \\ \ddot{\xi}_1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} (\xi_1 - \xi) + \frac{R_1}{\mu\eta} \cos \tau + \frac{R_2}{\mu\eta} \sin \tau = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Учитывая соотношения (6), (10) и (11), переходим к двум трансцендентным уравнениям:

$$-A \cos \tau - B \sin \tau + \frac{1}{\eta^2} (A \cos \tau + B \sin \tau - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2} (A \cos \tau + B \sin \tau - C \cos \tau - D \sin \tau) = 0; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & -C \cos \tau - D \sin \tau + \frac{\lambda}{\mu \eta^2} (C \cos \tau + D \sin \tau - A \cos \tau - B \sin \tau) + \\ & + \cos \tau \left[C \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\sin^2 \tau_1 - \sin^2 \tau_2) + D \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right) \right] \frac{1}{\mu \eta} + \sin \tau \left[C \frac{\varepsilon_0}{\pi} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 \right) + \right. \\ & \left. + D \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\cos 2\tau_1 - \cos 2\tau_2) + \frac{\varepsilon_0}{\pi} (\cos 2\tau_2 - \cos 2\tau_1) \right] \frac{1}{\mu \eta} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

В уравнениях (13) и (14) группируем слагаемые, содержащие $\cos \tau$ и $\sin \tau$. Приравняв данные слагаемые к нулю, приходим к следующей системе алгебраических уравнений для определения коэффициентов A, B, C, D :

$$A \left(\frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} - 1 \right) + B \cdot 0 + C \left(-\frac{\lambda}{\eta^2} \right) + D \cdot 0 = 0; \quad (15)$$

$$A \cdot 0 + B \left(\frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} - 1 \right) + C \cdot 0 + D \left(-\frac{\lambda}{\eta^2} \right) = \frac{1}{\eta^2}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & A \left(-\frac{\lambda}{\mu \eta^2} \right) + B \cdot 0 + C \left(-1 + \frac{\lambda}{\mu \eta^2} + \frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} (\sin^2 \tau_1 - \sin^2 \tau_2) \right) + \\ & + D \left(\frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} \left(\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right) \right) = -\frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & A \cdot 0 + B \left(-\frac{\lambda}{\mu \eta^2} \right) + C \left(\frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 \right) \right) + \\ & + D \left(-1 + \frac{\lambda}{\mu \eta^2} + \frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} (\cos^2 \tau_1 - \cos^2 \tau_2) \right) = -\frac{\varepsilon_0}{\pi \mu \eta} (\cos^2 \tau_2 - \cos^2 \tau_1). \end{aligned} \quad (18)$$

Запишем уравнения (15) – (18) в виде:

$$\begin{aligned} & Aa_{11} + Ba_{12} + Ca_{13} + Da_{14} = b_1 \\ & Aa_{21} + Ba_{22} + Ca_{23} + Da_{24} = b_2 \\ & Aa_{31} + Ba_{32} + Ca_{33} + Da_{34} = b_3 \\ & Aa_{41} + Ba_{42} + Ca_{43} + Da_{44} = b_4 \end{aligned} \quad (19)$$

В уравнениях (19) приняты следующие обозначения:

$$a_{11} = \frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} - 1; \quad a_{12} = 0; \quad a_{13} = -\frac{\lambda}{\eta^2}; \quad a_{14} = 0, \quad (20)$$

$$a_{21} = 0; \quad a_{22} = \frac{1}{\eta^2} + \frac{\lambda}{\eta^2} - 1; \quad a_{23} = 0; \quad a_{24} = -\frac{\lambda}{\eta^2}, \quad (21)$$

$$a_{31} = -\frac{\lambda}{\mu\eta^2}; \quad a_{32} = 0; \quad a_{33} = -1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} + \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta}(\sin^2 \tau_1 - \sin^2 \tau_2); \quad (22)$$

$$a_{34} = \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta} \left(\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right),$$

$$a_{41} = 0; \quad a_{42} = -\frac{\lambda}{\mu\eta^2}; \quad a_{43} = \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta} \left(\tau_1 - \tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 \right); \quad (23)$$

$$a_{44} = -1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2} + \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta} (\cos^2 \tau_1 - \cos^2 \tau_2),$$

$$b_1 = 0; \quad b_2 = \frac{1}{\eta^2}; \quad b_3 = \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta} \left(\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2} \sin 2\tau_2 - \frac{1}{2} \sin 2\tau_1 \right); \quad (24)$$

$$b_4 = \frac{\varepsilon_0}{\pi\mu\eta} (\cos^2 \tau_1 - \cos^2 \tau_2)$$

Основные динамические свойства исследуемой виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем можно выявить, анализируя зависимости коэффициентов динамичности:

$$K_m = \frac{|x_{\max}|}{y_0}, \quad (25)$$

$$K_d = \frac{|x_1 \max|}{y_0} \quad (26)$$

от исходных параметров, принятых в модели (3) и далее в системе уравнений (15) – (18).

Данные коэффициенты динамичности характеризуют интенсивность колебаний защищаемого объекта и динамического гасителя соответственно.

Полная совокупность параметров системы уравнений (15) – (18):

$$\Theta = \langle \eta, \lambda, \mu, \varepsilon_0, \tau_1, \tau_2 \rangle \quad (27)$$

Отдельные из этих параметров могут быть заданы. Поэтому, в частности, возможно исследование коэффициентов динамичности (25), (26) как функции $K_m(\tau_1, \tau_2)$ и $K_d(\tau_1, \tau_2)$.

Система уравнений (15) – (18) как исходная, а также преобразованная к виду (19), содержит коэффициенты A, B, C, D , которые зависят от параметров (27).

Учитывая, что перемещение защищаемого объекта описывается уравнением $\xi = A \cos \tau + B \sin \tau$, а перемещение массы динамического гасителя – уравнением $\xi_1 = C \cos \tau + D \sin \tau$, то коэффициенты динамичности (25) и (26) можно записать в виде:

$$K_m = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (28)$$

$$K_d = \sqrt{C^2 + D^2}. \quad (29)$$

Целенаправленный выбор значений параметров принятой совокупности (27) связан с минимизацией коэффициента динамичности (25).

В нашем случае при решении поставленной оптимизационной задачи примем в качестве целевой функции:

$$K_m(\Theta) = \sqrt{A(\Theta)^2 + B(\Theta)^2} \rightarrow \min. \quad (30)$$

Причем:

$$K_d(\Theta) < K_f, \quad (31)$$

где K_f – фиксированное значение, ограничивающее перемещение массы динамического гасителя.

Для установившегося процесса колебаний необходимо принять следующие ограничения:

$$\tau_1 < \tau_2, \tau_2 - \tau_1 < \pi. \tag{32}$$

Наличие ограничений в виде соотношений (32) на переменные коэффициента динамичности, как целевой функции (30) определяет задачу условий оптимизации [6, 7].

В рамках решения данной оптимизационной задачи определена совокупность параметров виброзащитной системы, при которых целевая функция (30) принимает минимальное значение. Выборочные данные расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Выборочные данные оптимизации параметров виброзащитной системы с управляемым динамическим гасителем: $\lambda = 4, \mu = 0.1, \varepsilon_0 = 0.72$

η	K_m	Vot	Vm	τ_1	τ_2
		$\dot{\xi}_1(\tau_1) - \cos(\tau_1)$	$\dot{\xi}(\tau_2)$		
1.4	0.67	2.789×10^{-4}	-9.742×10^{-3}	1.2	3.26
1.6	$\frac{0.43}{2}$	-3.007×10^{-3}	4.625×10^{-3}	1.36	$\frac{3.1}{2}$
1.8	$\frac{0.30}{3}$	-5.132×10^{-3}	6.88×10^{-3}	1.46	$\frac{2.9}{5}$
2.0	$\frac{0.22}{5}$	3.156×10^{-3}	8.66×10^{-3}	1.53	$\frac{2.7}{8}$

Анализ полученных результатов показал, что оптимальным значениям коэффициента динамичности ($K_m \rightarrow \min$) (или близким к ним) соответствуют «нулевые» значения абсолютной скорости защищаемого объекта ($\dot{\xi}$) и относительной скорости массы динамического гасителя и подвижного основания ($\dot{\xi}_1 - \cos t$). Причем относительная скорость и абсолютная скорость меняют знаки, соответственно когда $t \approx \tau_1$ и $t \approx \tau_2$. Это свидетельствует о том, что управляемый демпфер включается в работу при смене знака относительной скорости, а выключается из работы при смене знака абсолютной скорости:

$$\dot{\xi}_1(\tau_1) - \cos(\tau_1) = 0, < \text{включение в работу} > \tag{33}$$

$$\dot{\xi}(\tau_2) = 0. < \text{выключение из работы} > \tag{34}$$

Программируемые условия (33) и (34) позволяют выразить позиционную функцию управления в виде:

$$f(\bar{\xi}) = \dot{\xi}(\tau) [\dot{\xi}_1(\tau) - \cos(\tau)] \tag{35}$$

Заметим, что для реализации программируемых условий переключений демпфирования, в соответствии с функцией управления (35), требуется отслеживать компоненты состояния системы в абсолютном и относительном движении, используя при этом электронные средства слежения.

Таким образом, согласно зависимостям (33) – (34), алгоритм переключения демпфера вязкого сопротивления, представленного формулой (4), можно записать в обобщенном виде:

$$\varepsilon(\tau) = \begin{cases} \varepsilon_0, & \text{если } \dot{\xi}(\dot{\xi}_1 - \cos \xi) > 0; \\ 0, & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \tag{36}$$

Основные динамические свойства рассматриваемой виброзащитной системы были определены с учетом влияния дополнительного вязкого сопротивления динамического гасителя и фонового сопротивления среды. Соответствующую уточненную математическую модель системы запишем в виде:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} + \frac{1}{\eta^2}(\xi - \sin \tau) + \frac{\lambda}{\eta^2}(\xi - \xi_1) + \frac{\varepsilon_1}{\eta}(\dot{\xi} - \dot{\xi}_1) + \frac{\varepsilon_2}{\eta}(\dot{\xi} - \cos \tau) = 0, \\ \ddot{\xi}_1 + \frac{\lambda}{\mu\eta^2}(\xi_1 - \xi) + \frac{\varepsilon(\tau)}{\mu\eta}(\dot{\xi}_1 - \cos \tau) + \frac{\varepsilon_1}{\mu\eta}(\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}) = 0. \end{cases} \tag{37}$$

где $\varepsilon_1 = b_1/mk$ – относительное демпфирование дополнительного демпфера;

$\varepsilon_2 = b_2/mk$ – относительное демпфирование фонового сопротивления.

В результате моделирования колебаний системы (3) были установлены P -области изменения параметров $(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu, \lambda)$, при которых гарантируется эффективность виброзащиты:

$$K \leq 1, \quad \eta \leq 1,41; \quad K \leq \frac{1}{|1-\eta^2|}, \quad \eta > 1,41. \quad (38)$$

Кроме того, в границах P -области исключалась возможность повторных переключений демпфирования по условию $\dot{x} \approx 0$.

На рисунке 3 представлены две характерные P -области.

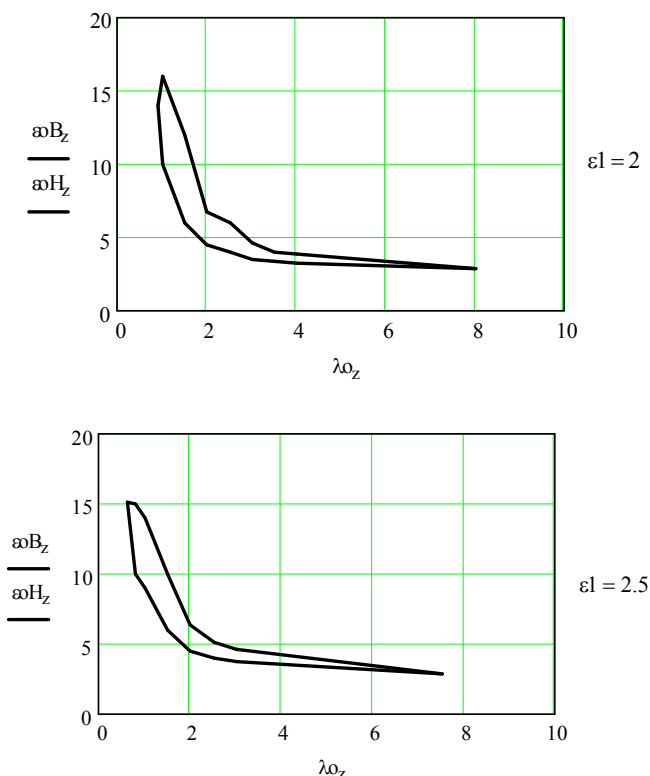


Рисунок 3 – Область параметров системы, в которой гарантирована эффективность виброзащиты

Параметры системы: $\mu = 0.1$; $\varepsilon_2 = 0.01$.

Данные области имеют ряд особенностей:

1. С увеличением коэффициента жесткости λ расстояние между верхней $\varepsilon_0 B$ и нижней $\varepsilon_0 H$ границами области уменьшается, область вытягивается вдоль оси (λ) и стягивается в точку с координатами $\lambda \approx 8, \varepsilon_0 \approx 2.5$;

2. При рекомендуемых диапазонах изменения относительного демпфирования $(2 \leq \varepsilon_1 \leq 2.5)$, коэффициента жесткости $(1 < \lambda \leq 3)$ и постоянных параметров $(\mu = 0.1, \varepsilon_2 = 0.01)$ расстояния между верхней $\varepsilon_0 B$ и нижней $\varepsilon_0 H$ границами P -области наибольшее – max 5; наименьшее – min 2. Причем, с увеличением ε_0 данная часть P -области вытягивается вдоль оси ε_0 и резко обрывается при $\lambda \approx 1$ (стягивается в точку с координатами $\lambda \approx 1, \varepsilon_0 \approx 15$).

1. Елисеев, С.В. Динамика механических систем с дополнительными связями / С.В. Елисеев, Л.Н. Волков, В.П. Кухаренко. – Новосибирск: Наука, 1990. – 214 с.
2. Карамышкин, В.В. Динамическое гашение колебаний / В.В. Карамышкин. – Л.: Машиностроение, 1988. – 108 с.
3. Ильин, М.М. Теория колебаний: учеб. для вузов / М.М. Ильин, К.С. Колесников. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 271 с.
4. Фоминова, О.В. Прерывистое демпфирование в системах виброзащиты: основы теории, приложения / О.В. Фоминова. – М.: Машиностроение–1, 2005. – 256 с.
5. Чернышев, В.И. Разработка основ классификации виброзащитных систем с импульсным управлением / В.И. Чернышев // Известия вузов. – Машиностроение, 1988. – №4. – С. 11-13.
6. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел – М.: Мир, 1986. – 349 с.
7. Корн, Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.А. Корн, Т.М. Корн. – М.: Наука, 1978. – 831 с.

Фоминова Ольга Владимировна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел. 8 (4862) 41-98-72
 E-mail: termeh@ostu.ru

Барбашова Татьяна Александровна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 аспирант кафедры «Динамика и прочность машин»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел. 8 (4862) 41-98-49
 E-mail: malinin@ostu.ru

Чернышев Владимир Иванович

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 Тел. 8 (4862) 41-98-49
 E-mail: malinin@ostu.ru

O.V. FOMINOVA, T.A. BARBASHOVA, V.I. CHERNYSHJOV

VIBRATION ISOLATION SYSTEM WITH GUIDED DYNAMIC DAMPER

This article examines the system of vibration shielding with the controlled dynamic extinguisher, which is effective at any frequency of operating range. In the construction of dynamic extinguisher the damper of the intermittent action is used. The algorithm of switchings and the corresponding position control function are found from the method of harmonic balance.

Keywords: vibration shielding, dynamic extinguisher, damper, control.

BIBLIOGRAPHY

1. Eliseev, S.V. Dinamika mehanicheskikh sistem s dopolnitel'nymi svyazjami / S.V. Eliseev, L.N. Vol-kov, V.P. Kuharenko. – Novosibirsk: Nauka, 1990. – 214 s.
2. Karamyshkin, V.V. Dinamicheskoe gashenie kolebanij / V.V. Karamyshkin. – L.: Mashinostroenie, 1988. – 108 s.
3. Il'in, M.M. Teorija kolebanij: ucheb. dlja vuzov / M.M. Il'in, K.S. Kolesnikov. – M.: Izd-vo MG TU im. Bauma-na, 2003. – 271 s.
4. Fominova, O.V. Preryvistoe dempfirovanie v sistemah vibrozawity: osnovy teorii, prilozhenija / O.V. Fomino-va. – M.: Mashinostroenie–1, 2005. – 256 s.
5. Chernyshev, V.I. Razrabotka osnov klassifikacii vibrozawitnyh sistem s impul'snym upravleni-em / V.I. Cher-nyshev // Izvestija vuzov. – Mashinostroenie, 1988. – №4. – S. 11-13.
6. Reklejtis, G. Optimizacija v tehnikе: v 2-h kn. Per. s angl. / G. Reklejtis, A. Rejvindran, K. Rjagsdel – M.: Mir, 1986. – 349 s.

7. Korn, G.A. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / G.A. Korn, T.M. Korn. – M: Nauka, 1978. – 831 s.

Fominova Olga Vladimirovna

State University – ESPC, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Theoretical and applied mechanics”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-72

E-mail: termeh@ostu.ru

Barbashova Tatjana Aleksandrovna

State University – ESPC, Orel

Post-graduate student of department “Dynamics and machine resistance”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-49

E-mail: malinin@ostu.ru

Chernyshjov Vladimir Ivanovich

State University – ESPC, Orel

Doctor of technical science, professor of department “Dynamics and machine resistance”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-49

E-mail: malinin@ostu.ru

М.В. АЛЕКСАНДРОВ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕЙ ОТЛИВКОЙ И ЛИТЕЙНОЙ ФОРМОЙ

Проведено аналитическое исследование влияния скорости нестационарного конвективного движения расплава Al-3%Si на интенсивность теплообмена между затвердевающей отливкой и литейной формой. Представлены результаты вычислений, демонстрирующие важность учета конвективного движения расплавов при разработке конкретной литейной технологии.

Ключевые слова: конвекция; коэффициент теплопередачи; затвердевание; расплав; число Нуссельта; число Рэлея.

Тепловым процессам формирования отливок посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований [1,5]. Можно отметить, что исследователи глубоко продвинулись в изучении тепловых процессов, происходящих как внутри отливок, так и в окружающем их пространстве. В то же время практически отсутствуют работы, в которых учитывается конвективное движение расплавленного металла в полости формы и его влияние на тепловые процессы, происходящие в отливке.

Проблема прогнозирования процессов фазовых переходов в расплаве при наличии конвекции актуальна для целого ряда технологических процессов. Кинетика роста затвердевшей корки расплава, осложненная возникающими потоками естественной конвекции, играет важную роль при получении отливок высокого качества. Поэтому адекватное объяснение процессов затвердевания металлов только в рамках нестационарной теплопроводности представляется практически невозможным.

Целью настоящей работы является анализ влияния нестационарной тепловой конвекции расплава на интенсивность теплообмена между затвердевающей отливкой и литейной формой.

1 МОДЕЛЬ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ

Феномен свободной конвекции расплава состоит в самопроизвольном возникновении движения при контакте жидкого расплавленного металла с холодной стенкой формы. Причиной движения является разность плотностей более холодного (прилегающего к стенке формы) и более горячего (вдали от стенки) расплава. В поле силы тяжести разность плотностей приводит к появлению движущей архимедовой силы, направление которой зависит от знака температурного напора ($T_h - T_c$) (рис. 1).

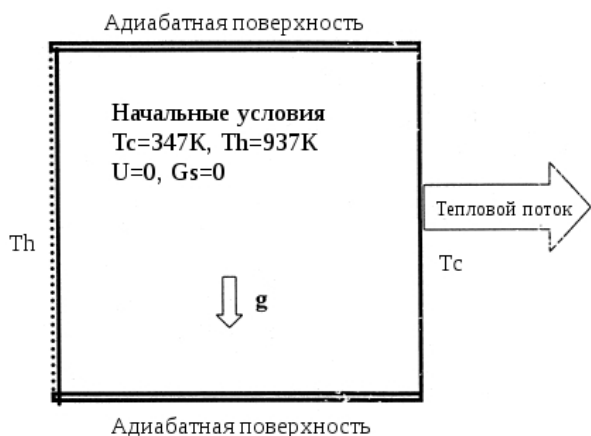


Рисунок 1 — Схема расчетной области

Традиционной моделью для описания тепловой гравитационной конвекции является система Буссинеска-Обербека, которая представляет собой результат упрощенных уравнений механики сплошных сред при условиях [2]:

1. Плотность жидкости зависит лишь от ее температуры (жидкость изотермически несжимаема)
2. Вклад диссипации и сил давления в описание притока тепла пренебрежимо мал
3. Динамический коэффициент вязкости, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости предполагаются постоянными.

Рассмотрим задачу о формировании естест-

венной конвекции в плоской квадратной полости, заполненной расплавом. Горизонтальные стенки полости предполагаются теплоизолированными с наружной стороны. Будем считать, что при достижении температуры $T=T_s$ расплав затвердевает. На границе расплав-форма/твердая фаза принимается условие прилипания $\vec{U} = 0$. Начальная температура расплава $T_i=937K$.

Рассматриваемая задача является нестационарной, что обусловлено наличием зоны существенной температурной неоднородности в расплаве.

2 РАСЧЕТ СКОРОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ВБЛИЗИ ФРОНТА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Вертикальное движение расплава имеет место в области вблизи стенки, где сосредоточено основное изменение температуры. Характерная скорость потока является внутренним, подлежащим определению параметром задачи. Движение расплава происходит без сильных ускорений, при противодействии одинаковых по порядку сил гравитации и вязкого трения [2].

Скорость конвективного движения расплава определяется по формуле:

$$U = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot gL}, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ – относительная разность плотностей, зависящая от температурного напора (T_h-T_c) и определяемая по формуле:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \equiv \frac{\rho_{T_c} - \rho_{T_h}}{\rho} = \beta(T_h - T_c) = \beta\Delta T, \quad (2)$$

где β – коэффициент теплового расширения, K^{-1}

Величина $\beta\Delta T$ называется числом Буссинеска (Bu).

Таким образом, формула для расчета скорости свободной тепловой конвекции расплава имеет вид:

$$U = (\beta\Delta T \cdot gL)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, $g=9,81 \text{ м/с}^2$;

L – характерный размер отливки, м .

На рисунке 2 приведены результаты расчета скорости конвективного движения расплава Al-3%Si как функции времени и характерного размера отливки.

Резкое падение скорости конвективного движения расплава в момент его контакта с поверхностью формы (момент времени от 0 до 70 секунд (рис. 2) объясняется скачком температуры стенки формы (T_c), который приводит к понижению величины ΔT и, соответственно, к снижению скорости движения расплава. Далее, с образованием на поверхности расплава твердой корки с постоянной температурой (T_s) уменьшение температурного напора прекращается, и скорость конвективного движения расплава остается практически неизменной (рис. 2).

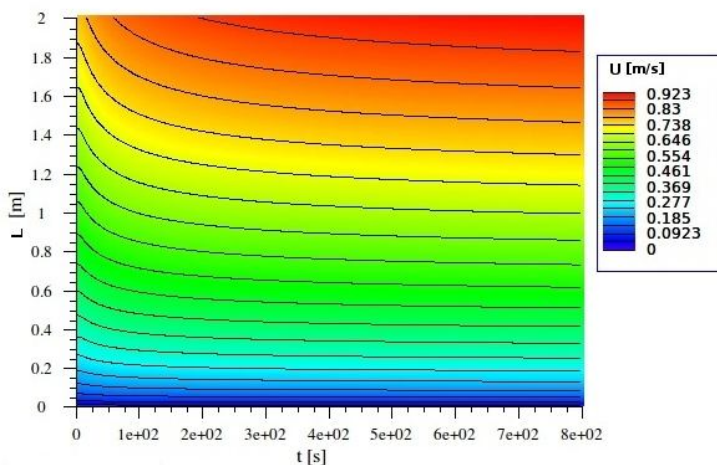


Рисунок 2 — Значения скорости конвективного движения расплава Al-3%Si вблизи фронта затвердевания

3 РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

В задачах конвективного теплообмена искомой величиной является число Нуссельта, поскольку именно в этот параметр входит определяемая величина h — коэффициент теплопередачи:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L}, \quad (4)$$

где k — коэффициент теплопроводности расплава, $Вт/м \cdot К$;

Nu — число Нуссельта, определяемое для расплавов цветных сплавов по формуле [3]:

$$Nu = 0,53(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} = 0,53(Ra)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где Gr — число Грасгофа;

Pr — число Прандтля;

Ra — число Рэлея.

Число Нуссельта — безразмерный параметр, характеризующий интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью и потоком жидкости в случае естественной или вынужденной конвекции.

Число Грасгофа является мерой соотношения архимедовой силы, вызванной неравномерным распределением плотности в неоднородном поле температур, и силы трения.

Число Прандтля — критерий подобия, учитывающий влияние физических свойств жидкости (расплава) на интенсивность теплообмена.

Число Рэлея характеризует отношение потока тепла в среде (жидкости или газе), возникающего вследствие неравномерности поля температуры у поверхности тела, к теплопроводности этой среды. Число Рэлея определяется по формуле:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{a} = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L}{\nu \cdot a}, \quad (6)$$

где ν — кинематическая вязкость расплава, $м^2/с$;

a — температуропроводность, $м^2/с$.

При сопоставлении формул 3 и 6 нетрудно заметить их схожесть. Действительно, число Рэлея и скорость конвективного движения связаны прямой зависимостью. Следовательно, с увеличением скорости конвекции повышается и число Рэлея, которое, как было отмечено выше, является характеристикой конвективного теплообмена. Таким образом, можно сделать вывод о том, что число Рэлея является связующим звеном между скоростью конвективного движения расплава и интенсивностью теплообмена между затвердевающей отливкой и литейной формой.

Естественная конвекция возникает в расплавах при числе Рэлея $Ra > 10^3$. При значениях $10^3 < Ra < 10^6$ формируется стабильный конвективный поток, переходящий к турбулентному течению при $Ra \approx 10^9 \dots 10^{10}$.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов коэффициента теплопередачи с учетом конвективного движения расплава Al-3%Si в зависимости от толщины сечения отливки. Число Нуссельта рассчитывалось для значений числа Рэлея $Ra = 10^3, Ra = 10^4, Ra = 10^5, Ra = 10^6$.

В таблице 1 показаны расчетные значения коэффициента теплопередачи с учетом и без учета конвективного движения расплава для отливки сечением 0,3 м из сплава Al-3%Si.

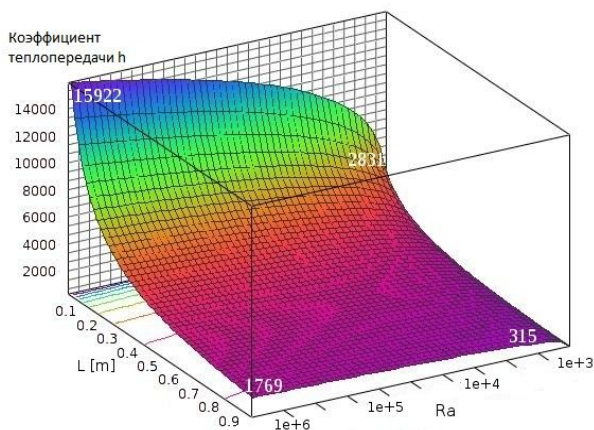


Рисунок 3 — Значения коэффициента теплопередачи с учетом конвективного движения расплава Al-3%Si

Таблица 1 — Расчетные значения коэффициента теплопередачи с учетом и без учета конвективного движения расплава

	Ra 10 ³	Ra 10 ⁴	Ra 10 ⁵	Ra 10 ⁶	Без учета конвекции
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К	943,8	1678,3	2984,5	5307,4	316,7

Очевидно, что даже при слабом конвективном движении интенсивность теплообмена между расплавом и формой/твердой фазой возрастает в несколько раз. С повышением числа Рэлея коэффициент теплопередачи значительно увеличивается, что связано с повышением скорости нестационарного конвективного движения расплава в полости формы.

Полученные результаты имеют большое практическое значение для организации рационального режима теплоотвода при производстве качественных слитков и отливок.

Важным с точки зрения производства отливок с высокими механическими и эксплуатационными свойствами является получение мелкозернистой структуры в отливках. Основным параметром, определяющим размер зерен, является скорость кристаллизации расплава [4], величина которой, как было показано выше, во многом зависит от скорости конвективного движения расплава. Именно поэтому актуальным сейчас является применение таких технологических приемов, как воздействие на расплав электромагнитных полей и вибрации, которые обеспечивают повышение скорости конвективного движения расплава и, как следствие, увеличение скорости затвердевания отливки.

При выполнении расчетов были заданы следующие физические свойства сплава Al-3%Si:

1. коэффициент теплового расширения $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
2. плотность (при T=293 K) 2,7 г/м³
3. плотность (при T=T_{пл}) 2,3 г/м³
4. температура плавления 933 K
5. кинематическая вязкость $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
6. теплопроводность расплава 95 Вт/м·К
7. температуропроводность $8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов, В.А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. - М.: Машиностроение, 1998. - 360 с.
2. Джозеф, Д. Устойчивость движений жидкости [Текст] / Д. Джозеф. - М.: Мир, 1981. - 638 с.
3. Эльдарханов, А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование [Текст] / А.С. Эльдарханов, В.А. Ефимов, А.С. Нурадинов. - М.: Машиностроение, 2001. - 208 с.
4. Корнев, Л.П. Анализ контактного взаимодействия отливки и формы. Тепловая задача [Текст] / Л.П. Корнев, М.В. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №1, 2011. - с.10-15.
5. Li, C. Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel [Текст] / C. Li, B.G. Thomas // Metallurgical and Material Transactions, vol. 35B, 2004. - p. 1151-1172.

Александров Максим Валерьевич

Государственный университет-УНПК, г. Орел

Аспирант кафедры «Автопласт»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. 8-960-694-34-22

E-mail: aleksandrov86@live.ru

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NONSTATIONARY THERMAL CONVECTION OF THE MELT ON THE HEAT EXCHANGE RATE BETWEEN A CASTING AND A MOULD

Analytical study of the influence of velocity of nonstationary convective motion of the melt Al-3%Si on the heat exchange rate between a casting and a mould is performed. The results of calculations showing the importance of considering of the convective motion of melt during development of a particular foundry technology are presented.

Keywords: convection; heat transfer coefficient; solidification; melt; Nusselt number; Rayleigh number.

BIBLIOGRAPHY

1. Efimov, V.A. Sovremennye tehnologii razlivki i kristallizacii splavov [Tekst] / V.A. Efimov, A.S. Jel'darhanov. - M.: Mashinostroenie, 1998. - 360 s.
2. Dzhozef, D. Ustojchivost' dvizhenij zhidkosti [Tekst] / D. Dzhozef. - M.: Mir, 1981. -638 c.
3. Jel'darhanov, A.S. Processy formirovanija otlivok i ih modelirovanie [Tekst] / A.S. Jel'darhanov, V.A. Efimov, A.S. Nuradinov. - M.: Mashinostroenie, 2001. - 208 s.
4. Korenev, L.P. Analiz kontaktnogo vzaimodejstvija otlivki i formy. Teplovaja zadacha [Tekst] / L.P. Korenev, M.V. Aleksandrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, №1, 2011. - s.10-15
5. Li, C. Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel [Tekst] / C. Li, B.G. Thomas // Metallurgical and Material Transactions, vol. 35B, 2004. - p. 1151-1172.

Aleksandrov Maksim Valerievich

State University – ESPC, Orel

Post-graduate student of department “Automated processes and machines for chipless material process”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-960-694-34-22

E-mail: aleksandrov86@live.ru

Ю.В. ЕРМОШЕНКО, Р.С. БОЛЬШАКОВ, Ю.О. АБРОСИМОВА

ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ С СОЧЛЕНЕНИЯМИ

Рассматривается динамический гаситель колебаний, имеющий сочленение в виде вращательного шарнира. Сочленение обеспечивает взаимодействие рычажного механизма с объектом защиты. Предлагается математическая модель и соотношение для выбора параметров эффективной работы.

Ключевые слова: динамический гаситель колебаний, сочленения твердых тел, динамика рычажных механизмов, виброзащита.

ВВЕДЕНИЕ

Динамическое гашение колебаний в последние годы стало одним из актуальных направлений в практике вибрационной защиты машин и оборудования от действия динамических нагрузок [1]. Известны многочисленные конструктивно-технические варианты построения динамических гасителей колебаний, способы самонастройки параметров и автоматического управления динамическим состоянием виброзащитных систем [2]. В меньшей степени изучены возможности использования в структуре систем дополнительных связей различной природы, в частности, рычажных связей. Такие связи могут быть реализованы на основе рычажных механизмов первого или второго рода, а также и в других конструктивных формах, например, с использованием Г-образных рычажных механизмов, вводимых сочленениями.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим динамический гаситель колебаний (рис.1) в составе виброзащитной системы, обеспечивающей защиту объекта от вибраций со стороны основания и сочленение в *Т.А.*

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $P(t)$ – внешнее силовое возмущение; $z(t)$ – внешнее кинематическое возмущение; m_1 – масса объекта защиты; m_2 и m_3 – массы настраиваемых элементов; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты жесткости упругих элементов; φ – угол поворота рычага относительно объекта защиты; l_1, l_2 – длины плеч рычага; y_1, y_2, y_3 – координаты массоинерционных элементов в абсолютном движении.

Предполагается, что колебательные движения в системе относительно положения равновесия достаточно малы, что позволяет использовать упрощенные линейные представления; полагается также, что силы трения малы.

Целью исследования является оценка возможностей создания в системе режимы динамического гашения, в которых определяются настроечные параметры. Таковыми могли бы быть длины плеч рычага и величины масс элементов m_1 и m_2 . Конструктивные варианты построения систем изменения названных параметров представляются вполне реализуемыми, также как и схемы сбора и обработки информации о динамическом состоянии системы. Запишем выражения для кинетической

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2, \quad (1)$$

и потенциальной энергии

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - y_1)^2. \quad (2)$$

Введем ряд соотношений между координатами

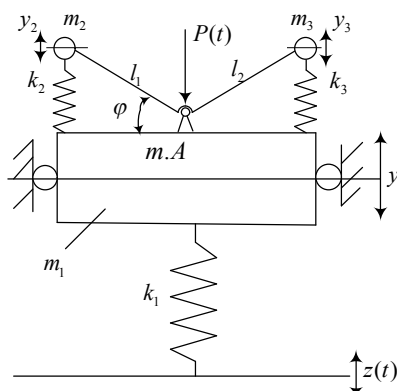


Рисунок 1 – Расчетная схема динамического гасителя колебаний рычажного типа

$$y_2 = y_1 + \phi l_1, \quad y_3 = y_1 - \phi l_2, \quad (3)$$

где учтены особенности рычага второго рода в отношении изменения входного сигнала и по величине и по направлению. Будем полагать, что элементы m_2 и m_3 имеют вертикальное движения, а изгиб рычага не принимается во внимание (хотя это не так и конфигурация расположения l_1 и l_2 имеет значение). С учетом (3) выражения (1) и (2) можно записать в виде

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{y}_1 + \dot{\phi} l_1)^2 + \frac{1}{2} m_3 (\dot{y}_1 - \dot{\phi} l_2)^2, \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z)^2 + \frac{1}{2} k_2 (-\phi l_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (\phi l_2)^2. \quad (5)$$

Используя обобщенное уравнение Лагранжа 2 рода, получим уравнения движения системы

$$\ddot{y}_1 (m_1 + m_2 + m_3) + \ddot{\phi} (m_2 l_1 - m_3 l_2) + k_1 y_1 = k_1 z + P, \quad \ddot{\phi} (m_2 l_1^2 + m_3 l_2^2) + \dot{y}_1 (m_2 l_1 - m_3 l_2) + \phi (k_2 l_1^2 + k_3 l_2^2) = 0. \quad (6)$$

Структурная схема эквивалентной системы автоматического управления (САУ) показана на рис. 2; из ее анализа следует, что между парциальными системами существует упругая связь, которая при выполнении условий симметрии может «обнуляться» и сделать движения парциальных систем независимыми.

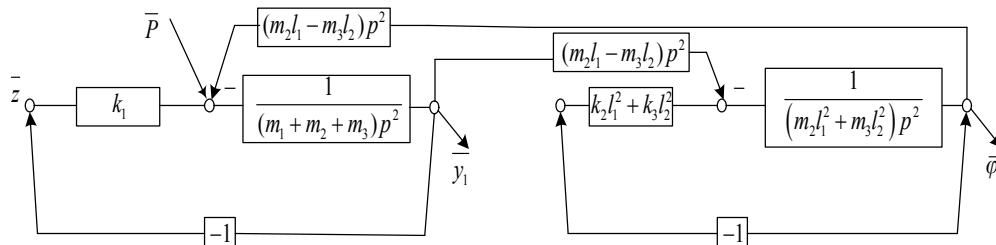


Рисунок 2 – Структурная схема, соответствующая системе на рисунке 1

Найдем передаточную функцию системы при кинематическом возмущении

$$W_1 = \frac{\bar{y}_1}{z} = \frac{[(m_2 l_1^2 + m_3 l_2^2) p^2 + k_2 l_1^2 + k_3 l_2^2] \cdot k_1}{[(m_1 + m_2 + m_3) p^2 + k_1] \times [(m_2 l_1^2 + m_3 l_2^2) p^2 + k_2 l_1^2 + k_3 l_2^2] - (m_2 l_1 - m_3 l_2)^2 p^4}. \quad (7)$$

Из выражения (7) можно найти частоту динамического гашения при кинематическом возмущении

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{k_2 l_1^2 + k_3 l_2^2}{m_2 l_1^2 + m_3 l_2^2} = \frac{k_2 + k_3 b^2}{m_2 + m_3 b^2}, \quad (8)$$

где $b = l_2/l_1$ – передаточное отношение рычага второго рода (знак учтен при составлении выражения для потенциальной энергии). Частота собственных колебаний системы может быть найдена из частотного уравнения

$$[(m_1 + m_2 + m_3) p^2 + k_1] \times [(m_2 l_1^2 + m_3 l_2^2) p^2 + k_2 l_1^2 + k_3 l_2^2] - (m_2 l_1 - m_3 l_2)^2 p^4 = 0. \quad (9)$$

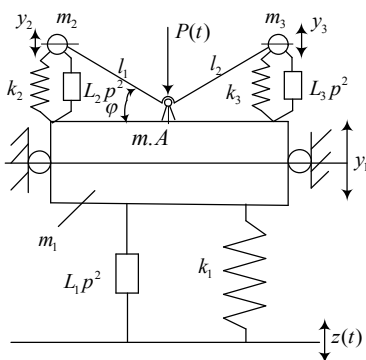


Рисунок 3 – Расчетная схема системы с дополнительными связями

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С целью расширения возможностей изменения динамического состояния в систему можно ввести дополнительные связи в виде элементарных звеньев двойного дифференцирования, как показано на рисунке 3 [3].

В этом случае выражения для кинетической энергии примет вид

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} L_1 (\dot{y}_1 - \dot{z})^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} L_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2 + \frac{1}{2} L_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_1)^2, \quad (10)$$

а потенциальная энергия определится из выражения (2).

Учитывая соотношения (3), запишем выражение для кинетической энергии системы

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}L_1(\dot{y}_1 - \dot{z})^2 + \frac{1}{2}m_2(\dot{y}_1 + \dot{\phi}l_1)^2 + \frac{1}{2}L_2(-\dot{\phi}l_1)^2 + \frac{1}{2}m_3(\dot{y}_1 - \dot{\phi}l_2)^2 + \frac{1}{2}L_3(\dot{\phi}l_2)^2. \quad (11)$$

Тогда система дифференциальных уравнений движения примет вид

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1(m_1 + L_1 + m_2 + m_3) + \dot{\phi}(m_2l_1 - m_3l_2) + k_1y_1 &= \ddot{z}L_1 + k_1z; \\ \ddot{\phi}(m_2l_1^2 + L_2l_1^2 + m_3l_2^2 + L_3l_2^2) + \dot{y}_1(m_2l_1 - m_3l_2) + \phi(k_2l_1^2 + k_3l_2^2) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Структурная схема эквивалентной САУ приведена на рисунке 4.

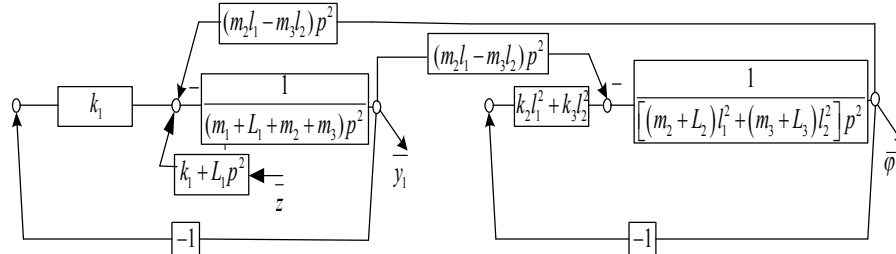


Рисунок 4 – Структурная схема эквивалентной САУ, соответствующей рисунку 3

Из структурной схемы следует, что введение устройств с преобразование движения L_1, L_2, L_3 изменяют свойства системы: L_1 влияет на характер внешнего воздействия, а система приобретает дополнительный режим динамического гашения и «запирание» на высоких частотах; введение L_2 и L_3 - снижают частоты собственных колебаний парциальных систем.

Передаточная функция системы при кинематическом возмущении системы имеет вид:

$$W_1 = \frac{y_1}{z} = \frac{(k_1 + L_1p^2)\{(m_2 + L_2)l_1^2 + (m_3 + L_3)l_2^2\}p^2 + k_2l_1^2 + k_3l_2^2}{[(m_1 + L_1) + m_2 + m_3]p^2 + k_1 \times \{(m_2 + L_2)l_1^2 + (m_3 + L_3)l_2^2\}p^2 + k_2l_1^2 + k_3l_2^2 - (m_2l_1 - m_3l_2)^2 p^4}, \quad (13)$$

Для исследования преобразуем (12) к виду

$$W_1 = \frac{y_1}{z} = \frac{(k_1 + L_1p^2)\{[m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2]p^2 + k_2 + k_3i^2\}}{[[m_1 + L_1) + m_2 + m_3]p^2 + k_1 \times \{[m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2]p^2 + k_2 + k_3i^2\} - (m_2 - m_3i^2)^2 p^4}, \quad (14)$$

где $i = l_2/l_1$ - отношение плеч рычага второго рода.

Введем ряд обозначений: пусть $r_2 = m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2, r_1 = m_1 + m_2 + m_3 + L_1, r_3 = m_2 - m_3i^2$, тогда $A_1 = (k_1 + L_1p^2)(r_2p^2 + k_2 + k_3i^2)$ - числитель (13). Исследуем характеристическое уравнение передаточной функции (14)

$$A_2 = (r_1p^2 + k_1)(r_2p^2 + k_2 + k_3i^2) - r_3^2p^4 = (r_1r_2 - r_3^2)p^4 + [r_2k_1 + r_1(k_2 + k_3i^2)]p^2 + k_1(k_2 + k_3i^2) = 0,$$

откуда найдем частоты собственных колебаний

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{r_2k_1 + r_1(k_2 + k_3i^2)}{2(r_1r_2 - r_3^2)} \pm \sqrt{\frac{[r_2k_1 + r_1(k_2 + k_3i^2)]^2 - 4(r_1r_2 - r_3^2)[k_1(k_2 + k_3i^2)]}{4(r_1r_2 - r_3^2)}}. \quad (15)$$

Если $r_1r_2 - r_3^2 = [m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2] \times (m_1 + m_2 + m_3 + L_1) - (m_2 - m_3i^2)^2$, то разность будет иметь вид $\Delta = -m_2^2 + 2m_2m_3i - m_3^2i^2 + m_2^2 + m_3^2i^2 + R$, где R - положительный остаток, то есть всегда выполняется $\Delta > 0$. Если подкоренное выражение (15) будет равно нулю, то частоты собственных колебаний совпадают и АЧХ системы будут иметь вид, характерный для систем с одной степенью свободы. Из выражения (14) следует, что возможен режим когда $\omega_{\text{дин1}}^2 = \omega_{\text{дин2}}^2$, что выполняется

при условии $\frac{k_1}{L_1} = \frac{k_2 + k_3i^2}{m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2}$, тогда условие совпадения частот динамического гашения имеет вид

$$k_1 = \frac{L_1(k_2 + k_3i^2)}{m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2} \quad (16)$$

или

$$L_1 = \frac{k_1[m_2 + L_2 + (m_3 + L_3)i^2]}{k_2 + k_3i^2}. \quad (17)$$

При выполнении $i \rightarrow \infty$ получим предельные соотношения

$$k_1 = \frac{k_3 L_1}{m_3 + L_3}, \tag{18}$$

$$L_1 = \frac{k_1 (m_3 + L_3)}{k_3}, \tag{19}$$

В свою очередь, при $i \rightarrow 0$ получим

$$k_1 = \frac{k_2 L_1}{m_2 + L_2}, \tag{20}$$

$$L_1 = \frac{k_1 (m_2 + L_2)}{k_2}, \tag{21}$$

Если выполняются условия (16) и (17), то система с двумя степенями свободы будет иметь вид АЧХ, как показано на рисунке 5, то есть будет вести себя как система с одной степенью свободы. Расчетным путем найдены значения L_1 (17), соответствующие графикам на рисунке 5 при $m_1 = 100 \text{ кг}$, $m_2 = m_3 = 10 \text{ кг}$, $i = 2, 4, 6$, $L_2 = 10 \text{ кг}$, $L_3 = 10 \text{ кг}$, $k_2 = 600 \text{ Н / м}$, $k_3 = 700 \text{ Н / м}$, $k_1 = 1000 \text{ Н / м}$.

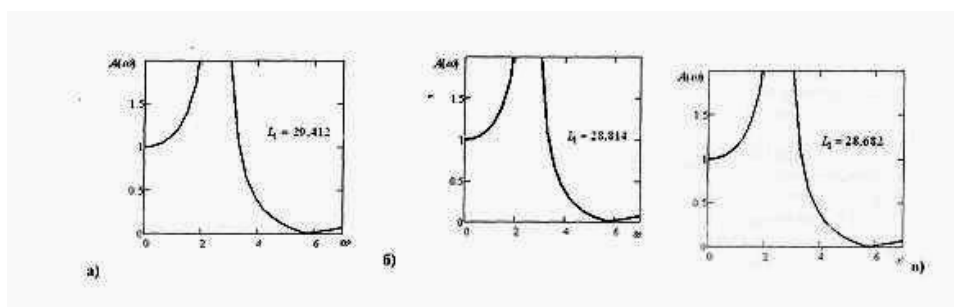


Рисунок 5 – Амплитудно-частотные характеристики при условии равенства выражений (16) и (17) при соответствующих значениях L_1 , в качестве изменяемого параметра выбрана величина i
 а) $i=2$; б) $i=4$; в) $i=6$

В таблице 1 представлены соответствующие значения частот собственных колебаний и динамического гашения.

Таблица 1 – Значения частот собственных колебаний и динамического гашения, представленной на рисунке 5, при соответствующих значениях L_1

Значение L_1	Частота собственных колебаний	Частоты динамического гашения
	$\omega_{соб}$	$\omega_{дин}$
$L_1 = 29,412; i = 2$	2.585	5.831
	5.855	5.831
$L_1 = 28,682; i = 6$	2.586	5.907
	5.989	5.907
$L_1 = 28,814; i = 4$	2.587	5.891
	5.957	5.891

Для оценки динамических свойств системы, передаточная функция которой представлена на выражением (14) при параметрах модельной задачи $m_1 = 100 \text{ кг}$, $m_2 = m_3 = 10 \text{ кг}$, $i = 2, 4, 6$, $L_2 = 10 \text{ кг}$, $L_3 = 10 \text{ кг}$, $k_2 = 600 \text{ Н / м}$, $k_3 = 700 \text{ Н / м}$, $k_1 = 1000 \text{ Н / м}$.

На рисунке 6 построена диаграмма поведения частот динамического гашения и собственных колебаний. В общем случае, учитывая одинаковый порядок частотных уравнений числителя и знаменателя (14), можно полагать в зависимости от значений параметров, в частности L_1 , что соотношения между частотами, а также формы АЧХ системы, будут изменяться существенным образом. На рис. 7 показано, что при изменении L_1 возможны характеристики с двумя режимами динамического гашения и двумя резонансами. Однако, в системе возможны случаи совпадения частот динамического гашения между собой, а также совпадение с частотами собственных колебаний. Для расчетов использовались средства программного пакета Matchad 11. В области высоких частот происходит «запирание» системы. Значение коэффициента передачи амплитуды колебаний при увеличении частоты определяется из выражения (14) при условии, что $p \rightarrow \infty$. Если обозначить эту величину через α (бесконечность), то значения этого параметра будут зависеть от L_1 . На рисунке 7 приведена соответствующая информация на вариантах а, б, в, г, д, е, ж.

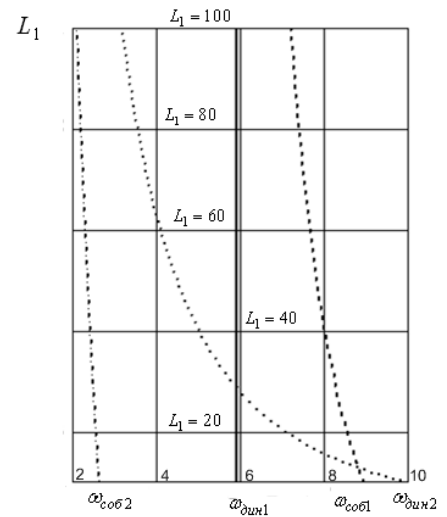


Рисунок 6 – Зависимость частот динамического гашения и частот собственных колебаний от параметра L_1

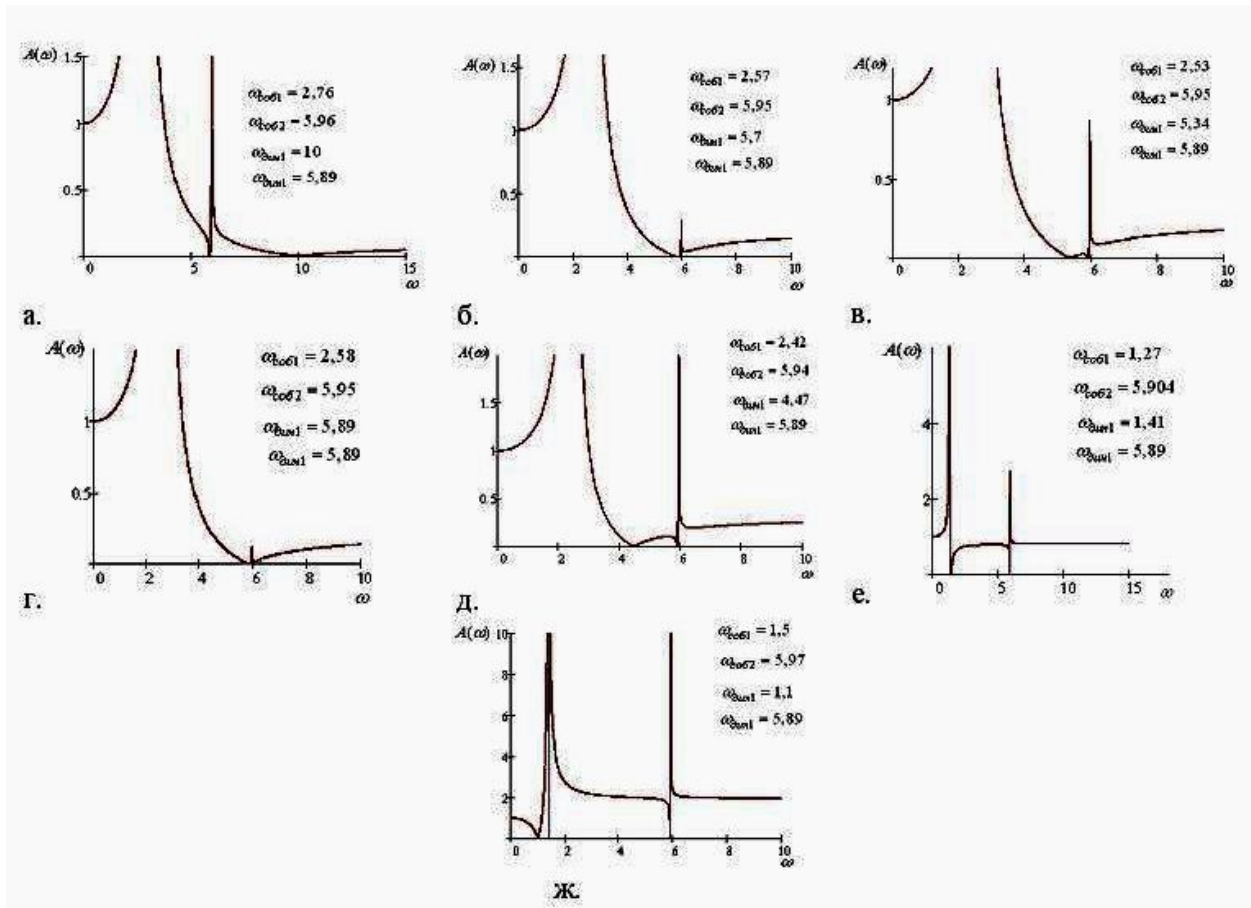


Рисунок 7 – АЧХ для выражения 3.106 при различных значениях L_1

- 1) при $L_1 = 10$; 2) при $L_1 = 13,5$; 3) при $L_1 = 25$; 4) при $L_{cr} = 28,8$ - критическое значение; 5) при $L_1 = 50$;
- 6) при $L_1 = 200$; 7) при $L_1 \rightarrow \infty$

Особенностью амплитудно-частотных характеристик на рисунке 7 в ее различных вариантах является то обстоятельство, что система с двумя степенями свободы практически ведет себя как система с одной степенью свободы, что обеспечивается определенными значениями приведенной массоинерционной характеристики L_1 , находимой из выражения (17). Близость резонансных частот создает зону неустойчивых движений повышенного уровня, за пределами которой система имеет вид АЧХ с одной степенью свободы.

В качестве изменяемого параметра было выбрано передаточное отношение плеч рычажной связи i . В модельном примере $L_1 = 29,412$ соответствует $i = 2$, $L_1 = 28,814$ соответствует $i = 4$, $L_1 = 28,682$ соответствует $i = 6$ (рис. 6). Для АЧХ характерны два участка, на которых коэффициент передачи амплитуды колебаний равен 1 в диапазоне частот $0 \div \omega_{1\text{соб}} \text{ л/с}$. В диапазоне частот $\omega_{1\text{соб}} - \infty$ коэффициент передачи амплитуды колебаний меньше единицы, что определяет возможное направление использования системы в задачах виброзащиты.

ВВЕДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ

Характер внешнего воздействия на объект защиты имеет важное значение, поскольку изменяется система динамических связей. Рассмотрим систему, состоящую из двух массоинерционных элементов m_1 и m_2 , разнесенных с помощью Г-образного рычага с плечами l_1 и l_2 , как показано на рисунке 8. Такая расчетная схема может быть отнесена к одному из вариантов вышерассмотренного динамического гасителя при условии, что такой гаситель может либо прикрепляться, либо сниматься с объекта защиты.

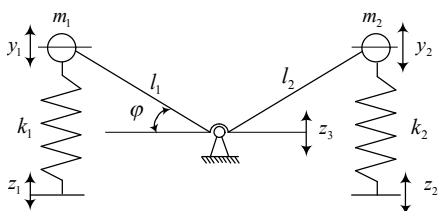


Рисунок 8 – Расчетная схема системы с разнесенными массами при комбинированном кинематическом возмущении

Конструктивное использование такого присоединения может быть построено на использовании магнитной подставки. Кинетическая и потенциальная энергия системы (рис. 8) может быть записана в виде

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{y}_1 - \dot{z}_3)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{y}_2 - \dot{z}_3)^2, \Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2. \quad (21)$$

Используя соотношение $y_2 = -by_1$, где $i = l_2/l_1$ и представляет собой отношение плеч рычага при малых углах φ и без учета наклона стержней, запишем дифференциальное уравнение движения системы

$$\ddot{y}_1 (m_1 + i^2 m_2) + y_1 (k_1 + i^2 k_2) = \ddot{z}_3 (m_1 - m_2 i) + k_1 z_1 - k_2 i z_2. \quad (22)$$

Структурная схема системы приведена на рис. 9, откуда может быть найдена частота собственных колебаний

$$\omega_{\text{соб}}^2 = \frac{k_1 + k_2 i^2}{m_1 + m_2 i^2}. \quad (23)$$

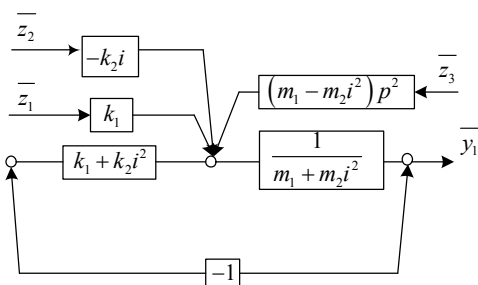


Рисунок 9 – Структурная схема механической системы с разнесенными массами

Из структурной схемы на рисунке 9 можно заметить, что внешние воздействия образуют систему, в которой внешние воздействия в силу конструктивных особенностей может действовать в противофазе и создавать нулевое воздействие на любой частоте при $k_1 - k_2 b = 0$ при $z_1 = z_2$. Кроме того при $m_1 - m_2 b^2 = 0$ для внешнего воздействия z_3 создается условие «блокирования».

Что касается режимов динамического гашения и собственных частот, то необходимо принять во внимание соотношения параметров внешнего кинематического возмущения. Так, например, если

$z_3 = z_1 = z_2 = z$, то частота динамического гашения определится по формуле

$$\omega_{дин}^2 = \frac{k_1 - k_2 i}{m_1 - m_3 i} \quad (24)$$

Полагая, что режимы динамического гашения связаны с оценкой числителя передаточной функции, получаемой из структурной схемы на рисунке 4, представим возможные варианты в таблице 2.

Таблица 2 – Виды передаточных функций при различных видах внешних возмущений

№ п/п	Сочетание параметров внешнего возмущения	Вид передаточной функции	Примечание
1	2	3	4
1	$z_1 = z_2 = z_3 = z$	$W = \frac{Y_1}{z} = \frac{(m_1 - m_2 b) p^2 + k_1 - k_2 b}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	$\omega_{дин}^2 = \frac{k_1 - k_2 b}{m_1 - m_2 b}$
2	$z_1 = 0, z_2 = z_3 = z$	$W = \frac{Y_2}{z} = \frac{k_1 - k_2 b}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	спец. режим $k_1 = k_2 b$
3	$z_1 = 0, z_2 = 0, z_3 = z$	$W = \frac{Y_3}{z} = \frac{(m_1 - m_2 b) p^2}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	спец. режим $m_1 = m_2 b$
4	$z_1 = 0, z_2 = z_3 = 0$	$W = \frac{Y_4}{z} = \frac{(m_1 - m_2 b) p^2 - k_2 b}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	$\omega_{дин}^2 = \frac{k_2 b}{m_1 - m_2 b}$
5	$z_1 = 0, z_2 = z_3 = 0$	$W = \frac{Y_5}{z} = \frac{(m_1 - m_2 b) p^2 + k_1}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	$\omega_{дин}^2 = \frac{k_1}{(m_1 - m_2 b)}$
6	$z_1 = 0, z_2 = 0, z_3 = 0$	$W = \frac{Y_6}{z} = \frac{-k_2 b}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	режима динамического гашения нет
7	$z_1 = 0, z_2 = 0, z_3 = 0$	$W = \frac{Y_7}{z} = \frac{k_1}{(m_1 + m_2 b^2) p^2 + k_1 + k_2 b^2}$	режима динамического гашения нет

Анализ данных, приведенных в таблице 2, позволяет сделать заключение о том, что режимы динамического гашения встречаются достаточно часто, однако, их появление зависит от особенности конструктивного оформления виброзащитной системы и особенностей системы внешних воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если в виброзащитную систему (рис. 3) ввести дополнительные связи $L_1 p^2$ и $L_2 p^2$, то есть элементарные звенья с передаточными функциями дифференцирования второго рода, то дифференциальное уравнение движения примет вид

$$\ddot{y}_1 (m_1 + b^2 m_2 + L_1 + L_2 b^2) p^2 + k_1 + b^2 k_2 = z_3 (m_1 - m_2 b) p^2 + (k_1 + L_1 p^2) z_1 - (L_2 p^2 + k_2) z_2. \quad (25)$$

Возможный спектр ситуаций, в которых, так или иначе, отражаются свойства режимов динамического гашения, можно оценить, используя уравнение (25). Так, например, при $z_3 = z_1 = z_2 = z$, получим, что

$$\omega_{дин}^2 = \frac{k_1 - k_2 b}{(m_1 - m_2 b) + (L_1 - b L_2)}. \quad (26)$$

Отличие выражения (25) от (26) заключается в том, что режим динамического гашения определяется параметрами L_1 и L_2 устройств для преобразования движения, что расширяет возможности соответствующей настройки виброзащитных систем.

Таким образом, использование динамических гасителей колебаний с сочленениями обладает существенными отличиями по сравнению с традиционными конструктивно-техническими решениями. Последнее заключается не только в расширении набора настроечных параметров, но и в том, что настроечные параметры образуют соотношения значений, выполнение которых позволяет менять режимы работы, что отражено, в частности, в таблице 2. Введение дополнительных связей на основе устройств, с преобразованием движения, имеющих передаточную функцию дифференцирующего звена второго рода, позволяет получить добавочный режим динамического гашения и реализовать настройку работы в расширенном наборе амплитудно-частотных характеристик виброзащитной системы в зависимости от условий поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, С.В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко, А.А. Засядко. – Иркутск.: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. – 523 с.
2. Елисеев, С.В. Динамические гасители колебаний / С.В. Елисеев, Г.П. Нерубенко – Новосибирск.: Наука, 1982. – 182 с.
3. Елисеев, С.В. Возможности сочленения твердых тел в цепных механических системах / С.В. Елисеев, Ю.В. Ермошенко, И.В. Фомина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск.: ИрГУПС. 2010. № 3(27). С. 74-84.

Ермошенко Юлия Владимировна

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск
Кандидат технических наук, доцент, докторант НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования, декан Заочного факультета
Тел.: 8924 604 2928
E-mail: upir_ryu@irgups.ru

Большаков Роман Сергеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск
Аспирант НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования
Тел.: 8908 661 4263

Абросимова Юлия Олеговна

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск
Аспирант НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования
Тел.: 8(3952)-59-84-28

YU.V. ERMOSHENKO, R.S. BOLSHAKOV, YU.O. ABROSIMOVA

DYNAMICAL ABSORBERS IN SYSTEMS WITH COUPLINGS

Dynamical absorber with angular coupling between object of defence and level mechanism are considered. Mathematical models and analytical conditions for selection of parameters of effective vibroprotection are suggested.

Keywords: *dynamical absorber, coupling of rigid bodies dynamics of level mechanisms, vibroprotection, vibroisolation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Eliseev, S.V. Dinamicheskij sintez v obobwennyh zadachah vibrozawity i vibroizoljicii tehniche-skih ob#ektov / S.V. Eliseev, Ju.N. Reznik, A.P. Homenko, A.A. Zaszjadko. – Irkutsk.: Izd-vo Irk. gos. un-ta, 2008. – 523 s.
2. Eliseev, S.V. Dinamicheskie gasiteli kolebanij / S.V. Eliseev, G.P. Nerubenko – Novosibirsk.: Nauka, 1982. – 182 s.
3. Eliseev, S.V. Vozmozhnosti sochlenenija tverdyh tel v cepnyh mehanicheskikh sistemah / S.V. Eliseev, Ju.V. Ermoshenko, I.V.Fomina // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Irkutsk.: Ir-GUPS. 2010. № 3(27). S. 74-84.

Ermoshenko Yulija Vladimirovna

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk
Candidate of technical science, associate professor, doctoral candidate of research institute of modern technologies, system analysis and modeling, dean of Extra-mural Faculty
Tel. 8924-604-2928
e-mail: upir_ryu@irgups.ru

Bolshakov Roman Sergeevich

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk
Post-graduate student of research institute of modern technologies, system analysis and modeling
Tel. 8908-661-4263

Abrosimova Yulija Olegovna

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk
Post-graduate student of research institute of modern technologies, system analysis and modeling
Tel. 83952-59-84-28

В.Ю. ПЕТРОВА

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Приводится методика вероятностного анализа электромагнитной совместимости электроэнергетических объектов, реализуемая на основе статистического моделирования (метода Монте-Карло). Рассматривается возможное взаимное электромагнитное влияние двух объектов, имеющих между собой гальваническую, индуктивную и емкостную связь. Предложенная методика и алгоритм могут быть использованы для решения различных теоретических и практических задач электроэнергетики, а также в тренажерно-обучающих комплексах.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, статистическое моделирование, электроэнергетический объект, вероятностный анализ.

Степень электромагнитного влияния электроэнергетических объектов друг на друга или на другие объекты определяет уровень их электромагнитной совместимости (ЭМС). Одностороннее или взаимное электромагнитное влияние объектов возникает в результате следующих возможных типов электрической связи между объектами: гальванической, магнитной (индуктивной) и емкостной [1,2]. Возможна также связь через электромагнитное излучение; однако предполагается, что рассматриваемые промышленные электроэнергетические установки не являются излучающими и поэтому этот вид связи в дальнейшем при анализе ЭМС не учитывается.

Для удобства изложения в дальнейшем тип электромагнитного влияния будем называть по типу связи между объектами, и говорить, например, вместо «влияние объекта через индуктивную связь» – просто «индуктивное влияние объекта»; аналогично – гальваническое и емкостное влияния.

Электромагнитное влияние электроэнергетических объектов и соответственно степень их ЭМС часто зависит от ряда случайных факторов, определяющих параметры этого влияния. Для получения наиболее полной картины электромагнитного влияния объектов, обоснования необходимых мер и рекомендаций по уменьшению такого влияния, следует учитывать не только степень воздействия того или иного фактора, но и его вероятностные характеристики.

Применение вероятностного анализа позволит получить статистические параметры выходных величин, что в свою очередь позволит наиболее достоверно оценить степень влияния различных факторов, наметить рациональные пути уменьшения электромагнитного влияния объектов и достижения необходимого уровня ЭМС.

Для вероятностного анализа ЭМС электроэнергетических объектов можно воспользоваться статистическим моделированием (методом Монте-Карло [3,4]). Для реализации метода Монте-Карло с целью вероятностного анализа ЭМС электроэнергетических объектов был разработан алгоритм, изображенный на рисунке 1.

На рисунке схематически стрелками показано взаимное влияние объектов А и Б через гальваническую, индуктивную и емкостную связь (сплошными линиями – влияние объекта Б на объект А; пунктирными – обратное влияние). Это влияние может описываться математически одной общей или отдельными для каждого типа влияния формулами. Алгоритм на рисунке относится к случаю, когда все типы влияний сведены в общую формулу: математическая модель электромагнитного влияния объекта Б на объект А $F_{BA}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ и математическая модель электромагнитного влияния объекта А на Б $F_{AB}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x и y – случайные переменные, определяющие соответственно влияние объекта А на объект Б и наоборот.

В алгоритме (см. рис. 1) предполагается, что вероятностный анализ проводится на основе метода Монте-Карло. Для реализации метода Монте-Карло в данном случае необходимо располагать не только математическими моделями влияния А на Б $F_{AB}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и объекта Б на А $F_{BA}(y_1, y_2, \dots, y_n)$, но и законами распределения (и их параметрами) случайных величин, входящих в эти модели.

Как известно, для применения метода Монте-Карло необходимо иметь генератор случайных чисел, которые формируются с учетом соответствующих законов распределения влияющих величин и используются для реализации «i»-го варианта влияния на объект. Каждый «i»-ый вариант (см. рис. 1) определяет конкретное случайное значение интегрального фактора влияния.

После реализации N вариантов приступают к статистической обработке полученных данных. Для достижения необходимой точности число N должно быть достаточно большим ($N = 10^3$ и более). Статистическая обработка включает в себя определение закона распределения выходной величины и его характеристик: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, степень соответствия принятому закону и другие.

Наиболее информативной характеристикой, полученной в результате применения метода Монте-Карло, можно считать вероятность нахождения выходной величины в заданных пределах. Эту вероятность, полученную расчетным путем $P_{расч}$, можно сравнить с заданной, предельно допустимой $P_{доп}$. Если $P_{расч} \leq P_{зад}$, то можно предположить, что электромагнитное влияние объекта А на объект Б является несущественным, т.е. им можно пренебречь. В противном случае для достижения ЭМС объектов следует изменить параметры влияния и снова реализовать статистическое моделирование.

В качестве критерия степени влияния объекта Б на объект А можно очевидно использовать и другие параметры законов распределения, например, математическое ожидание. Для наглядности, после ранжирования полученного набора данных можно построить и вывести на печать гистограмму распределения выходной величины.

Анализ влияния объекта А на объект Б производится аналогично (правая часть алгоритма на рис. 1).

Алгоритм (рис. 1) относится к анализу взаимного электромагнитного влияния друг на друга только двух объектов (А и Б). Объектов может быть значительно больше; тогда необходимо учитывать все связи между объектами. Общая методика применения метода Монте-Карло в случае нескольких объектов аналогична описанной.

При невозможности объединить все факторы влияния в один общий интегральный признак следует исследовать и оценивать отдельно каждый влияющий фактор по предложенной в алгоритме (см. рис. 1) методике. Окончательный вывод о степени взаимного влияния и ЭМС объектов можно сделать по проявлению наиболее опасного фактора.

В ряде случаев стороннее случайное влияние на объект можно отразить, внося изменения непосредственно в уравнения состояния объекта. Т.е. фактор влияния, например, на объект А, определяемый математической моделью F_{BA} , может быть оценен отдельно как в предлагаемом алгоритме на рисунке или непосредственно введен в уравнения, определяющие состояние объекта А; в зависимости от этого будет определяться дальнейшая методика расчета.

Математическую модель объекта А можно в общем виде представить как функцию $F_A(X_1, X_2, \dots, X_n; y_1, y_2, \dots, y_n)$, где X_1, X_2, \dots, X_n – внутренние управляемые факторы, а y_1, y_2, \dots, y_n – внешние сторонние случайные факторы воздействия на объект А, например, объекта Б. Аналогично математическую модель объекта Б можно представить как функцию $F_B(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; x_1, x_2, \dots, x_n)$, где Y_1, Y_2, \dots, Y_n – внутренние управляемые факторы, а x_1, x_2, \dots, x_n – внешние сторонние случайные факторы воздействия на объект Б, например, объекта А.

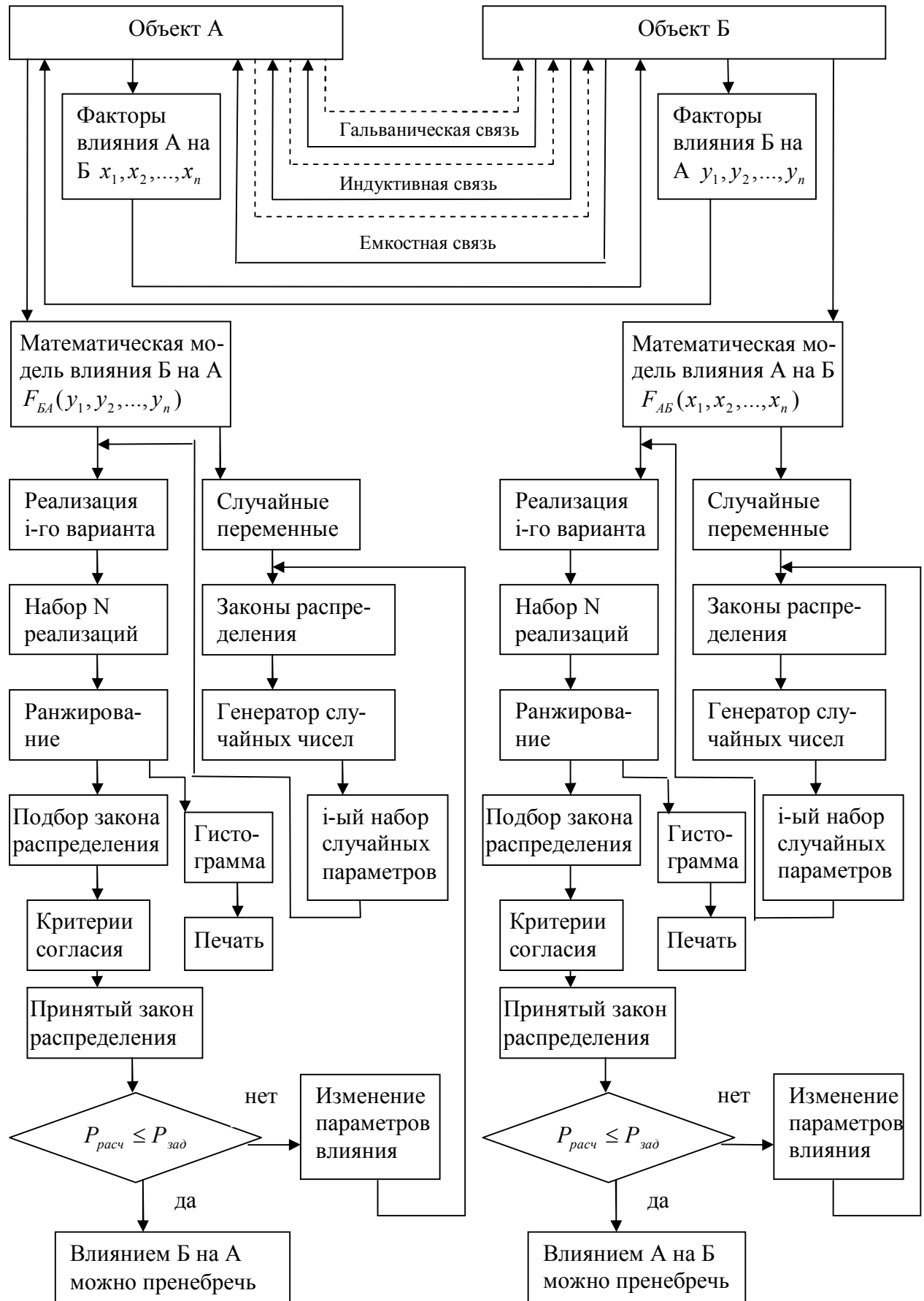


Рисунок 1 – Алгоритм вероятностного анализа ЭМС электроэнергетических объектов

В этом случае в алгоритме, показанном на рисунке 1 вместо математической модели влияния, например, объекта А на объект Б, следует использовать общую математическую модель F_A объекта А, учитывающую воздействия случайных сторонних факторов. Критерием оценки ЭМС может служить отклонения режима работы объекта от номинальных параметров, вызванные внешними воздействиями. Если внешние факторы воздействия являются случайными, то и вызванные ими отклонения режима работы подверженного влиянию объекта также будут носить случайный характер. Следовательно, к анализу ЭМС объектов, как и в ранее рассмотренном случае, можно применить статистические методы и, в частности, метод Монте-Карло.

Основные этапы вероятностного анализа ЭМС с использованием метода Монте-Карло в последнем случае будут аналогичны описанным в данном алгоритме. Однако, если в первом случае (см. рис. 1) оценивается вероятность и интенсивность одного или совокупности факторов воздействия, то во втором случае (исследования общей математической модели объекта) будут оцениваться отклонения от номинального режима работы объекта (их величина и вероятность), вызванные внешним электромагнитным воздействием.

С точки зрения объема вычислительных операций первый вариант проще, так как там проще математические модели. Второй вариант исследует более сложную математическую модель, охватывающую весь объект и внешние воздействия. Выбор того или иного варианта зависит от целей исследования и возможностей вычислительной техники.

В ряде случаев анализ ЭМС электроэнергетических объектов сводится к определению электромагнитного влияния одного объекта на другой без учета обратного влияния, т.е. к анализу одностороннего электромагнитного влияния. В этом случае можно воспользоваться лишь частью предложенного алгоритма, т.е. исследованием, например, влияния объекта Б на объект А в соответствии с этапами, отраженными в левой части алгоритма на рисунке 1.

Предложенный алгоритм был использован для решения конкретной задачи анализа влияния высоковольтных ЛЭП на электрические взрывные цепи – цепи, состоящие из электродетонаторов, действие которых производится электрическим импульсом и которые служат для инициирования взрыва ВВ при производстве взрывных работ. Предполагается, что взрывные работы ведутся в зоне возможного электромагнитного влияния ЛЭП. Как известно [5], такое влияние может привести к возникновению в электрических взрывных цепях сторонних токов опасной величины, способных вызвать преждевременный взрыв со всеми вытекающими катастрофическими последствиями. Величина тока, который возникает в электрических взрывных цепях в результате возможного гальванического, индуктивного и электрического влияния зависит от целого ряда случайных факторов. Если ориентироваться на крайние наиболее опасные условия, то рекомендации по предотвращению втекания в электрические взрывные цепи токов опасной величины оказываются существенно завышенными и трудно выполнимыми.

Для наиболее аргументированного обоснования таких рекомендаций необходимо учитывать случайный характер процесса, в связи, с чем было реализовано статистическое моделирование (метод Монте-Карло) по предложенной ранее методике. Статистическое моделирование было реализовано в среде MathCad в соответствии с этапами вычислений, описанными в алгоритме (см. рис. 1). Полученные вероятностные характеристики позволили сформулировать конкретные рекомендации по предотвращению возникновения токов опасной величины в электрических взрывных цепях с заранее заданной степенью надежности.

Вероятностный анализ ЭМС позволит наиболее широко исследовать взаимное влияние электроэнергетических объектов друг на друга и на другие объекты. Статистическое моделирование дает возможность наиболее полного отражения реальной картины электромагнитного влияния объектов, является действенным инструментом исследования ЭМС, может быть использовано в тренажерно-обучающих комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
2. Шваб, А. Электромагнитная совместимость: пер. с нем. В.Д.Мазина и С.А. Спектора – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. и.П. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.
3. Ермаков, С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике: ввод. курс / С.М.Ермаков. - М.; СПб.: Бином. Лаб. Знаний: Нев. диалект, 2009. – 192 с.
4. Войтишек, А.В. Дополнительные сведения о численном моделировании случайных элементов: учеб. пособие / А.В.Войтишек; Новосиб. гос. ун-т, Каф. вычисл. математики. - Новосибирск: НГУ, 2007. –92 с.
5. Защита зарядов взрывчатых веществ от преждевременных взрывов блуждающими токами / М.М. Граевский, В.Ф. Ермошин, П.С. Залесский и др.; под ред. М.М. Граевского – М., Недра, 1987. – 380 с.

Петрова Виктория Юрьевна

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственного технологического университета)
аспирантка, ассистент кафедры «Информационные системы в экономике»
362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44
т. 8(8672) 407522
E-mail: petrova_viktoriya@yahoo.com

V.Yu. PETROVA

STATISTIC MODELING OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF POWER OBJECTS

In this paper, a methodology of probabilistic analysis of electrical power objects electromagnetic compatibility is considered, which is realized on the basis of statistical modeling (Monte-Karlo's method). Probable electromagnetic interference between two objects, which have got galvanic, inductive and capacitive coupling is examined. Proposed methodology and algorithm could be used for various theoretical and practical problems' solving in electroenergetics, also it can be exploited in computer-based training simulator complexes.

Keywords: *electromagnetic compatibility, statistical modeling, electrical power object, probabilistic analysis.*

BIBLIOGRAPHY

1. Jelektromagnitnaja sovместimost' v jelektrojenergetike i jeletrotehnikе / A.F. D'jakov, B.K. Maksimov, R.K. Borisov i dr.; pod red. A.F. D'jakova. – M.: Jenergoatomizdat, 2003. – 768 с.
2. Shvab, A. Jelektromagnitnaja sovместimost': per. s nem. V.D.Mazina i S.A. Spektora – 2-e izd., pererab. i dop. / pod red. i.P. Kuzhekina. M.: Jenergoatomizdat, 1998. – 480 s.
3. Ermakov, C.M. Metod Monte-Karlo v vychislitel'noj matematike: vvod. kurs / C.M.Ermakov. - M.; SPb.: Binom. Lab. Znanij: Nev. dialekt, 2009. – 192 s.
4. Vojtishek, A.V. Dopolnitel'nye svedenija o chislenном modelirovanii sluchajnyh jelementov: ucheb. posobie / A.V.Vojtishek; Novosib. gos. un-t, Kaf. vychisl. matematiki. - Novosibirsk: NGU, 2007. –92 s.
5. Zawita zarjadov vzryvchatyh vewestv ot prezhdevremennyh vzryvov bluzhdajuwimi tokami / M.M. Graevskij, V.F. Ermoshin, P.S. Zalesskij i dr.; pod red. M.M. Graevskogo – M., Nedra, 1987. – 380 s.

Petrova Viktoriya Yurievna

North-Caucasian mining and metallurgical engineers (of state technological university)
Post-graduate, assistant of department “Information systems in economy”
362021, the Republic of North Ossetia – Alania, Vladikavkaz, ul. Nikolaeva, 44
Tel. 8-8672-407522
E-mail: petrova_viktoriya@yahoo.com

С.В. ЕЛИСЕЕВ, А.П. ХОМЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С Г-ОБРАЗНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ

Предлагается обобщенная теория построения Г-образных динамических гасителей колебаний в механических системах, предназначенных для защиты машин и оборудования от вибраций и ударов. Показано, что желаемые эффекты могут быть получены путем формирования в системе соответствующих сочленений, приводящих к уменьшению числа степеней свободы движения системы.

Ключевые слова: виброзащита, виброизоляция, динамические гасители колебаний, рычажные механизмы.

ВВЕДЕНИЕ

Динамические гасители колебаний достаточно широко используются в технологиях виброзащиты и виброизоляции машин, оборудования и приборов [1]. Особенности Г-образных динамических гасителей колебаний являются их конструктивно-технические возможности, допускающие расширение подходов к выбору способов их настройки [2]. В целом, математические модели систем с такими динамическими гасителями достаточно сложны, что предопределяет поиск новых путей построения моделей, в частности, на основе использования идей формирования сочленений [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В представленной статье рассматривается обобщенная расчетная схема виброзащитной системы с четырьмя степенями свободы при кинематическом возмущении со стороны основания z_1, z_2 , и z_3 (рис. 1). Верхний каскад соединений предполагает опирание дополнительной массы гасителя m_2 на три упругих опоры с жесткостями k_3, k_4, k_5 . На рисунке 1 показаны точки крепления упругих элементов к твердым телам, что определяется значениями $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$.

Для расчетной схемы на рисунке 1 характерно наличие некоторых особенностей в расположении центров тяжести динамического гасителя колебаний и объекта. Объект защиты M , который опирается также на три упругих опоры k_1, k_2, k_3 и имеет, соответственно, три внешних кинематических возмущения со стороны основания z_1, z_2, z_3 .

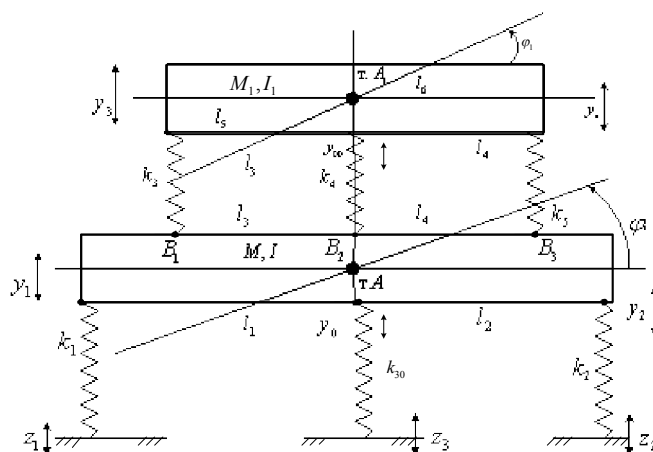


Рисунок 1 – Расчетная схема виброзащитной системы с Г-образным динамическим гасителем

С учетом обозначений, приведенных на рисунке 1, запишем выражения для кинетической и потенциальной энергий

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} M_1 \dot{y}_{00}^2 + \frac{1}{2} y_1 \dot{\varphi}_1^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (y_0 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - y_{B_1})^2 + \frac{1}{2} k_4 (y_{00} - y_0)^2 + \frac{1}{2} k_5 (y_4 - y_{B_3})^2. \quad (2)$$

В расчетах используются соотношения $y_{B_2} = y_0$, $y_1 = y_0 - l_1 \varphi$, $y_2 = y_0 + l_2 \varphi_2$, $y_{B_1} = y_0 - l_3 \varphi$, $y_{B_3} = y_0 + l_4 \varphi$, $l_3 = B_2 B_1$, $l_4 = B_2 B_3$ (точки B_2 и A совпадают). l_5, l_6 – определяют положение т. A_1 (центр тяжести в теле массой M_1), $y_0 = a y_1 + b y_2$, $\varphi = c (y_2 - y_1)$, $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$, $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$, $y_{00} = a_1 y_3 + b_1 y_4$, $a_1 = \frac{l_6}{l_5 + l_6}$, $b_1 = \frac{l_5}{l_5 + l_6}$, $\varphi_1 = c_1 (y_3 - y_4)$, $c_1 = \frac{1}{l_5 + l_6}$.

Преобразуем (1), (2) к виду:

$$T = \frac{1}{2} M (\dot{y}_1 a + b \dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2} I c^2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} M_1 (\dot{y}_3 a_1 + b_1 \dot{y}_4)^2 + \frac{1}{2} I_1 c_1^2 (\dot{y}_4 - \dot{y}_3)^2. \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (a y_1 + b y_2 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 [(y_3 - a y_1 - b y_2 + l_3 c (y_2 - y_1))]^2 + \frac{1}{2} k_4 (a_1 y_3 + b_1 y_4 - a y_1 - b y_2)^2 + \frac{1}{2} k_5 [y_4 - a y_1 - b y_2 - l_4 c (y_2 - y_1)]^2. \quad (4)$$

Пусть $y_4 = y_1 (a - l_4 c) - y_2 (b + l_4 c)$.

Используя (3), (4) сделаем ряд промежуточных выкладок:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} &= M a^2 \dot{y}_1 + M a b \dot{y}_2 + I c^2 \dot{y}_1 - I c^2 \dot{y}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = M b^2 \dot{y}_2 + M a b \dot{y}_1 + I c^2 \dot{y}_2 - I c^2 \dot{y}_1; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} &= M_1 a_1^2 \dot{y}_3 + M_1 a_1 b_1 \dot{y}_4 + I_1 c_1^2 \dot{y}_3 - I_1 c_1^2 \dot{y}_4; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_4} = M_1 b_1^2 \dot{y}_4 + M_1 a_1 b_1 \dot{y}_3 + I_1 c_1^2 \dot{y}_4 - I_1 c_1^2 \dot{y}_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Полагаем, что потенциальная энергия может быть записана

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 + \Pi_5 + \Pi_6, \quad (6)$$

$$\text{где } \Pi_1 = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2; \Pi_2 = \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2; \Pi_3 = \frac{1}{2} k_{30} (a^2 y_1^2 - 2 a_3 b_3 y_1 y_2 + b_3^2 y_2^2 - 2 z_3 a_3 y_1 - 2 z_3 b_3 y_2 + z_3^2);$$

$$\Pi_4 = \frac{1}{2} k_3 [y_2 a_2 - y_1 b_2 + y_3]^2 = \frac{1}{2} k_3 [y_2^2 a_2^2 - 2 a_2 b_2 y_2 y_1 + y_1^2 b_2^2 + 2 y_3 y_2 a_2 - 2 y_3 y_1 b_2 + y_3^2];$$

$$\Pi_5 = \frac{1}{2} k_4 [a_1 y_3 + b_1 y_4 - a y_1 - b y_2]^2 = \frac{1}{2} k_4 \left[a_1^2 y_3^2 + 2 a_1 b_1 y_3 y_4 + b_1^2 y_4^2 + a^2 y_1^2 + 2 a b y_1 y_2 + b^2 y_2^2 - \right. \\ \left. - 2 a_1 a y_3 y_1 - 2 a_1 b y_3 y_2 - 2 b_1 a y_4 y_1 - 2 b_1 b y_4 y_2 \right];$$

$$\Pi_6 = \frac{1}{2} k_5 [y_4 - y_1 (a - l_4 c) - y_2 (b + l_4 c)]^2 = \frac{1}{2} k_5 (y_4 - y_1 a_3 - y_2 b_3)^2, (a_2 = l_3 c - b; b_2 = a + l_3 c, a_3 = b - l_4 c; b_3 = a + l_4 c).$$

Используя (4)-(6), запишем систему уравнений движения системы в виде

$$\ddot{y}_1 (M a^2 + I c^2) + y_1 (k_1 + k_{30} a^2 + k_3 b_2^2 + k_4 a^2 + k_5 a_3^2) + \ddot{y}_2 (M a b - I c^2) + y_2 (-k_{30} a b - k_3 a_2 b_2 + k_4 a b + k_5 a_3 b_3) + y_3 (-k_3 b_2 - k_4 a_1 a) + y_4 (-k_4 b_1 a - k_5 a_3) = k_1 z_1 + k_{30} a z_3. \quad (7)$$

$$\ddot{y}_1 (M a b - I c^2) + y_1 (-k_{30} a b - k_3 a_2 b_2 + k_4 a b + k_5 a_3 b_3) + \ddot{y}_2 (M b^2 + I c^2) + y_2 (k_2 + k_{30} b_2^2 + k_3 a_2^2 + k_4 b^2 + k_5 b_3^2) + y_3 (k_3 a_2 - k_4 a_1 b + k_5 b_3^2) + y_4 (-k_4 b_1 b_2 - k_5 b_3) = k_2 z_2 + k_{30} b z_3; \quad (8)$$

$$\ddot{y}_1 (0) + y_1 (-k_3 b_2 - k_4 a_1 a) + \ddot{y}_2 (0) + y_2 (k_3 a_2 - k_4 a_1 b) + \ddot{y}_3 (M_1 a_1^2 + I_1 c_1^2) + y_3 (k_3 + k_4 a_1^2) + \ddot{y}_4 (M_1 a_1 b_1 - I_1 c_1^2) + y_4 (k_4 a_1 b_1) = 0; \quad (9)$$

$$\ddot{y}_1 (0) + k_4 (-b_1 a - k_5 a_3) + \ddot{y}_2 (0) + y_2 (-k_4 b_1 b - k_5 b_3) + \ddot{y}_3 (M_1 a_1 b_1 - I_1 c_1^2) + y_3 (k_4 b_1 a) + \ddot{y}_4 (M_1 b^2 + I_1 c_1^2) + y_4 (k_4 b_1^2 + k_5) = 0. \quad (10)$$

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений движения (7)÷(10) в координатах y_1, y_2, y_3, y_4

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
$(Ma^2 + Ic^2)p^2 + k_1 + k_{30}a^2 + k_3b_2^2 + k_4a^2 + k_5a_3^2$	$(Mab + Ic^2)p^2 - k_{30}ab - k_3a_2b_2 + k_4ab + k_5a_3b_3$	$-k_3b_2 - k_4a_1a$	$-k_4b_1a - k_5a_3$
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
$(Mab + Ic^2)p^2 - k_{30}ab - k_3a_2b_2 + k_4ab + k_5a_3b_3$	$(Mb^2 + Ic^2) + k_2 + k_{30}b_2^2 + k_3a_2^2 + k_4b^2 + k_5b_3^2$	$k_3a_2 - k_4a_1b$	$-k_4b_1b - k_5b_3$
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
$-k_3b_2 - k_4a_1a$	$k_3a_2 - k_4a_1b$	$(M_1a_1^2 + Ic_1^2)p^2 + k_3 + k_4a_1^2$	$(Ma_1b_1 - I_1c_1^2)p^2 + k_4a_1b_1$
a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}
$-k_4b_1a - k_5a_3$	$-k_4b_1b - k_5b_3$	$(M_1a_1b_1 - I_1c_1^2)p^2 + k_4a_1b_1$	$(M_1b^2 + I_1c_1^2)p^2 + k_5 + k_4b_1^2$
Q_1	Q_2		
$k_1z_1 + k_{30}az_3$	$k_2z_2 + k_{30}bz_3$	0	0

Примечание: $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}, a_1 = \frac{l_6}{l_5 + l_6}, b_1 = \frac{l_5}{l_5 + l_6}, c_1 = \frac{1}{l_5 + l_6}, a_2 = hl_3c - b, b_2 = a + l_3c$

Структурная схема системы, изображенной на рисунке 1, приведена на рисунке 2. Отметим, что связи между парциальными системами y_1 и y_2 , также как между парциальными системами y_3 и y_4 , носят инерционно-упругий характер. На частотах

$$\omega_{дин.1}^2 = \frac{k_{30}ab + k_3a_2b_2 - k_4ab - k_5a_3b_3}{Mab - Ic^2}, \tag{11}$$

$$\omega_{дин.2}^2 = \frac{k_4a_1b_1}{I_1c_1^2 - M_1a_1b_1} \tag{12}$$

связи могут «обнуляться», что вносит свою специфику в систему динамического взаимодействия между парциальными блоками.

Перекрестные связи между y_1, y_4 и y_2, y_4 , а также y_2, y_3 носят упругий характер. Упругая перекрестная связь $y_2 - y_3$ при выполнении

$$k_4a_1b - k_3a_2 = 0, \tag{13}$$

может «обнуляться», что создает условия для соответствующих форм независимого движения парциальных систем. Влияние условий (11)÷(13) может проявляться и через их одновременное или частичное совпадение.

Передаточные функции системы при заданных значениях внешних кинематических воздействий лучше всего определять по правилам Крамера [4].

Если в системе не вводить сочленений, то в зависимости от вида передаточной функции в ней могут возникать в общем случае до трех режимов динамического гашения. При возмущении со стороны основания механическая система будет иметь амплитудно-частотную характеристику обычного вида [5].

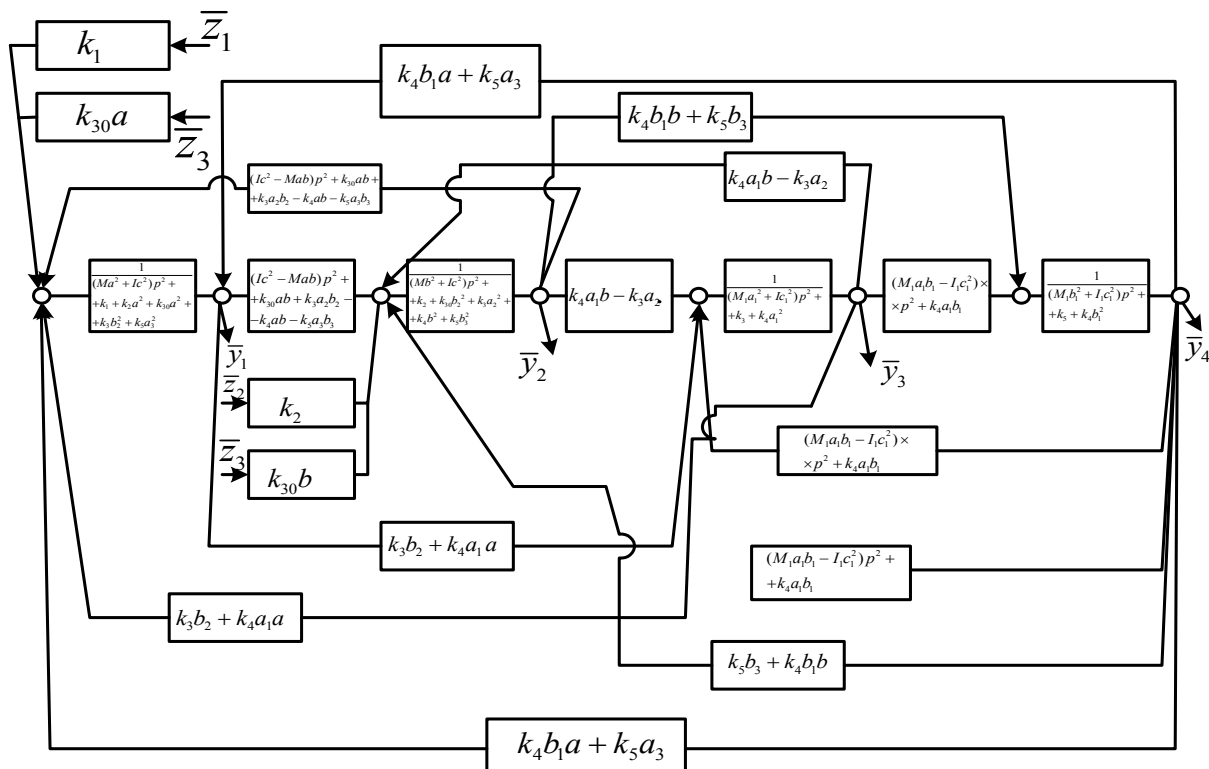


Рисунок 2 – Структурная схема обобщенной системы с динамическим гасителем колебаний общего вида

Чтобы ввести сочленения, можно полагать, что $k_4 \rightarrow \infty$, тогда расчетная схема, представленная на рисунке 3, преобразуется к виду, как показано на рисунке 3а. При этом схема, изображенная на рисунке 3а, соответствует сочленению между массами M и M_1 , а схема, изображенная на рисунке 3б, является вариантом сочленения с основанием.

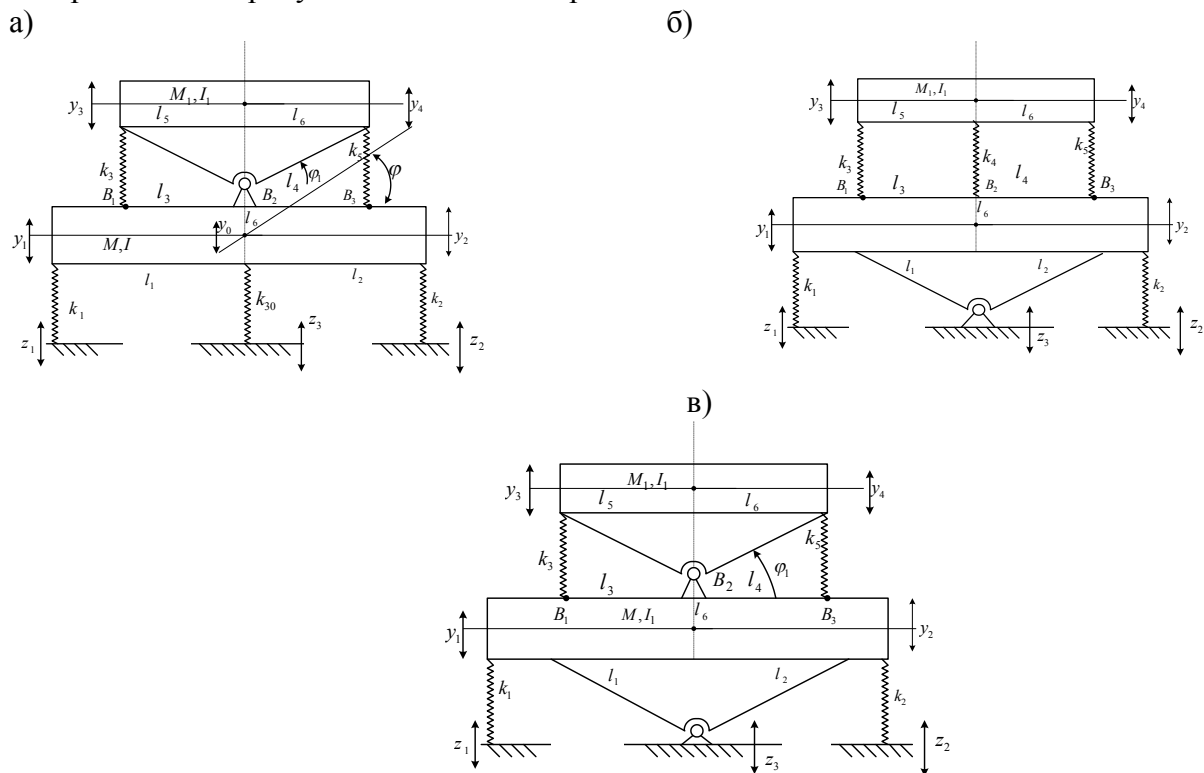


Рисунок 3 – Расчетная схема для виброзащитной системы с сочленениями
 а – соответствует сочленению $k_4 \rightarrow \infty$; б – соответствует сочленению $k_{30} \rightarrow \infty$;
 в – соответствует сочленениям $k_4 \rightarrow \infty$ и $k_{30} \rightarrow \infty$ одновременно

Возможен и третий вариант, при котором в виброзащитной системе формируется два сочленения (рис. 3 в). Для сравнительного анализа возможностей изменения динамических свойств при введении сочленений рассмотрим несколько примеров.

При первом варианте сочленения имеют место соотношения:

$$y_0 = y_{00}, y_1 = y_0 - l_1\varphi, y_2 = y_0 + l_2\varphi, y_{B_1} = y_0 - l_3\varphi, y_{B_3} = y_0 + l_4\varphi, \varphi = c(y_2 - y_1). \quad (14)$$

Запишем выражения для кинетической и потенциальной энергий в виде

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\varphi}_1, \quad (15)$$

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (y_0 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - y_{B_1})^2 + \frac{1}{2} k_5 (y_4 - y_{B_3})^2. \quad (16)$$

Учтем ряд связей между координатами и параметрами

$$\varphi_1 = \frac{y_3 - y_{B_1}}{l_3}, (l_3 = l_5), c_1 = \frac{1}{l_3}. \quad (17)$$

Преобразуем (15), (16) с учетом (14), (17) и найдем, что

$$T = \frac{1}{2} M (a\dot{y}_1 + b\dot{y}_2)^2 + Ic^2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} I_1 c_1^2 [y_3 - a_1 \dot{y}_1 - b_1 \dot{y}_2]^2, \quad (18)$$

где $b_1 = b - l_3c$, $a_1 = a + l_3c$.

В детализированной форме (18) запишется:

$$T = \frac{1}{2} M (a^2 \dot{y}_1^2 + 2ab\dot{y}_1\dot{y}_2 + b^2 \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} Ic^2 (\dot{y}_2^2 - 2\dot{y}_1\dot{y}_2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_1 c_1^2 [\dot{y}_3^2 - 2a_1 \dot{y}_1 \dot{y}_3 + a_1^2 \dot{y}_1^2 - 2b_1 \dot{y}_2 \dot{y}_3 + b_1 \dot{y}_2 a_1 \dot{y}_1 + b_1^2 \dot{y}_2^2]. \quad (19)$$

В свою очередь, потенциальная энергия определится в виде:

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (ay_1 + by_2 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 [y_3 - ay_1 - by_2 + l_3(y_2 - y_1)c]^2 + \frac{1}{2} k_5 (-\varphi_1 \frac{l_6}{l_5} - y_{B_1})^2. \quad (20)$$

В детализированном виде (20) можно представить как

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (ay_1 + by_2 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 [y_3 - ay_1 - by_2 + l_3(y_2 - y_1)c]^2 + \frac{1}{2} k_5 [-\dot{y}_3 l_4 c_1 + y_1 a_3 + y_2 b_3]^2$$

или

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_{30} (ay_1 + by_2 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - a_4 y_1 - b_4 y_2)^2 + \frac{1}{2} k_5 [-y_3 l_4 c_1 + y_1 a_3 + y_2 b_3]^2, \quad (21)$$

где $a_4 = a + cl_3$, $b_4 = b - l_3c$, $a_3 = l_4 c_1 a + l_4 c_1 c - a + l_4 c$, $b_3 = l_4 c_1 b - l_4 c_1 c - b - l_4 c$.

Используя (19)÷(21) и известные приемы составления уравнений движения [6], можно получить систему дифференциальных уравнений движения системы. В таблице 2 представлены коэффициенты уравнений движения в системе координат y_1, y_2, y_3 для случая, приведенного на рисунке 3а. Для вывода уравнений используются выражения (18)÷(21).

Таблица 2 – Коэффициенты уравнений системы (рис. 3а) в системе координат y_1, y_2, y_3

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$(Ma^2 + Ic^2 + I_1c_1^2 a_1^2)p^2 + k_1 + k_{30}a_1^2 + k_5a_3^2$	$(Mab - Ic^2 + I_1c_1 a_1 b_1)p^2 + k_{30}ab + k_3a_4b_4 + k_5b_3a_3$	$(-I_1c_1^2 a_1)p^2 - k_3a_4 - k_5a_3l_4c_1$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$(Mab - Ic^2 + I_1c_1 a_1 b_1)p^2 + k_{30}ab + k_3a_4b_4 + k_5b_3a_3$	$(Mb^2 + Ic^2 + I_1c_1^2 b_1^2)p^2 + k_2 + k_{30}b^2 + k_3b_4^2 + k_5b_3^2$	$(-I_1c_1^2 b_1)p^2 - k_3b_4 - k_3l_4c_1b_3$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$(-I_1c_1^2 a_1)p^2 - k_3a_4 - k_5a_3l_4c_1$	$(-I_1c_1^2 b_1)p^2 - k_3b_4 - k_3l_4c_1b_3$	$(I_1c_1^2)p^2 + k_5 + k_5(l_4c_1)^2$
Q_1	Q_2	Q_3
$k_1z_1 + k_{30}az_3$	$k_2z_2 + k_{30}bz_3$	0

Примечание: в расчетах приняты следующие обозначения: $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$, $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$, $c = \frac{1}{l_1 + l_2}$, $c_1 = \frac{1}{l_3}$, $a_1 = a + l_3c$, $b_1 = b - l_3c$, $a_3 = b_4c_1a + l_4c_1c - a + l_4c$, $b_3 = l_4c_1b - l_4c_1c - b - l_4c$, $a_4 = a + l_3c$, $b_4 = b - l_3c$.

Структурная схема системы, изображенная на рисунке 3а, приведена на рисунке 4.

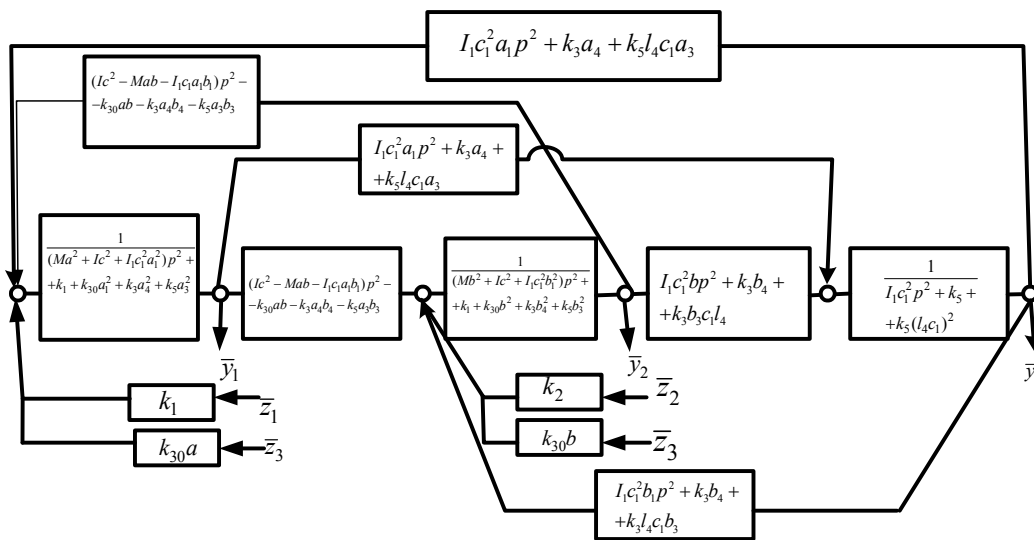


Рисунок 4 – Структурная схема системы с сочленением по варианту, изображенному на рисунке 3а

Особенностью системы является наличие упруго-инерционных связей, которые объединяют в динамическом взаимодействии три парциальные системы. При определенных условиях связи между парциальными системами могут становиться равными нулю:

связь между парциальными системами y_1, y_2 -

$$\omega_{1 \text{ дин}}^2 = \frac{k_{30}ab + k_3a_4b_4 + k_5a_3b_3}{Ic^2 - Mab - I_1c_1a_1b_1}; \quad (22)$$

связь между парциальными системами y_2 и y_3 -

$$\omega_{2 \text{ дин}}^2 = \frac{k_3 b_4 + k_3 c_1 l_4 b_3}{I_1 c_1^2 b_1}; \quad (23)$$

связь между парциальными системами y_1 и y_3 -

$$\omega_{3 \text{ дин}}^2 = \frac{k_3 a_4 + k_3 c_1 l_4 a_3}{I_1 c_1^2 a_1}. \quad (24)$$

При «обнулении» перекрестных связей система приобретает возможности движения, при котором парциальные системы не влияют друг на друга. Наибольший интерес представляет ситуация, когда выражения (22)÷(24) могут оказаться одновременно равными между собой.

Используя правила Крамера [4], найдем (при $z_1 = z_2 = z_3$), что

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}} = \frac{(k_1 + k_{30}a)(a_{22}a_{23} - a_{23}^2) + (k_2 + k_{30}b)(a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33})}{A}, \quad (25)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}} = \frac{(k_1 + k_{30}a)(a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}) + (k_2 + k_{30}b)(a_{11}a_{33} - a_{13}^2)}{A}, \quad (26)$$

$$W_3(p) = \frac{\bar{y}_3}{\bar{z}} = \frac{(k_1 + k_{30}a)(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) + (k_2 + k_{30}b)(a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32})}{A}, \quad (27)$$

$$\text{где } A = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}^2 + a_{12}a_{23}a_{31} - a_{33}a_{12}^2 - a_{13}a_{21}a_{32} - a_{22}a_{13}^2 \quad (28)$$

является характеристическим уравнением системы.

Из выражений (25)÷(28) с учетом данных из таблицы 2, можно определить частотные уравнения числителей соответствующих передаточных функций. Все уравнения в силу специфики коэффициентов таблицы 2 будут биквадратными, что позволяет по каждой из координат найти частоты динамического гашения. Такие выражения будут отличаться от (22)÷(24), поскольку последние отражают лишь свойства взаимодействия между парциальными системами, тогда как (25)÷(26) связаны с представлениями об отсутствии перемещений по выбранной координате в режиме динамического гашения. В общем случае можно предполагать, что при определенном выборе параметров выполняются условия $\bar{y}_2 - \bar{y}_1 = 0$, что соответствует некоторой форме самоорганизации движения при вибрациях основания, когда объект защиты совершает колебания синхронно по координатам y_1 и y_2 , а угловые колебания вокруг центра тяжести объекта отсутствуют. Отметим, что все предполагаемые виды движений возможны лишь при очень малых силах сопротивления или их отсутствии.

Если от системы координат y_1, y_2, y_3 перейти к системе координат y_0, φ и y_3 , то при одновременном выполнении условий $\bar{y}_0 = 0, \bar{\varphi} = 0$, можно ожидать специфичного режима динамического гашения колебаний, при котором объект защиты, как плоское твердое тело будет находиться в неподвижном состоянии. Такой режим динамического гашения можно отнести к специфичным формам самоорганизации движения. Особенности таких режимов рассмотрены в работе [7].

СОЧЛЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ

Введение сочленений приводит к уменьшению общего числа степеней свободы по отношению к исходной системе (рис. 1); вместе с тем, в виброзащитной системе могут появляться специфичные режимы динамического взаимодействия её массоинерционных элементов. Рассмотрим вариант сочленений по схеме на рис. 3в. Запишем выражения для кинетической энергии:

$$T = \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\phi}_1^2. \quad (29)$$

Введем ряд соотношений

$$\varphi_1 = \frac{y_3 - y_{B_1}}{l_3}; y_{B_1} = y_3 - l_3 \varphi_1; \frac{y_1 + z_3}{l_1} = \varphi, \quad \varphi = \frac{[(y_3 + z_3) - y_{B_1}]}{l_3}. \quad (30)$$

Выражение для потенциальной энергии системы имеет вид

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - y_{B_1})^2 + \frac{1}{2} k_4 (y_4 - y_{B_3})^2. \quad (31)$$

Преобразуем (29) с учетом (24), (30)

$$T = \frac{1}{2} I \left(\frac{\dot{y}_1 + \dot{z}_3}{l_1^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\dot{y}_3 - \dot{y}_{B_1}}{l_3^2} \right)^2; \quad (32)$$

где $y_{B_1} = \varphi l_3 = \frac{y_1 + z_3}{l_1} l_3$, тогда $T = \frac{1}{2} I c^2 (\dot{y}_1 + \dot{z}_3)^2 + \frac{1}{2} I_1 c_1^2 \left(\dot{y}_3 - \frac{l_3}{l_1} (\dot{y}_1 + \dot{z}_3) \right)^2$;

при этом $c = \frac{1}{l_1}$, $c_1 = \frac{1}{l_3}$. (33)

Запишем (33) в развернутом виде

$$T = \frac{1}{2} I c^2 (\dot{y}_1^2 + 2\dot{y}_1\dot{z}_3 + \dot{z}_3^2) + \frac{1}{2} I_1 c_1^2 (\dot{y}_3 - a\dot{y}_1 - b\dot{z}_3)^2 \quad (34)$$

и сделаем ряд промежуточных выкладок: $\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = I c^2 \dot{y}_1 - I c^2 \dot{z}_3 + I_1 c_1^2 a^2 \dot{y}_1 - I_1 c_1^2 a \dot{y}_3 + I_1 c_1^2 b z_3$, где

$$a = \frac{l_3}{l_1}, \quad a = b, \quad y_{B_1} = l_3 \varphi = \frac{l_3}{l_1} (y_1 + z_3); \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = \dot{y}_1 (I c^2 + I_1 c_1^2 a^2) + \dot{z}_3 (-I c^2 + I_1 c_1^2 a) - I_1 c_1^2 a \dot{y}_3;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} = I_1 c_1^2 \dot{y}_3 - I_1 c_1^2 a \dot{y}_1 - I_1 c_1^2 a \dot{z}_3.$$

Преобразуем выражение (31) к виду:

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 \left[-\frac{l_2}{l_1} (y_1 + z_3) - z^2 \right]^2 + \frac{1}{2} k_3 \left[y_3 - \frac{l_3}{l_1} (y_1 + z_3) \right]^2 + \frac{1}{2} k_4 \left[-\frac{l_4}{l_3} (y_3 + z_3) - \frac{l_3}{l_1} (y_1 + z_3) - y_{B_3} \right]^2. \quad (35)$$

Примем, что $y_{B_3} = l_4 \varphi = -\frac{l_4}{l_1} (y_1 + z_3)$; $a_2 = \frac{l_4}{l_1}$, $a = \frac{l_3}{l_1}$, $b_1 = \frac{l_4}{l_3}$, $a_1 = \frac{l_2}{l_1}$.

Тогда выражение (35) можно записать

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 \left[-a_1 (y_1 + z_3) - z^2 \right]^2 + \frac{1}{2} k_3 \left[y_3 - a (y_1 + z_3) \right]^2 + \frac{1}{2} k_4 \left[-b_1 \left[(y_3 + z_3) - a (y_1 + z_3) \right] + a_2 (y_1 + z_3) \right]^2. \quad (36)$$

Представим (36) в виде

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (-a_1 y_1 - a_1 z_3 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - a y_1 - a z_3)^2 + \frac{1}{2} k_4 \left[y(-b_1) - z_3 (b_1 + a - a_2) + y_1 (-a + a_2) \right]^2. \quad (37)$$

Пусть $b_1 + a - a_2 = a_3$, $b_3 = -a + a_2$, тогда (37) преобразуется:

$$П = \frac{1}{2} k_1 (y_1 + z_3 - z_1) + \frac{1}{2} k_2 (-a_1 y_1 - a_1 z_3 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - a y_1 - a z_3)^2 + \frac{1}{2} k_4 \left[(-b_1 y_3 - a_3 z_3) + y_1 b_3 \right]^2. \quad (38)$$

Произведем ряд вспомогательных выкладок:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = k_1 y_1 - k_1 (z_3 - z_1) + k_2 a_1^2 y_1 - k_2 a_1 (z_2 + z_3) + k_3 a^2 y_1 - k_3 a y_3 + k_3 a z_3 + k_4 b_3^2 y_1 - k_4 b_3 b_1 y_3 - k_4 a_3 b_3 z_3;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_3} = k_3 y_3 - k_3 a y_1 - k_3 a z_3 + k_4 b_1^2 y_3 + k_4 a_3 z_3 - k_4 b_1 b_3 y_1.$$

С учетом (27), (33), (34), (38) уравнение движения можно представить в виде

$$\ddot{y}_1 (Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) + y_3 (-I_1 c_1^2 a) + \ddot{z}_3 (-Ic^2 + I_1 c_1^2 b) + k_1 y_1 + k_2 a_1^2 y_1 + k_3 a^2 y_1 + k_4 b_3^2 y_1 + y_3 (-k_3 a_4 - k_4 b_3 b_1 + k_1 z_3 - k_1 z_1 - k_2 a_1 z_2 - k_2 a_1 z_3 + k_3 a z_3 - k_4 a_3 b_3 z) = 0; \tag{39}$$

$$\ddot{y}_1 (-I_1 c_1^2 a) + \ddot{y}_3 (I_1 c_1^2) - I_1 c_1^2 a \ddot{z}_3 + y_1 (-k_3 a - k_4 b_1 b_3) + y_3 (k_3 + k_4 b_1^2) + z_3 (-k_3 a + k_4 a_3) = 0.$$

Таблица 3 – Коэффициенты уравнений (38), (39) в координатах y_1, y_3

a_{11}	a_{12}
$(Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) p^2 + k_1 + k_2 a_1^2 + k_3 a^2 + k_4 b_3^2$	$(-I_1 c_1^2 a) p^2 - k_3 a - k_4 a - k_4 b_3 b_1$
a_{21}	a_{22}
$(-I_1 c_1^2 a) p^2 - k_3 a - k_3 a - k_4 b_3 b_1$	$I_1 c_1^2 p^2 + k_3 + k_4 b_1^2$
Q_1	Q_2
$(Ic^2 + I_1 c_1^2 b) p^2 z_3 - k_1 z_3 + k_1 z_1 + k_2 a_1 (z_2 + z_3) - k_3 a z_3 + k_4 a_3 b_3 z_3$	$I_1 c_1^2 a p^2 z_3 + k_3 a z_3 - k_4 a_3 z_3$

Примечание: в расчетах приняты обозначения:

$$c = \frac{1}{l_1}, c_1 = \frac{1}{l_3}, a = \frac{l_3}{l_1}, a = b, a_1 = \frac{l_2}{l_1}, b_1 = \frac{l_4}{l_3}, a_2 = \frac{l_4}{l_2}, b_3 = -a + a_2, a_3 = b_1 + a - a_2.$$

Структурная схема системы по рисунку 3в представляет собой эквивалентную в динамическом отношении систему автоматического управления с двумя степенями свободы и имеет вид как показано на рисунке 5.

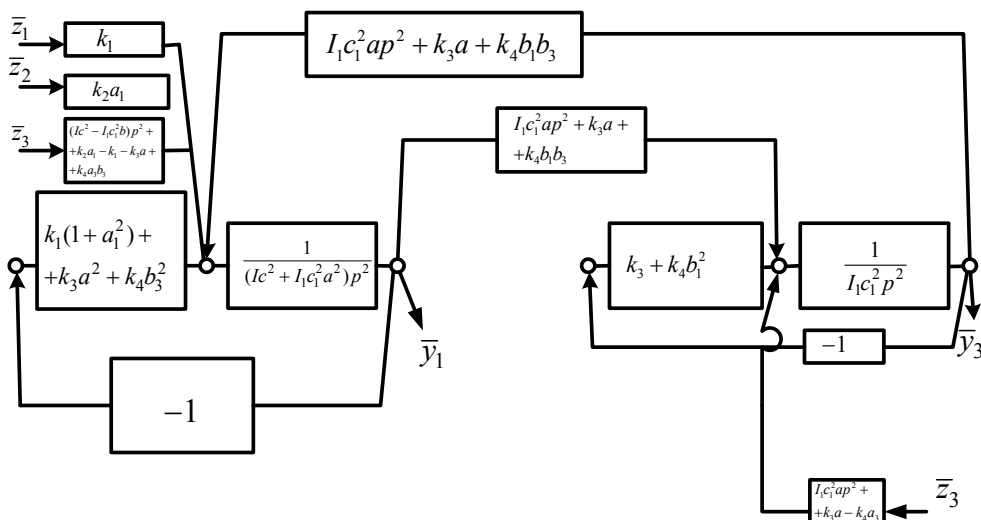


Рисунок 5 – Структурная схема системы в координатах y_1, y_3 по рисунку 3в

Парциальные системы y_1, y_3 в структурной схеме на рисунке 5 имеют инерционно-упругую связь. При определенной частоте перекрестная связь может зануляться. При этом

$$\omega_1^2 = \frac{k_3 a + k_4 b_1 b_3}{I_1 c_1^2 a}.$$

В этом случае движения парциальных систем (при отсутствии сил трения) будут независимыми.

ДЕТАЛИЗАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

При $z_3 = z_2 = z_1 = z$ по координате y_1 можно получить, используя правило Крамера

[4], что $y_1 = \frac{Q_1 a_{22} - Q_2 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{21}^2}$, где a_{11}, a_{21}, a_{22} – коэффициенты из таблицы 3.

Запишем обобщенные силы:

$$Q_1 = \left[(Ic^2 - I_1 c_1^2 b) p^2 + 2k_2 a_1 - k_3 a + k_4 b_3 a_3 \right], \quad Q_2 = I_1 c_1^2 a p^2 + k_3 a - k_4 a_3, \quad (40)$$

Тогда передаточная функция системы с учетом (39), (40) по y_1 примет вид

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{z} = \frac{Q_1 (I_1 c_1^2 p^2 + k_3 + k_4 b_1^2) - Q_2 (-I_1 c_1 a p^2 - k_3 a - k_4 b_3 b_1)}{a_{11} (I_1 c_1^2 p^2 + k_3 + k_4 b_1^2) - (I_1 c_1^2 a p^2 + k_3 a + k_4 b_3 b_1)^2}. \quad (41)$$

Раскроем числитель этого выражения, полагая, что

$$R_0 = \left[(Ic^2 - I_1 c_1^2 b) p^2 + 2k_2 a_1 - k_3 a + k_4 a_3 b_3 \right] \times (I_1 c_1^2 p^2 + k_3 + k_4 b_1^2) - (I_1 c_1^2 a p^2 + k_3 a - k_4 a_2) (-I_1 c_1^2 a p^2 + k_3 a - k_4 b_3 b_1) \quad (42)$$

является числителем (36).

Примем, что

$$r_1 = 2k_2 a_1 - k_3 a + k_3 a_3 b_3, \quad r_2 = k_3 + k_4 b_1^2, \quad r_3 = k_3 a - k_4 a_2, \quad r_4 = -k_3 a + k_4 b_3 b_1 \quad (43)$$

и преобразуем к виду:

$$R_0 = \left[(Ic^2 - I_1 c_1^2 b) p^2 + r_1 \right] (I_1 c_1^2 p^2 + r_2) + (I_1 c_1^2 a p^2 + r_3) (I_1 c_1^2 a + r_4);$$

$$R_0 = (Ic^2 - I_1 c_1^2 b) I_1 c_1^2 p^4 - p^2 \left[r_1 I_1 c_1^2 + r_2 (Ic^2 - I_1 c_1^2 b) \right] + r_1 r_2 + p^4 (I_1 c_1^2 a)^2 + p^2 (I_1 c_1^2 a r_3 + r_4 I_1 c_1^2 a) + r_3 r_4$$

или окончательно

$$R_0 = p^4 \left[(Ic^2 - I_1 c_1^2 b) I_1 c_1^2 + (I_1 c_1^2 a)^2 \right] + p^2 \left[r_1 I_1 c_1^2 + r_2 (Ic^2 - I_1 c_1^2 b) + I_1 c_1^2 a r_3 + r_4 I_1 c_1^2 a \right] + r_1 r_2 + r_3 r_4. \quad (44)$$

В общем случае в системе с учетом (41)÷(44) имеется два режима динамического гашения, что определяет характерные признаки амплитудно-частотных характеристик. Частотное уравнение знаменателя передаточной функции или характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$\left[(Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) p^2 + k_1 + k_1 a_1^2 + k_3 a^2 + k_4 b_3^2 \right] \times \left[I_1 c_1^2 p^2 + k_3 + k_4 b_1^2 \right] - \left[I_1 c_1^2 a p^2 + k_3 a + k_4 b_3 b_1 \right]^2 = 0. \quad (45)$$

Примем в (45), что $m_1 = k_1 + k_2 a_1^2 + k_3 a^2 + k_4 b_3^2$, $m_2 = k_3 + k_4 b_1^2$, $m_3 = k_3 a + k_4 b_3 b_1$,

тогда уравнение (45) преобразуется

$$(Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) I_1 c_1^2 p^4 + p^2 \left[m_1 I_1 c_1^2 + m_2 (Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) \right] + m_1 m_2 - (I_1 c_1^2 a)^2 p^4 - 2 I_1 c_1^2 a m_3 p^2 - m_3^2 = 0. \quad (46)$$

После упрощения (46) получим

$$p^4 \left[I_1 c_1^2 \right] + p^2 \left[I_1 c_1^2 m_1 + m_2 Ic^2 + m_2 I_1 c_1^2 a^2 - 2 I_1 c_1^2 a m_3 \right] + m_1 m_2 - m_3^2 = 0. \quad (47)$$

$$R_1 = (k_1 + k_2 a_1^2 + k_4 b_3^2) (k_3 + k_4 b_1^2) - (k_3 a + k_4 b_3 b_1)^2.$$

Используем соотношения: $a_1 = \frac{l_3}{l_1}, b_1 = \frac{l_4}{l_3}, b_3 = -a + a_2, a_2 = \frac{l_4}{l_2}, i = \frac{l_2}{l_1}, i_1 = \frac{l_4}{l_3}$, тогда

уравнение (42) примет вид

$$R_1 = \left[k_1 + k_3 i^2 + k_3 \frac{l_3^2}{l_1^2} + k_4 \left(\frac{l_4 l_1 - l_2 l_3}{l_1 l_2} \right)^2 \right] (k_3 + k_4 i_1^2) - \left[k_3 \frac{l_3}{l_1} + k_4 \frac{l_4}{l_3} \left(\frac{l_4 l_1 - l_2 l_3}{l_1 l_2} \right) \right]^2. \quad (48)$$

Если принять, что $l_4 l_1 - l_2 l_3 = 0$, то $\frac{l_4}{l_3} = \frac{l_2}{l_1}$, то есть $i = i_1$, тогда (48) упростится

$$R_1 = (k_1 + k_2 i^2)k_3 + k_1 k_4 i^2 + k_3 k_4 \left(i^4 - i^2 \left(\frac{l_3}{l_1} \right)^2 \right). \quad (49)$$

Знак свободного члена частотного уравнения знаменателя передаточной функции (49) также как в (28) определяет свойства устойчивости системы. Если $R_1 = 0$, то система может совершать циклическое движение, что препятствует ее использованию в качестве виброзащитной системы. При $R < 0$ характеристическое уравнение свидетельствует о неустойчивости системы. При $R > 0$ система, в общем случае, имеет две частоты собственных колебаний. В целом, система при $p \rightarrow 0$ имеет значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ):

$$W_1(p) = \frac{r_1 r_2 + r_3 r_4}{m_1 m_2 - m_3^2} = (k_1 + k_2 a_1^2 + k_3 a^2 + k_4 b_3^2)(k_3 + k_4 b_1^2) - (k_3 a + k_4 b_3 b_1)^2. \quad (50)$$

При высоких частотах

$$W_1(p) = \frac{(Ic^2 - I_1 c_1^2 b) I_1 c_1^2}{(Ic^2 + I_1 c_1^2 a^2) I_1 c_1^2 - (I_1 c_1^2 a)^2} = \frac{Ic^2 - I_1 c_1^2 b}{Ic^2}. \quad (51)$$

Очевидно, что выражение (51) меньше единицы. На рис. 6 а, б представлено семейство амплитудно-частотных характеристик системы при $z_1 = z_2 = z$ и параметрах: $M = 100 \text{ кг}$, $I = 50 \text{ кг} / \text{м}^2$, $I_1 = 0 - 50 \text{ кг} / \text{м}^2$ (шаг 5), $M_1 = 0 - 150 \text{ кг}$ (шаг 5), $l_1 = 0,7 \text{ м}$, $l_2 = 0,5 \text{ м}$, $l_3 = 0,4 \text{ м}$, $l_4 = 0,3 \text{ м}$, $l_5 = 0,3 \text{ м}$, $l_6 = 0,4 \text{ м}$, $k_1 = 100 \text{ н} / \text{м}$, $k_{30} = 1200 \text{ н} / \text{м}$, $k_2 = 1500 \text{ н} / \text{м}$, $k_3 = 200 \text{ н} / \text{м}$, $k_4 = 300 \text{ н} / \text{м}$, $k_5 = 400 \text{ н} / \text{м}$.

Как, следует из модельного примера выбор параметров системы может существенно изменять вид амплитудно-частотных характеристик. Большое значение имеет очередность расположения режимов динамического гашения между частотами собственных колебаний.

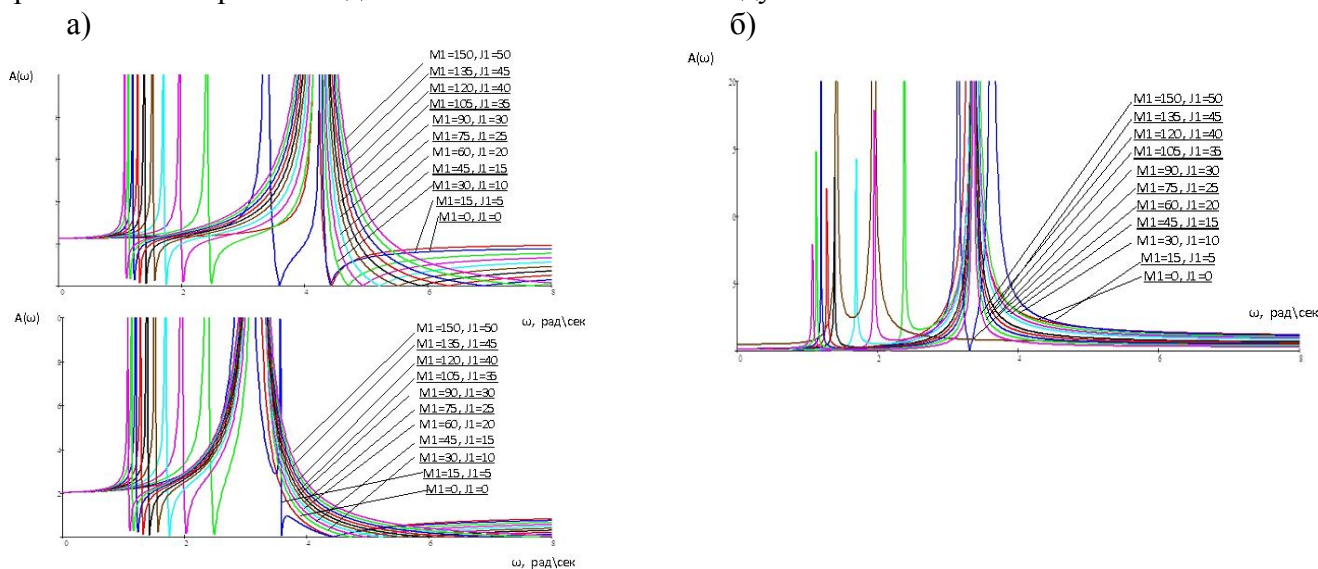


Рисунок 6 – Амплитудно-частотные характеристики системы

- а) частоты динамического гашения располагаются между резонансными частотами;
- б) случай нарушения очередности расположения частот динамического гашения

На рисунке 7 приведены различные формы амплитудно-частотных характеристик, которые допускаются варьированием значений основных параметров. Особенностью рассматриваемой системы является возможность получения совместных или консолидированных режимов динамического гашения: $y_1 - y_2 = 0$, а также $y_0 = 0$, $\varphi = 0$ для расчетных схем с тремя степенями свободы. В этом случае динамический гаситель в виде твердого тела,

имеющего сочленение с объектом защиты, обладает возможностями реализации нескольких видов динамического гашения колебаний в зависимости от особенностей внешнего возмущения.

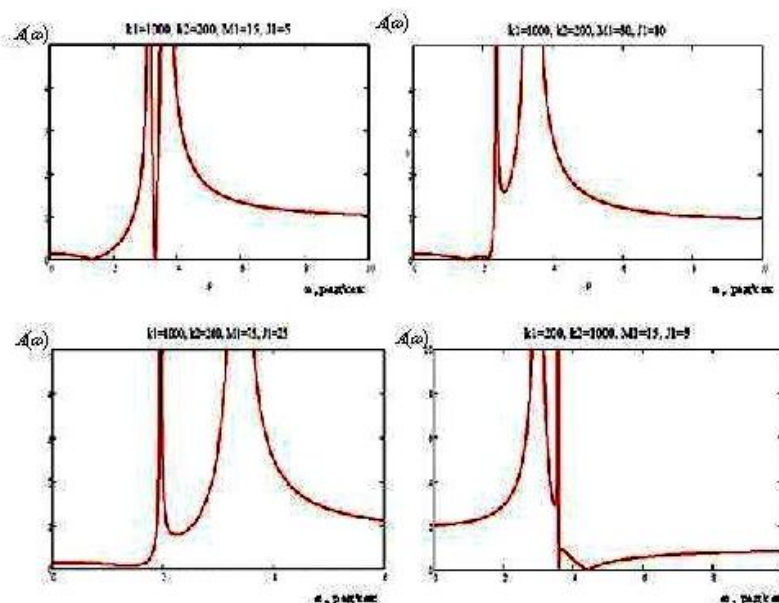


Рисунок 7 – Виды амплитудно-частотных характеристик системы при различных соотношениях параметров (значения параметров приведены на поле рисунка)

При изменении величины массы и момента инерции динамического гасителя происходит сдвиг частот собственных колебаний (первая частота собственных колебаний) в сторону меньших значений. Для системы характерно наличие двух частот динамического гашения. Первая частота динамического гашения находится между двумя частотами собственных колебаний, вторая частота динамического гашения находится за пределами второй (более высокой) частоты собственных колебаний. При дальнейшем увеличении частоты внешнего воздействия частота запирается.

Изменение параметров системы обладает потенциалом широкого изменения динамических свойств. При уменьшении жесткости пружин крепления динамического гасителя k_3, k_4 амплитудно-частотные характеристики принимают вид, соответствующий иному расположению частот динамического гашения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамический гаситель колебаний, закрепляемый на объекте защиты с помощью шарнира, называемый Г-образным, может быть получен из механической колебательной системы общего вида. Такая исходная система имеет четыре степени свободы и содержит упругие и массоинерционные элементы, движение которых может быть описано в нескольких системах координат. Используя подходы, основанные на выборе относительных координат движения точек, в дальнейшем составляющих кинематическую пару, можно упростить исходную систему и получить, в частности, математическую модель системы с двумя степенями свободы. Обобщенный подход к построению математических моделей с динамическими гасителями колебаний позволяет найти условия реализации ряда специфичных режимов, в которых объект защиты может изменять свое динамическое состояние в нужном направлении, что может быть обеспечено соответствующим выбором изменяемых параметров системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, С.В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко, А.А. Засядко. – Иркутск.: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. – 523 с.

2. Ермошенко, Ю.В. Динамическое гашение колебаний в виброзащитных системах с использованием Г-образных рычажных связей / Ю.В. Ермошенко, И.В. Фомина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 2(22). – С.85-89.
3. Виттенберг, И. Динамика твердых тел / И. Виттенберг. – М.: Мир. 1984. – 295 с.
4. Дружинский, И.А. Механические цепи / И.А. Дружинский. – М.: Машиностроение. 1977. – 224 с.
5. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 549 с.
6. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики. Т2. Динамика / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 640 с.
7. Елисеев, С.В. Особенности динамики трехмассовых виброзащитных систем. Формы самоорганизации движения / С.В. Елисеев, Р.Ю. Упырь // Вестник ИрГТУ. – 2009. – № 40. – С. 62-67.

Елисеев Сергей Викторович

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск
Доктор технических наук, профессор, директор НИИ современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС
Тел.: (3952) 59-84-28
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Хоменко Андрей Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск
Доктор технических наук, профессор, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения
Тел.: 7 (3952)-63-83-11

S.V. ELISEEV, A.P. KHOMENKO

**MATHEMATICAL MODELS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH LEVER
DYNAMICAL ABSORBER OF OSCILLATIONS**

Approaches for building general theory of dynamical absorbtion of vibration in mechanical systems are suggested. Desirable effects for elimination of oscillations by using of coupling between links of system are considered.

Keywords: vibroprotection systems, dynamical absorbers, lever mechanisms.

BIBLIOGRAPHY

1. Eliseev, S.V. Dinamicheskij sintez v obobwennyh zadachah vibrozawity i vibroizoljacji tehniche-skih ob#ektov / S.V. Eliseev, Ju.N. Reznik, A.P. Homenko, A.A. Zaszjadko. – Irkutsk.: Izd-vo Irk. gos. un-ta, 2008. – 523 s.
2. Ermoshenko, Ju.V. Dinamicheskoe gashenie kolebanij v vibrozawitnyh sistemah s ispol'zovaniem G-obraznyh rychazhnyh svjazej / Ju.V. Ermoshenko, I.V. Fomina // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2009. – № 2(22). – S.85-89.
3. Vittenberg, I. Dinamika tverdyh tel / I. Vittenberg. – М.: Mir. 1984. – 295 s.
4. Druzhinskij, I.A. Mehanicheskie cepi / I.A. Druzhinskij. – М.: Mashinostroenie. 1977. – 224 s.
5. Babakov, I.M. Teorija kolebanij / I.M. Babakov. – М.: Nauka, 1968. – 549 s.
6. Lojcjanskij, L.G. Kurs teoreticheskoy mehaniki. T2. Dinamika / L.G. Lojcjanskij, A.I. Lur'e. – М.: Nauka, 1980. – 640 s.
7. Eliseev, S.V. Osobennosti dinamiki trehmassovyh vibrozawitnyh sistem. Formy samoorganiza-cii dvizhenija / S.V. Eliseev, R.Ju. Upyr' // Vestnik IrGTU. – 2009. – № 40. – S. 62-67.

Eliseev Sergey Viktorovich

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk
Doctor of technical science, professor, director of research institute of modern technologies, system analysis and modeling of IrSURE
Tel. 3952-59-84-28
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Homenko Andrey Pavlovich

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk
Doctor of technical science, professor, rector of Irkutsk state university of railway engineering
Tel. 7-3952-63-83-11

МОДЕЛИРОВАНИЕ **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 658.5.011; 658.52.011.56

А.А. ГРИБОВСКИЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ДЕТАЛЕЙ-АНАЛОГОВ НА БАЗЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

В работе рассмотрены подходы к проектированию технологических процессов и проанализированы возможности получения параметрического описания трехмерных моделей изделий. Рассмотрен подход к параметризации на основе форматов-интерфейсов трехмерных моделей и представлен алгоритм анализа на основе существующих программных средств. Описан механизм использования PDM-системы для анализа и представления результатов поиска изделий-аналогов.

***Ключевые слова:** параметрическое описание трехмерных моделей; интерфейсы трехмерных моделей; изделие-аналог; проектирование технологических процессов; конструктивные элементы.*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, проектирование технологических процессов является очень ресурсоемкой задачей. При этом попытки автоматизации данной задачи возникает ряд проблем, связанных с особенностями, как методов проектирования, так и информации, применяемой на данном этапе технологической подготовки производства.

Существуют два основных метода проектирования технологических процессов:

- метод адресации к унифицированным (типовым или групповым) технологическим процессам;
- метод синтеза технологических процессов.

При этом метод синтеза является универсальным методом, предназначенным для проектирования технологических процессов на детали и сборочные единицы для любых изделий. Основой метода является положение о том, что процесс проектирования технологических процессов является многоуровневым и итерационным, то есть проектирование технологических процессов опирается само на себя и принятие решений организуется с использованием механизма обратной связи. Такой процесс может оказаться крайне трудоемким, но подходит для проектирования даже деталей высокой сложности.

Метод адресации основан на использовании групповой обработки деталей и организации группового производства. Важным атрибутом такого подхода является высокая типизация решений. Одной из разновидностей метода адресации является метод, основанный на заимствовании существующих ТП на основе поиска деталей - аналогов.

Автоматическое решение задач проектирования технологических процессов относится к высокому уровню автоматизации, характеризующемуся широким применением баз знаний. В этом случае становится возможным автоматизированное принятие сложных логических решений, таких как выбор структуры процесса и операций, назначением технологических баз и другие. Такой уровень автоматизации требует вводить параметрическую модель детали с высокой степенью детализации. Полная автоматизация на данном уровне требует разработки экспертных систем и искусственного интеллекта. Частичная автоматизация, связанная с реализацией автоматического поиска детали-аналога и последующим частичным или полным заимствованием технологического процесса, также включает ряд нетривиальных задач, требующих решения.

В работе представлены основные задачи, которые необходимо решить для автоматизации поиска детали-аналога, проанализированы средства хранения и представления конструктивной информации об изделии. Также предложены алгоритмы получения параметрической модели изделия и ее кодирования для проведения дальнейшего поиска.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТП НА ОСНОВЕ ЗАИМСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДЕТАЛИ-АНАЛОГА

Для использования при проектировании технологического процесса деталей-аналогов следует решить несколько задач автоматизации, включая:

- выбор типа трехмерных моделей изделий, исполняющих роль базового элемента автоматизации;
- определение структуры и семантических связей внутри трехмерной модели изделия;
- разработка алгоритма анализа трехмерной модели изделия с получением информации об имеющихся примитивах;
- формализация параметров примитивов и представление их в кодированном виде, соответствующем параметрической модели изделия;
- формирование базы данных по трехмерным моделям изделий;
- создание инструментальных средств для поиска трехмерных моделей по сходству параметров примитивов.

В результате решения представленных задач и выполнения поисковых процедур находится несколько деталей-аналогов, которые могут стать прообразами для определения технологии изготовления конкретного изделия.

В настоящее время для решения подобных задач применяются параметрические модели изделий. Однако для их полноценного использования требуется внедрение унифицированной схемы параметризации проектируемых моделей. При этом параметризация требует смены механизмов проектирования для увеличения степени их унификации, что не только значительно усложнит весь процесс подготовки нового изделия к изготовлению, но и потребует перестроения уже имеющихся трехмерных моделей. Таким образом, автоматизация на основе параметрического моделирования оказывается трудно реализуемой.

Автоматизация параметризации трехмерных моделей изделий требует разработки алгоритмов и программных средств анализа. Одним из наиболее перспективных подходов является использование формата STEP для обработки трехмерной геометрии[1].

Трехмерная геометрия в формате STEP представляет собой примитивы нижнего уровня и связующие их элементы. Так цилиндрические поверхности являются набором окружностей и направляющих, связанных в единый объект. За счет открытости формата STEP, извлечение внутренней геометрии становится возможным большинством языков программирования, поддерживающих создание парсеров. Под парсером понимается синтаксический анализатор, сопоставляющий линейную последовательность лексем (слов, токенов) языка с его формальной грамматикой. Дальнейшее описание алгоритмов будет представлено на основе использования языка программирования Python[2]. Общая схема обработки модели представлена в виде диаграммы UML на рисунке 1.

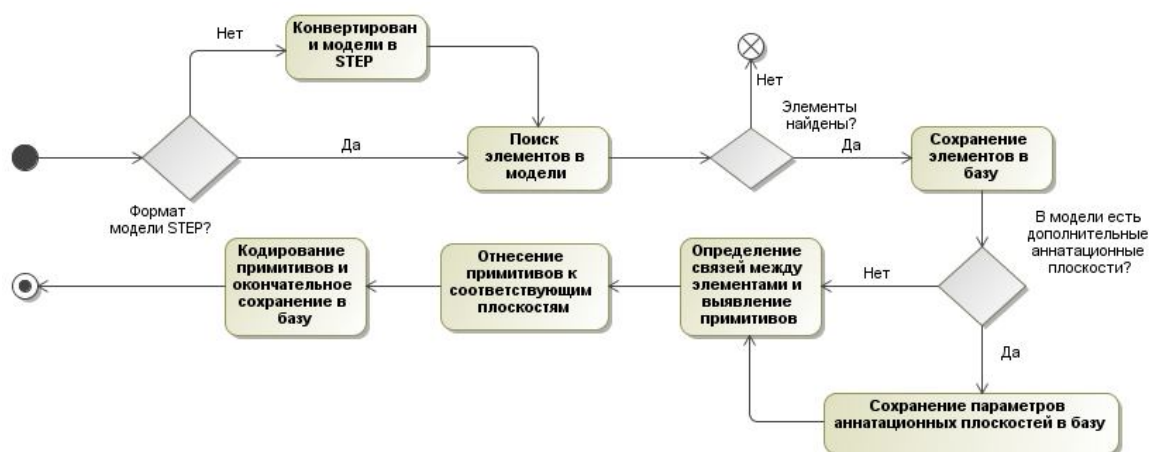


Рисунок 1 – Диаграмма анализа внутренней геометрии на базе формата STEP

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПЛОСКОСТЕЙ В ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Каждый элемент, который извлекается из трехмерной модели изделия, должен быть сопоставлен с другими элементами для определения типа примитива, так как каждому типу соответствует определенный набор элементов. Далее из элементов извлекаются параметры, а также рассчитывается их взаимное расположение. В результате определяются характеристики примитивов. Для дальнейшего анализа следует получить довольно большой объем информации. Так для конусных поверхностей определяются следующие параметры:

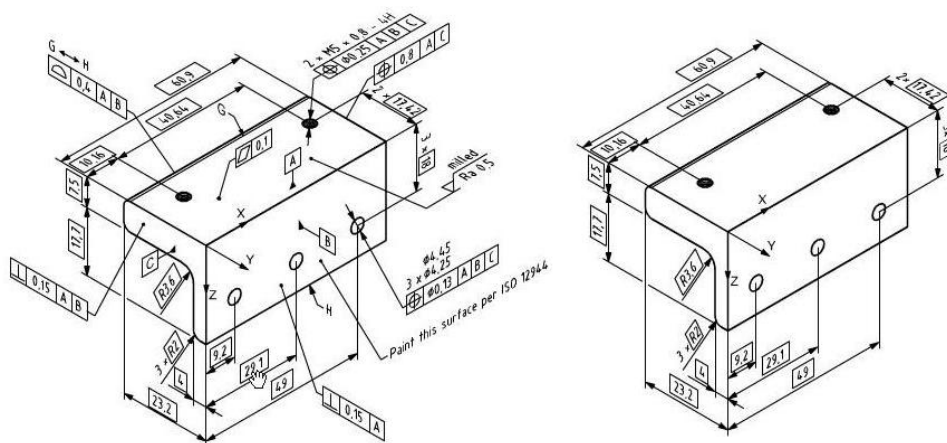
- положение центра первой окружности;
- положение центра второй окружности;
- диаметр первой окружности;
- диаметр второй окружности;
- оси координат первой окружности;
- оси координат второй окружности.

После сравнения данного набора параметров уточняется тип поверхности. Так, если диаметры окружностей совпадают, то примитив относится к цилиндрам. Если при этом прямая, соединяющая центры окружностей, не перпендикулярна поверхности окружностей, то цилиндр является наклонным. Факт принадлежности к тому или иному уточненному типу важен при технологической подготовке методом синтеза на основе геометрии. Для поиска и анализа аналогов или комплексных деталей важен не только сам факт, но и степень принадлежности к определенному типу. В связи с этим выделим для класса “конусные поверхности” следующие атрибуты:

- диаметр “нижнего” основания;
- диаметр “верхнего” основания;
- длина;
- угол наклона конуса;
- угол наклона поверхности;
- положение центра “нижнего” основания;
- положение центра “верхнего” основания;
- плоскость “нижнего” основания;
- плоскость “верхнего” основания.

Аналогично определяются параметры других примитивов. В результате формируется база примитивов по каждой модели. Для упрощения алгоритма сравнения следует разделить модель на отдельные зоны. Трехмерную геометрию логично разбивать на три плоскости в соответствии с направлением осей. В результате большую часть примитивов можно будет сравнивать практически в двумерном пространстве. При этом первичное сравнение трехмерных моделей по плоскостям позволяет отфильтровать большую часть базы изделий и упростить дальнейший анализ. Для множества деталей выделения трех плоскостей недостаточно и требуется использовать вспомогательные элементы для анализа.

В области трехмерного моделирования давно введен стандарт представления чертежной информации напрямую на модели в САД-системе [3]. В связи с глобальной тенденцией к переходу на данный тип представления информации вполне логично использование подобных трехмерных моделей изделий в производстве, а в особенности в ТПП. Такие модели в САД-системах носят название “аннотированные трехмерные модели”. Используя аннотации можно представить на трехмерной модели изделия разнообразную конструкторскую информацию. При этом стандарт регламентирует не только отображение различного рода данных, что позволяет отказаться от использования чертежной документации, но и определяет вспомогательные средства для упрощения работы конструктора и технолога (рисунок 2). Необходимость отображения каждого размера в привязке к конкретному элементу приводит к автоматическому формированию дополнительных плоскостей, в которых и располагаются аннотации.



(а) (б)
Рисунок 2 – Трехмерная модель изделия с набором аннотаций (а) и представление отфильтрованных конструктивных данных (б)

Особенностью представления аннотаций в формате STEP является возможность доступа к так называемым “плоскостям аннотаций”, в которых располагаются размеры или другие выносные элементы. За счет учета таких плоскостей можно выявлять наличие в трехмерной модели изделия элементов, которые требуют анализа вне трех базовых направлений, что позволяет отсеять еще больше неподходящих моделей из базы. Создание подобной системы, анализирующей все типы моделей в автоматическом режиме, невозможно. При текущей организации производства, включающей большое количество служб различного назначения, постановка задачи в виде полной автоматизации поиска аналога была бы излишней. Логичным в таком случае является предположение, что система поиска аналога получает в качестве входных данных не только трехмерную модель изделия, но и вспомогательные сведения, которые может предоставить любой оператор системы без необходимости прибегать к помощи технолога или другого специалиста. Важным типом входных данных является конфигурация модели, которая, с одной стороны, может быть легко визуально определена оператором, а с другой стороны значительно упрощает работу системы. Так человек без особого труда может определить относится ли деталь к типу “уголок” или к типу “вал” по внешнему виду (рис. 3), в то время как системе для этого необходимо выполнить интеллектуальный анализ всех поверхностей, требующий значительного количества времени как на программирование, так и на выполнение.

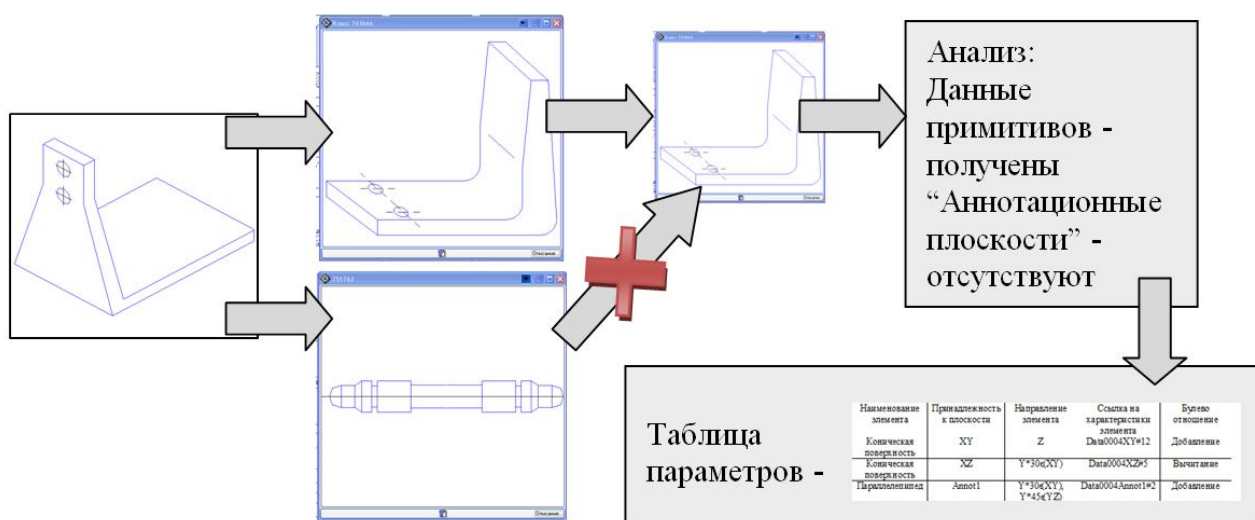


Рисунок 3 – Схема отнесения изделия к определенному типу в ручном режиме с последующим автоматическим анализом геометрии

Разработка системы, позволяющей хранить и представлять трехмерную геометрию, а также отображать закодированные данные об элементах изделия и производить визуализацию всей модели, является достаточно трудоемкой задачей, требующей длительной работы команды программистов. Для решения представленных задач можно использовать два менее трудоемких подхода:

- использование открытых систем или графических библиотек типа OpenCV[4];
- внедрение новых средств, в существующую PDM-систему.

Первый подход требует изучения архитектуры конкретной системы или библиотеки, что определенным образом осложняет основное назначение разработки, которое состоит в поиске аналога. Если рассматривается предприятие или другую организационную структуру, имеющую собственную базу проектов с трехмерными моделями, то наиболее эффективно не разрабатывать систему поиска аналога с нуля, а интегрировать в уже имеющуюся PDM-систему.

ПОИСК ДЕТАЛЕЙ-АНАЛОГОВ НА БАЗЕ PDM-СИСТЕМЫ SMARTTEAM

Система Smarteam обеспечивает организацию взаимодействия заказчиков и исполнителей при обмене геометрической информацией в электронном виде, а также совместное использование заказчиками, предприятием-изготовителем и субподрядчиками информации о выпускаемом продукте, его структуре, составе выполняемого проекта в целом[5].

Используя API-интерфейс Smarteam можно создавать средства обработки данных с различными возможностями. Так модель, загружаемая в систему, может быть представлена в подходящем визуальном виде через средства отображения Smarteam, а также закодирована в соответствии с внутренней структурой на основе внешнего модуля обработки. Таким образом, при добавлении проекта с известной технологией изготовления изделия производится ряд последовательных действий:

- конвертирование исходной модели в формат STEP и обработка анализатором моделей;
- получение результатов анализа и кодирование в соответствии с имеющимися элементами в модели;
- создание привязки таблицы и набора характеристик к проекту изделия.

При этом обработка анализатором включает:

- разбиение модели на наборы плоскостей в соответствии с типом изделия и информацией об имеющихся в модели аннотационных плоскостях;
- определение базы элементов модели и отнесение их к определенному набору.

Аналогичные операции проводятся для уже имеющихся в базе проектов при настройке системы анализа. Пример данных, получающихся по результатам анализа, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример кодирования элементов модели

Наименование элемента	Принадлежность к плоскости	Направление элемента	Ссылка на характеристики элемента	Булево отношение
коническая поверхность	XY	Z	Data0004XY#12	добавление
коническая поверхность	XZ	Y*30°(XY)	Data0004XZ#5	вычитание
параллелепипед	Annot1	Y*30°(XY), Y*45°(YZ)	Data0004Annot1#2	добавление

При добавлении нового проекта по изготовлению изделия производятся следующие действия:

- определение оператором обобщенного типа конструкции и занесение соответствующего кода в паспорт изделия;

- конвертирование исходной модели в формат STEP и обработка анализатором моделей;
- создание привязки таблицы и набора характеристик к проекту изделия.

После определения параметров трехмерной модели проводится сравнение как с изделиями, имеющими подобную конфигурацию, так и с теми, которые не были отнесены к определенному типу. Алгоритм сравнения базируется на принципах изготовления изделий по той или иной технологии и сильно зависит от наличия определенных элементов в модели. Так один и тот же конический элемент, но направленный в разные стороны, может являться критичным для изготовления по одной технологии, но не влиять на технологии другого типа. Определение критериев сравнения элементов при поиске детали-аналога представляет собой нетривиальную задачу, требующую подробного описания, и не рассматривается в данной работе.

ВЫВОДЫ

Существующие подходы к проектированию технологических процессов характеризуются малым использованием трехмерных моделей, что ограничивает возможности автоматизации данного этапа ТПП. Применение трехмерных моделей в полной мере возможно за счет формализации их параметров и определения алгоритмов соответствующей обработки данных. Отчасти формализовать параметры изделия можно за счет использования параметрических моделей. Исследование механизмов создания параметрических моделей в САД-системах продемонстрировало существенные ограничения, накладываемые на данный процесс. Среди них выделяются сложности с унификацией средств параметризации и необходимость перестройки уже существующих моделей. Подход на основе стандартных интерфейсов трехмерных моделей хотя и лишен данных ограничений, но имеет свои нюансы, препятствующие повсеместному внедрению.

Таким образом, требуется не только решение ряда задач методологического характера, но и разработка алгоритмов и программных средств обработки моделей. С методической стороны представлен подход, базирующийся на внутреннем представлении формата STEP [6] и на стандарте отображения конструкторских данных в виде трехмерных аннотаций.

Алгоритмы, представленные в работе, требуют программной реализации и дальнейшего развития. Так для полноценного поиска аналога с последующим заимствованием технологии необходимо определить алгоритмы извлечения данных по каждому виду примитивов и разработать схему сравнения трехмерных моделей между собой. Также предложенные алгоритмы требуется запрограммировать в соответствующих системах или реализовать за счет существующих инструментальных средств. Так как применение той или иной найденной технологии изготовления зависит не только от геометрических свойств изделия, но и от конструкторских данных, то в первую очередь планируется разработать алгоритмы получения соответствующих данных из трехмерных аннотаций. После реализации описанных механизмов можно будет применять предложенный подход на примере реально существующих заказов и имеющихся на предприятиях баз данных.

Решение вопроса параметризации не может быть выполнено в полностью автоматическом виде, но предложенные механизмы при непосредственном участии человека без специализированных знаний открывают большие перспективы для использования трехмерных моделей не только для поиска детали-аналога, но и для автоматизации других сфер ТПП. Так при использовании моделей формата STEP совместно с трехмерными аннотациями открываются многочисленные возможности, включая:

- автоматизация создания управляющих программ для изготовления изделий высокой сложности на оборудовании с ЧПУ;
- автоматическое проведение контроля изделий на измерительных машинах с получением требований непосредственно из моделей;
- автоматический поиск комплексных деталей по трехмерной геометрии исходного изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибовский, А.А. Системная интеграция при моделировании и изготовлении изделий в среде расширенного предприятия [Текст] / А.А. Грибовский // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. - № 3(73). – С. 71-74.
2. Лутц, М. Изучаем Python [Текст] / М. Лутц. – 5-е изд. – Пер. с англ. - СПб.: Символ-Плюс, 2008. - 848 с, ил.
3. ISO 16792-2006 “TECHNICAL PRODUCT DOCUMENTATION. DIGITAL PRODUCT DEFINITION DATA PRACTICES”.
4. Bradski, G. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library / G. Bradski, A. Kaehler. - O'Reilly Media, 2008. – 576 p.
5. Dr. Joel Orr. PDM – ожидания и реальность [Текст] // CAD/CAM/CAE Observer. - 2006. - Выпуск 30. - С. 38-39.
6. ГОСТ Р ИСО 10303-43-2002 ”Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 43. Интегрированные обобщенные ресурсы. Представление структур”

Грибовский Андрей Александрович

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
г. Санкт-Петербург
Аспирант
Тел. 8-950-044-45-49
E-mail: griandrey@yandex.ru

A.A. GRIBOVSKY

AUTOMATE THE SEARCH ANALOG OF DETAILS BASED ON THREE-DIMENSIONAL MODEL

The paper discusses approaches to the design process and analyzes the possibility of obtaining parametric description of three-dimensional models of products. An approach to parameterization based on the formats, interfaces, three-dimensional models and an algorithm based on analysis of existing software. The mechanism of PDM-systems for the analysis and presentation of search results items analogs.

Keywords: *parametric description of three-dimensional models; interfaces; three-dimensional models; the product-analog design process; design elements.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gribovskij, A.A. Sistemnaja integracija pri modelirovanii i izgotovlenii izdelij v srede rasshi-rennogo predpriyatija [Tekst] / A.A. Gribovskij // Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. – 2011. - № 3(73). – S. 71-74.
2. Lutc, M. Izuchaem Python [Tekst] / M. Lutc. – 5-e izd. – Per. s angl. - SPb.: Simvol-Pljus, 2008. - 848 s, il.
3. ISO 16792-2006 “TECHNICAL PRODUCT DOCUMENTATION. DIGITAL PRODUCT DEFINITION DATA PRACTICES”.
4. Bradski, G. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library / G. Bradski, A. Kaehler. - O'Reilly Media, 2008. – 576 p.
5. Dr. Joel Orr. PDM – ozhidaniya i real'nost' [Tekst] // CAD/CAM/CAE Observer. - 2006. - Vypusk 30. - S. 38-39.
6. GOST R ISO 10303-43-2002 ”Sistemy avtomatizacii proizvodstva i ih integracija. Predstavlenie dannyh ob izdelii i obmen jetimi dannymi. Chast' 43. Integrirovannye obobwennye resursy. Predstavlenie struktur”

Gribovskiy Andrey Aleksandrovich

St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg
Post-graduate student
Tel. 8-950-044-45-49
E-mail: griandrey@yandex.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 620.171.

А.М. ИГНАТОВА, А.О. АРТЕМОВ, М.Н. ИГНАТОВ, А.М. ХАНОВ

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СИМИНАЛОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В статье представлены результаты, полученные при изучение процессов деформирования синтетических минеральных сплавов методом регистрации активности акустической эмиссии. Все полученные результаты были сопоставлены с наблюдаемыми в оптический микроскоп структурными изменениями и интерпретированы с точки зрения происходящих изменений в структуре. В результате получено представление о природе структурных процессов предшествующих образованию и развитию трещин в синтетических минеральных сплавах при одноосном сжатие.

Ключевые слова: синтетические минеральные сплавы, акустическая эмиссия, деформация, одноосное сжатие, разрушение анизотропных материалов, трещины

Современное материаловедение стремится к получению материалов с высочайшими показателями механических и физических свойств. Возможность получать такие материалы появилась благодаря современным методам исследования и технологиям синтеза. Современные методы исследования позволяют устанавливать взаимосвязи между структурными параметрами и уровнем механических и физических характеристик материала, а технологии - позволяют контролировать процесс структурообразования и достигать технологических параметров (температуры, дисперсности, давления и т.д.), обеспечивающих благоприятные условия для развития любых фазовых переходов для достижения уровня определенных свойств. Для анизотропных материалов характер, присутствующих в его структуре, фазовых переходов оказывает непосредственное влияние на уровень технологических и эксплуатационных свойств.

Материалом свойства, которого могут варьироваться в широком диапазоне, в зависимости только от структурных параметров являются синтетические минеральные сплавы.

Синтетические минеральные сплавы (симиалы) представляют собой материалы, при синтезе которых может быть достигнуто огромное разнообразие структур, а поскольку структура определяет все свойства материалов, можно утверждать, что сколь, разнообразны структуры симиалов, столь разнообразны и свойства, которые могут быть достигнуты при их синтезе.

Синтетические минеральные сплавы (симиалы) – это группа материалов, получаемых при кристаллизации расплавленных горных пород или отходов различных производств основного и ультраосновного характера, в процессе формирования изделий и последующей их термической обработке. Опираясь на данные полученные исследователями в последние годы, данное определение можно дополнить, тем, что симиалы – это еще и материалы, полученные при релаксационных физико-химических процессах, сопровождающихся остыванием расплава [1].

Структура симиалов представляет собой совокупность кристаллических минерало-оксидных агрегатов, размер которых варьируется в диапазоне от 100 нм до 800 мкм и аморфной стекловатой фазы, в которой предположительно имеются нанокристаллические образования.

Принцип технологии синтеза симиалов, или как ее еще называют технологии каменного литья, заключается в том, что из компонентов подобранных в соответствии с желаемым

результатам (высокая твердость или высокая стойкость к температурам у материала), получают жидкий расплав. Для этого используются электрические и топливные плавильные агрегаты, наиболее удобными считаются электродуговые установки. Полученный расплав заливают в формы, после чего он подвергается термической обработке. В общем виде такая термообработка представляет собой процесс, разделенный на два этапа. Первый этап заключается в выдержке расплава при температуре ниже температуры плавления приблизительно на 300-400°C в течение 2 часов, второй этап подразумевает охлаждение до комнатной температуры со скоростью 20-30°C /ч [2].

На протяжении всего процесса до уровня температуры 500°C структура материала постепенно развивается и изменяется, причем как в твердом так и в жидком состоянии.

В общем случае весь процесс структурообразования можно разбить на четыре этапа: 1 этап – термодинамические изменения гомогенного расплава; 2 этап – расслоение или бинарный распад сплава на две несмешивающиеся жидкости и выпадение кристаллических фаз в «осадок»; 3 этап - монотектическая реакция в жидких фазах; 4 этап - кристаллизация гомогенной кислой жидкости [3].

Благодаря тому, что структура представляет собой анизотропную систему кристаллических и аморфных участков, некоторые свойства симиналов достигают крайне высоких значений. Например, твердость некоторых разновидностей достигает 8 баллов по шкале Мооса, химическая стойкость достигает 98%, а термостойкость порядка 150-200 теплосмен.

В процессе изнашивания абразивными частицами и воздействие на симиналы температурами и агрессивными средами в их структуре практически не происходит изменений, так как практически не наблюдается следов старения или усталости. Однако, при воздействие на них сжимающими нагрузками присутствуют косвенные признаки усталостных разрушений. В среднем величина этого показателя для симиналов составляет от 250 до 300 МПа.

Характером разрушения симиналов под воздействием сжимающей нагрузки свидетельствует о не типичном накоплении напряжений. Очевидно, что характер разрушения, как и величина нагрузки, при которой оно происходит, зависят от структуры симиналов и изменений происходящих в ней под воздействием механической нагрузки. Актуальным является вопрос изучения процесса разрушения и деформации, а так же сопутствующих им изменений в структуре симиналов.

Целью настоящего исследования является изучение структурных процессов происходящих в симиналах в процессе деформации и разрушения под воздействием сжимающей нагрузки методом регистрации акустической эмиссии.

Симиналы, как и любые другие твердые тела состоят из частиц, которые находятся между собой в термодинамическом равновесии, которое может быть как стабильным, так и метастабильным [4]. На практике структура симиналов никогда не достигает полного равновесия, что является ценным качеством, поскольку вероятно при полной релаксации структуры, материал потеряет свои функциональные свойства. Кроме того, из физической химии известно, что система может достигать равновесия в одной части и оставаться неравновесной в другой, ведь релаксационные процессы для атомов межфазных границ и физико-химических систем отличаются друг от друга.

При изменении внешних условий, то есть в нашем случае при механическом воздействии, данное равновесие нарушается, а как известно из основных законов термодинамики любая система стремится к равновесию, реакцией на изменение внешних условий является внутренне перестроение системы для достижения нового состояния условного равновесия.

Зафиксировать структурные изменения, происходящие в процессе приспособления системы к новым внешним условиям можно несколькими различными способами, одним из наиболее чувствительных является метод регистрации акустической эмиссии [5].

Наблюдать же структурные изменения можно, изучая петрографические шлифы образцов, на которых испытания не доводились до разрушения, а останавливались на определенной величине нагрузки [6].

Акустическая эмиссия (АЭ) - излучение упругих волн, возникающее в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел. АЭ проявляется при пластической деформации твердых материалов, при возникновении и развитии в них дефектов, например при образовании трещин, при фазовых превращениях связанных с изменением кристаллической решетки, а так же при резании твердых материалов. Целью контроля АЭ, обычно является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии. Метод АЭ может быть использован также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения эксплуатации или испытаний и предотвращения разрушения изделия. Известно, что АЭ развивается с нарастанием интенсивности и достигает своего максимального значения во время макро разрушения.

В рамках данного исследования, эксперименты по проведению испытаний на сжатие проводился на универсальной испытательной машине (УИМ) марки Zwick – Z250 (Германия).

Все изменения, происходящие в ходе испытания, а так же все входные и выходные значения фиксируются и обрабатываются с помощью универсального программного обеспечения TestXpert, которое входит в комплектацию установки. Регистрация акустической эмиссии осуществляли с помощью акустико – эмиссионного комплекса АЕС – USB – 8.

В качестве объекта исследования выбран симинал полученный на основе горнблендита с добавлением хромитовой руды, данная разновидность симинала наиболее востребована в промышленности.

Данные полученные о структуре симиналов свидетельствуют о том, что соотношение кристаллической и аморфной составляющей не постоянно и в разных частях изделия является различным. По аналогии с горными породами известно, что значительную роль при деформирование в подобных системах играет аморфная прослойка. Как правило, соотношение кристаллической фазы к аморфной в износостойких симиналах составляет 93 на 7%.

Механические испытания для определения прочности на сжатие износостойких симиналов были проведены на трех образцах. При испытание нагрузка плавно нарастала в течение 183-227 сек. с нулевого значения до 25 кН.

Воздействие на первый образец длилось порядка 196 сек., нагрузка изменялась от 0 до 23,9 кН (рис. 1). При этом было зафиксировано четыре достаточно ярко выраженных всплесков акустической активности (рис. 2).

Первый всплеск зафиксировано на уровне 5 мВ в самом начале испытания на 75 секунде испытания, этому всплеску предшествовало весьма плавное нарастание нагрузки, после быстрое затухание активности. На данном этапе в структуре наблюдались первые изменения (рис. 3), а именно начались первые реорганизационные процессы. Более плотные структурные составляющие консолидировались, образуя различные ровные полосы, до испытаний они были так же весьма близко друг к другу, но четкого вытягивания вдоль линии не наблюдалось, на периферию этих полос вытесняются более волокнистые составляющие, имеющие перистую расщепленную форму.

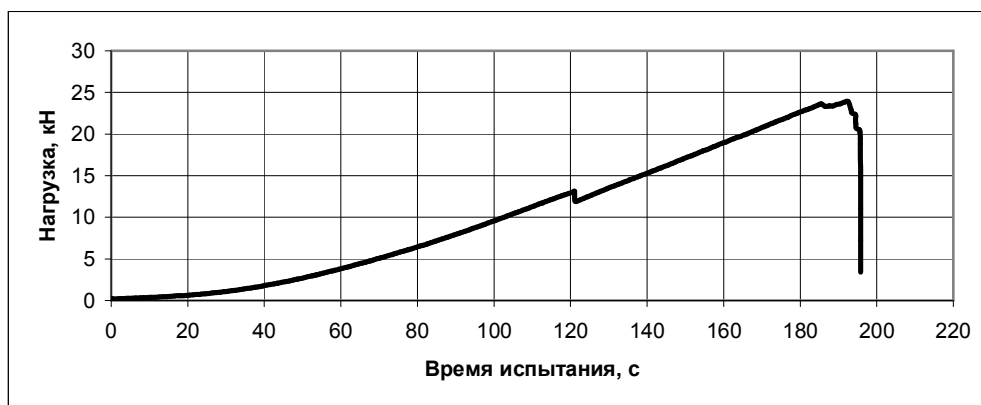


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости действующей нагрузки от времени при проведение испытаний износостойкого симинала образец №1

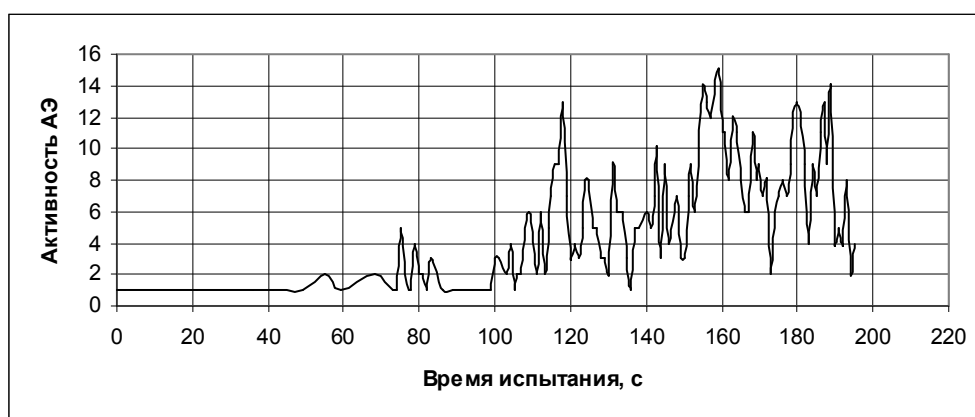


Рисунок 2 – Диаграмма акустической эмиссии во время испытания износостойкого сминала образец № 1

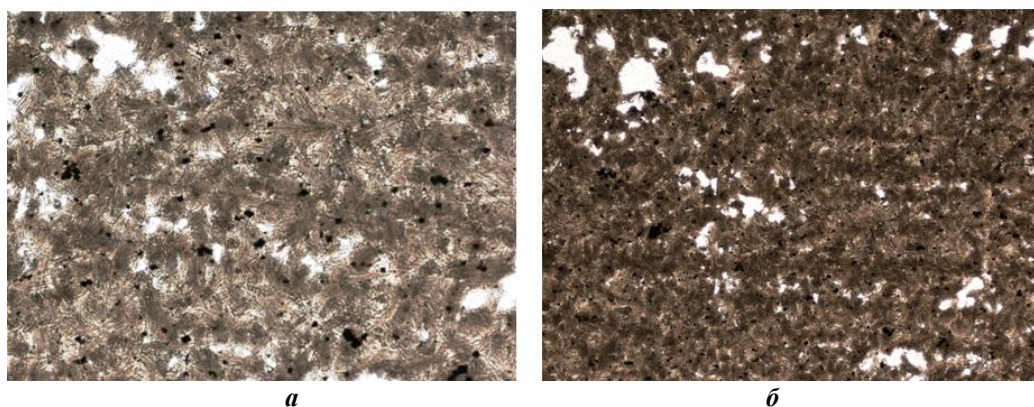


Рисунок 3 – Структура износостойкого сминала зафиксированная на 75 сек. испытания а - $\times 100$, б - $\times 50$

Второй всплеск равный 13 мВ зафиксирован на 119 с, ему предшествовало быстрое нарастание колебаний примерно в течение 15с, а после зафиксировано более плавное затухание длившееся около 20 с.

Затухающие колебания после второго всплеска плавно перешли в нарастающие, которые в течение так же 20 с предшествовали очередному скачку активности равному 16 мВ, зафиксированному на 160 с.

Активность в 16 мВ является максимальной для первого образца, за ней последовало резкое в течение 10 с снижение активности, а затем два резких скачка равных 14 мВ, которые и предшествовали разрушению образца.

Воздействие на второй образец длилось порядка 226,5 сек., нагрузка изменялась от 0 до 17,3 кН (рис. 4). При этом было зафиксировано три выраженных всплесков акустической активности (рис. 5). В отличие от первого образца обнаружено несколько незначительных отклонений на кривой характеризующей рост нагрузки с течением времени, так же отличительной особенностью является менее контрастный общий фон акустической активности.

Первый пик активности зафиксирован на уровне 15 мВ на 50 с испытания, ему предшествовало незначительное и резкое возрастание нагрузки, затем последовало длительное 30 с затухание.

Плавное затухание перешло в еще более плавное нарастание длительностью 50 с, в результате которого на 140 с испытания произошел скачек до 22 мВ. После скачка было весьма короткое затухание, которое через 10 с перешло в нарастание.

Зафиксированная на данном этапе структура характерна наличием первых трещин, микронного размера, в «волоконистых» структурных составляющих (рис. 6).

Через 25 секунд без скачка нарастание прекратилось, ровный фон активности сохранился до скачка на 190 с до 20 мВ, после чего активность выровнялась и оставалась постоянной вплоть до разрушения образца.

Воздействие на третий образец длилось порядка 183,7 сек., нагрузка изменялась от 0 до 19 кН (рис. 7). При этом было зафиксировано пять выраженных всплесков акустической активности (рис. 8). В отличие от первого и второго образцов обнаружено значительно, более плавное изменение акустической активности.

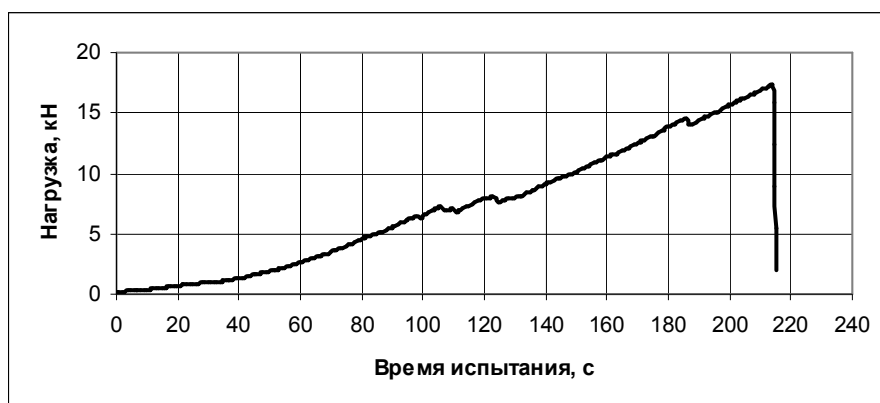


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости действующей нагрузки от времени при проведении испытаний износостойкого симинала образец №2



Рисунок 5 – Диаграмма акустической эмиссии во время испытания износостойкого симинала образец №2

Первый всплеск зафиксирован на уровне 8 мВ на 40 с испытания, характерная особенность, что данному всплеску не сопутствовало никакого нарастания, зато затухание после него было весьма длительным 20 с.

После затухания перешло в не менее плавное нарастание в течение 20 с до 18 мВ на 80 с испытания, затухание было менее плавным в течение 10 с после последовал провал активности перешедший в достаточно резкое нарастание завершившееся скачком до 16 мВ на 105 с, после скачка последовало резкое затухание в течение 15 с, перешедшее в плавное нарастание в течение 20 с.

Плавное нарастание было предвестником резкого всплеска до 17 мВ на 130 с, после которого последовали колебания на приблизительно одинаковом уровне до образования не ярко выраженных пиков полого до 13 мВ и резкого до 14 мВ. Структура характерная для нагрузок на данных пиках представлена на рисунке 9.

Границы распределения составляющих исказились и превратились в трещины, размер агрегатов заметно уменьшился (рис. 9,а), траектория образующихся сдвигов и складок повторяют траекторию трещин на разрушившихся образцах (рис. 9,б).

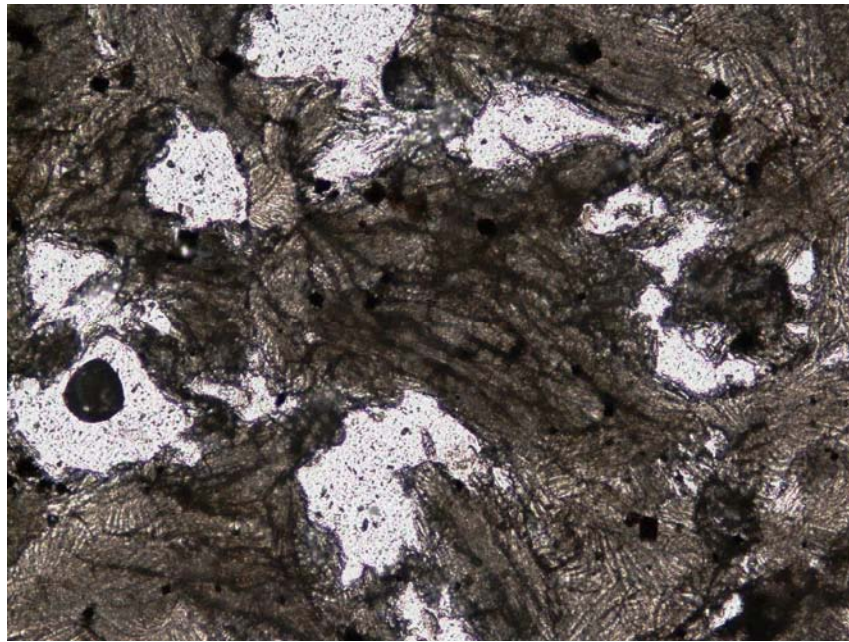


Рисунок 6 – Структура износостойкого симинала зафиксированная на 140 сек. Испытания, x200



Рисунок 7 – Диаграмма зависимости действующей нагрузки от времени при проведение испытаний износостойкого симинала образец №3

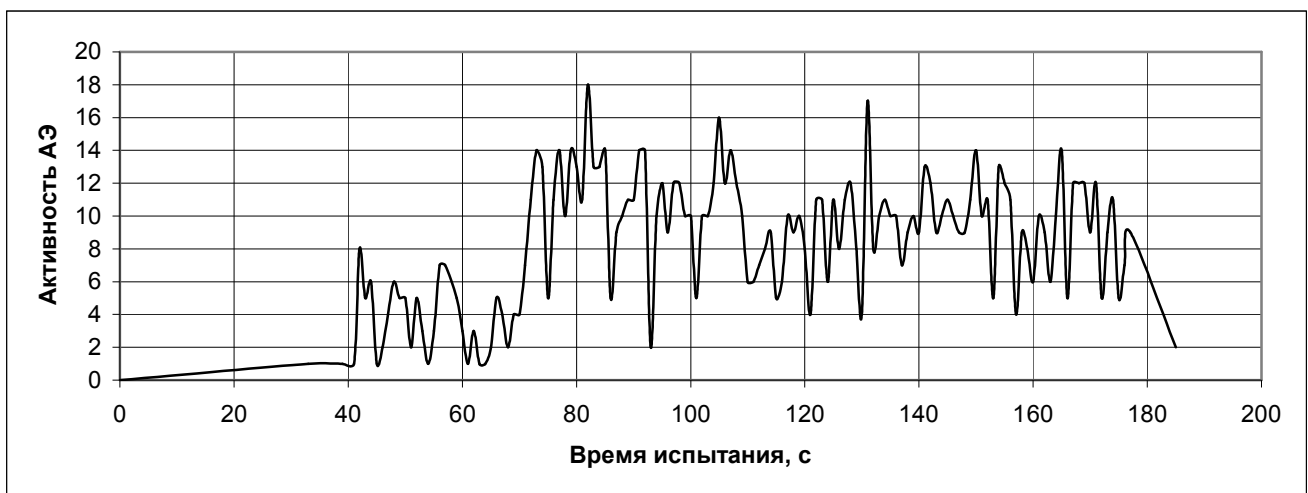


Рисунок 8 – Диаграмма акустической эмиссии во время испытания износостойкого симинала образец № 3

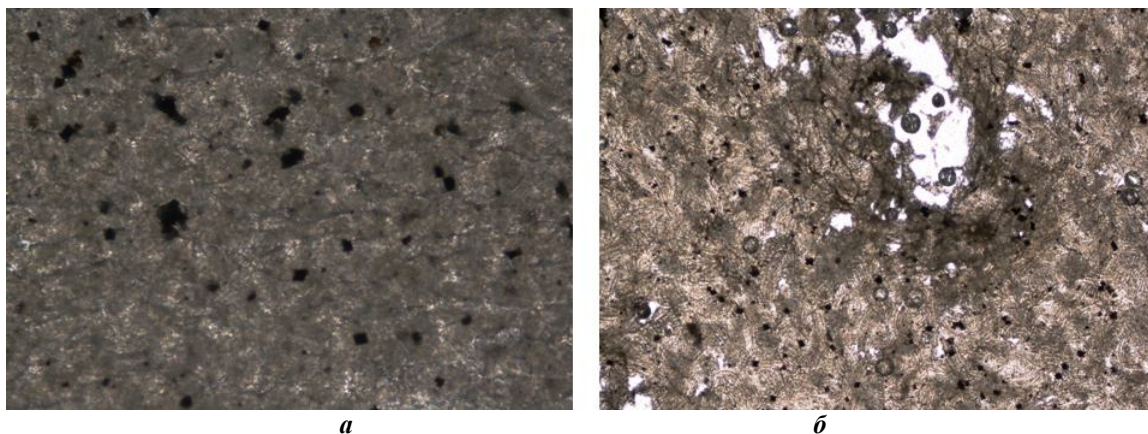


Рисунок 9 – Структура износостойкого симинала зафиксированная на 130 сек. Испытания, соответствующие скачкам активности акустической эмиссии: а – $\times 200$, б – $\times 100$

Суммарно данные по испытанию износостойкого симинала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по регистрации акустической эмиссии образцов износостойкого симинала при одноосном сжатие

№Образца	F_{\max} , кН	σ_m , МПа	ϵ_m , %	S_0 , мм ²	$t_{\text{исп}}$, с	$V_{\text{исп}}$, мм/мин
1 а	23,9	324,7	2,91	73,6	196	0,2
1 б	17,3	224,72	3,59	76,98	226,5	
1 в	19	234,6	2,9	80,99	183,7	
Среднее значение	20,6	261,3	3,13	77,19	202	

В результате проведенных испытаний выделено четыре типа активности акустической эмиссии характерной для симидалов:

- пики, зафиксированные без предшествующего нарастания и последующего затухания активности;
- пики, которым предшествует нарастание приблизительно равное последующему затуханию;
- пики, образованию которых предшествует достаточно длительное нарастание активности, но после их образования наблюдается резкое, «провальное» снижение активности;
- пики, образованию которых не предшествует какое либо характерное изменение активности, зато после следует длительное затухание.

Сами пики могут быть пологими, резкими, или двойными.

Мы предполагаем, что различным типам пиков предшествуют различные структурные преобразования, а различный характер самих пиков говорит о характере этих преобразований [7,8].

Согласно общим представлениям известно [4], что процесс деформации в материалах подробных симиналах (горных породах) обусловлен перемещением дислокаций, как правило, в результате деформирования дислокации не возникают. В деформации учувствуют те дислокации, которые присутствовали в структуре до нагружения. Однако, в процессе деформации, вакансии вполне, могут частично, перейти в дислокации, а значит, число их может быть увеличено. По характеру пиков можно судить, что в структуре постоянно происходит нарастание напряжения и его разгрузка. Пики характерны тем моментам когда релаксация не происходит без изменения структуры, для того чтобы напряжение компенсировалось, происходит сдвиг [9].

В момент нагружения под действием нагрузки σ_0 кристалл сжимается (рис. 10), на величину ϵ_0 , какое то время эта величина при релаксации остается неизменной, но в опреде-

ленный момент дислокации приходят в движение, и происходит сдвиг ΔS , разрушающее воздействие которого компенсируется упругим растяжением, когда упругие переходят в пластические возникает трещина, то есть трещина, по сути, расползание кристалла, причем судя по полученным нами изображениям, такой ползучести подвержены именно волокнистые перистые составляющие в симиналах.

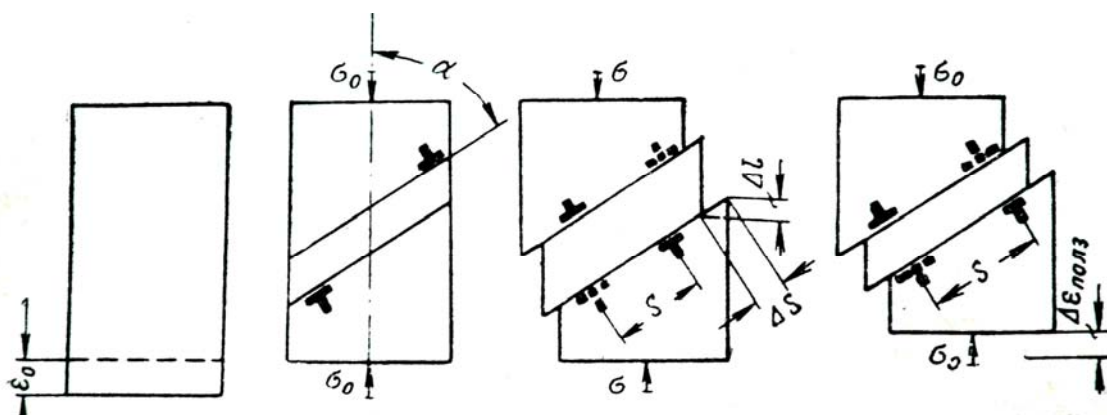


Рисунок 10 – схема иллюстрирующая характер разрушения в кристаллах

Согласно нашим представлениям пики первого типа, которые встречаются достаточно редко, могут характеризовать процесс, который одновременно влияет на обе разновидности структурных составляющих симиналов (кристаллические и аморфные), вероятнее всего это перемещение тех дефектов, которые расположены на границах этих составляющих. Вероятно, происходит своего рода уплотнение структуры образцов за счет имеющихся вакансий на пограничных зонах.

Известно [3], структура симиналов, анизотропная, причем кристаллические составляющие составляют большую часть всего объема, учитывая неравномерный теплоотвод от расплава в процессе изготовления материала, можно предположить, что в определенных участках структура симиналов полностью состоит из кристаллических минералов. Вероятно, пики второго типа характерны для процессов происходящих именно в таких зонах образцов. Они описывают процессы внутренней диффузии ионов между зернами минералов, вероятно в этой диффузии участвуют преимущественно мостиковые ионы, которые соединяют между собой кремнекислородные тетраэдры, которые в свою очередь являются основной структурной единицей симиналов. Перемещение мостиковых ионов может приводить как к изоморфному замещению, так и к простым полиморфным преобразованиям, вызванным поворотами кремнекислородных тетраэдров относительно друг друга [10].

Длительное нарастание активности, характерное для пиков третьего типа, и длительное затухание, характерное для пиков четвертого типа, в обоих случаях, вероятно, говорит о плавном изменении какого либо параметра в системе, которое длится до определенного предела, по достижению которого и происходит резкое изменение, приводящее к скачку активности акустической эмиссии. Иными словами пики третьего и четвертого типов описывают релаксационные явления в структуре. Просто пики третьего типа описывают релаксационные явления в аморфных составляющих, а четвертого типа в кристаллических.

В чем же разница между этими процессами?

Вероятнее всего пики третьего типа описывают процесс, при котором в основном чувствует аморфная составляющая, в ней в силу неупорядоченности под воздействием нагрузки не происходит резких изменений, как например поворот тетраэдра. Вероятно, отдельные ионы и нуклеации начинают плавно перемещаются без разрыва химических связей, постепенно консолидируются, в результате между ними связи начинают возникать, а дальнейшая нагрузка приводит к разрыву этих связей, на месте этих разрыв образуются трещины, их зарождение и фиксируют пики активности акустической эмиссии. В рамках своего исследования мы не исключаем, в определенный момент времени на доли секунды перед образованием трещин, аморфная составляющая переходят к упорядоченному состоянию.

Пики четвертого типа могут описывать процесс, начинающийся с резкого изменения внутри участков структуры имеющих составляющие кристаллического и аморфного характера. Образующийся пик, вызван тем, что составляющие резко меняют объем, причем каждая на неодинаковую величину. В кристаллической, объем резко уменьшается, так как происходит поворот тетраэдров, а в аморфной наоборот объем практически не изменяется, а может даже и увеличивается за счет освобождающегося пространства образующегося за счет уменьшения объема кристаллических составляющих. Затем под воздействием нагрузки происходит неравномерное движение кристаллических, аморфных составляющих и дефектов структуры относительно друг друга с разной скоростью. Данный тип пиков встречается значительно чаще, чем пики всех остальных видов. Они характеризуют этап постепенного внутреннего трения в симиналах, которое сопровождается одновременным развитием микротрещин по всему объему материала, вызванного одновременно как изменением объема кристаллических составляющих, так и разрывам связи между ними и аморфными составляющими и разрывам связей постепенно нарастающими внутри аморфных, но постепенно упорядочивающихся составляющих.

Пологие пики отличаются более длительным периодом происходящих изменений, более резкие соответственно напротив, характеризуют процессы протекающие быстро. Явление двойных пиков видимо свидетельствует о наложении одних процессов на другие.

Перенос теоретические выкладки на макроскопические разрушения в образцах можно сформулировать следующее видение. После начала разрыхления увеличение давления в плотной части материала приводит к росту эффективной прочности и величины предельной деформации до начала разупрочнения, а расстояние между полосами локализации при этом возрастает с соответствующим увеличением в них деформации. Таким образом, при значительном увеличении давления можно ожидать, что локализация деформации и разрушение произойдет при более интенсивном воздействии, при этом будут формироваться более крупные осколки материала. Схема разрушения симиналов представлена на рисунке 11.

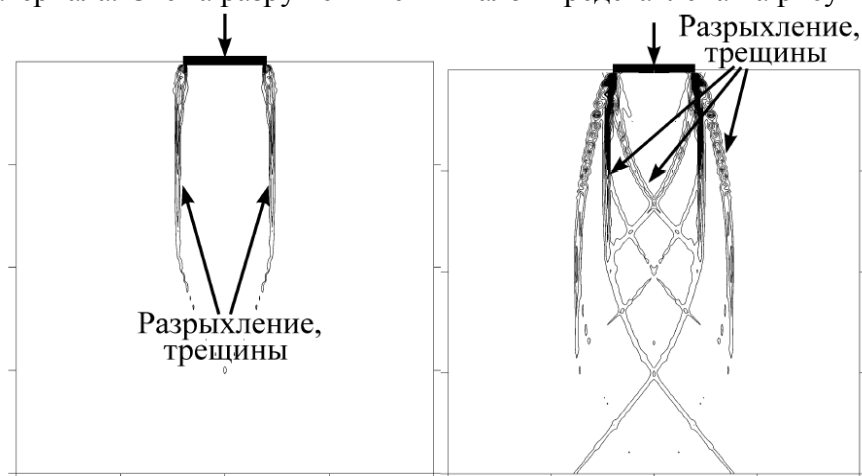


Рисунок 11 – Изучение процессов деформации и разрушения камнелитых материалов на основе симиналов в условиях одноосного сжатия

Таким образом, с помощью метода регистрации акустической эмиссии и изучения структуры образцов симиналов при различных доразрушающих значениях сжимающей нагрузки, установлен характер структурных процессов предшествующих образованию и развитию трещин. Трещины вызваны сдвиговыми деформациями кристаллов, наиболее подвержены таким деформациям волокнистые кристаллы в симиналах. В аморфной матрице происходит постепенное упорядочивание и так же последующее деформирование, вызванное пластическими деформациями кристаллов. С помощью теоретического обоснования полученные результаты были интерпретированы на макроскопический уровень разрушений, который характеризуется лавинообразным ростом многочисленных трещин на периферии приложения нагрузки, так как на периферии растягивающие деформации не компенсируют воздействие сжимающих, а сердцевина по обратным причинам остается не разрушаемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушаровский, Д.Ю. Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов / Д.Ю. Пушаровский. – М.: 1986. – 450 с.
2. Игнатова, А.М. Технология переработки ультраосновных магматических горных пород / А.М. Игнатова, М.М. Каминский, В.Л. Попов // Геология, поиски и комплексная оценка твердых полезных ископаемых: сб. трудов II НПК молодых ученых и специалистов. – Москва: ВИМС, 2009. – с.46.
3. Игнатова, А.М. Кристаллизационно-ликвационная модель-схема формирования стеклокристаллических материалов каменного литья / А.М. Игнатова, В.П. Чернов, А.М. Ханов // АНТЭ-09: материалы V-ой Всероссийской НТК – Казань, 2009. – С. 235-237.
4. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел. // Докл. АН СССР, 1988, т.300 – с.1090-1094.
5. Игнатова, А.М. Методика и оборудование определение предела механической прочности на сжатие литых образцов синтетических минеральных сплавов / А.М. Игнатова, А.Ф. Мерзляков, А.М. Ханов // «Вестник Пермского государственного технического университета «Машиностроение. Материаловедение». – 2010. – №3. – т.12. – С.126-134.
6. Саранчина, Г.М. Петрография магматических и метаморфических пород / Г.М. Саранчина, Н.Ф. Шинкарев. – М.: Недра, 1967.
7. Грешников, В.А. Акустическая эмиссия / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. – М.: изд-во Стандартов, 1976.
8. Смирнов, А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах / А.Н. Смирнов // Росс.хим.ж. – 2001. – т. 45. – С.29-34.
9. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н.Марьян и др. Под общей ред. Н.А.Семашко. – М.: Машиностроение. – 2002. – 240 с.
10. Игнатова, А.М. Исследование структуры и свойств камнелитых материалов методом наноиндентирования / А.М. Игнатова, А.М. Ханов, А.П. Скачков // «Вестник Пермского государственного технического университета «Машиностроение. Материаловедение». – 2010. – №1. – т.12. – С. 139-150.

Игнатова Анна Михайловна

Пермский государственный технический университет
аспирант, ассистент
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Кирова 126 А-23
8(922) 513 78 79
E-mail: Ignatovaanna2007@rambler.ru

Артемов Арсений Олегович

Пермский государственный технический университет
аспирант, ассистент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов»
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, корпус А, к. 120
8 (342) 2-198-371
E-mail: artemoff87@mail.ru

Игнатов Михаил Николаевич

Пермский государственный технический университет
Д-р техн. наук, проф. кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов»
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, корпус А, к. 120
8 (342) 2-198-371
E-mail: Ignatovaanna2007@rambler.ru

Ханов Алмаз Муллаянович

Пермский государственный технический университет
Д-р техн. наук, проф.
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, корпус А, к. 208
8 (342) 2-198-023
E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru

A.M. IGNATOV, A.O. ARTYOMOV, M.N. IGNATOV, A.M. KHANS

**STUDYING OF STRUCTURAL CHANGES SYNTHETIC MINERAL ALLOY
AT DEFORMATION AND DESTRUCTION BY THE METHOD
ACOUSTIC ISSUE**

The article presents the results obtained in the study of processes of deformation of synthetic mineral alloys by recording the activity of acoustic emission. All results were compared with those observed in the optical microscope and structural changes are interpreted in terms of the changes in the structure. As a result, a representation of the nature of structural processes prior to the formation and development of cracks in the synthetic mineral alloys under uniaxial compression.

Keywords: *synthetic mineral alloys, acoustic emission, strain, uniaxial compression, failure of anisotropic materials, cracks.*

BIBLIOGRAPHY

1. Puwarovskij, D.Ju. Strukturnaja mineralogija silikatov i ih sinteticheskikh analogov / D.Ju. Puwa-rovskij. – M.: 1986. – 450 s.
2. Ignatova, A.M. Tehnologija pererabotki ul'traosnovnyh magmaticheskikh gornyh porod / A.M. Ignatova, M.M. Kaminskij, V.L. Popov // Geologija, poiski i kompleksnaja ocenka tverdyh poleznyh iskopaemyh: sb. trudov II NPK molodyh uchenykh i specialistov. – Moskva: VIMS, 2009. – s.46.
3. Ignatova, A.M. Kristallizacionno-likvacionnaja model'-shema formirovanija steklokristalliche-skih materialov kamennogo lit'ja / A.M. Ignatova, V.P. Chernov, A.M. Hanov // ANTJe-09: materialy V-oj Vse-rossijskoj NTK – Kazan', 2009. – S. 235-237.
4. Shemjakin E.I. O svobodnom razrushenii tverdyh tel. // Dokl. AN SSSR, 1988, t.300 – s.1090-1094.
5. Ignatova, A.M. Metodika i oborudovanie opredelenie predela mehanicheskoj prochnosti na szhatie lityh obrazcov sinteticheskikh mineral'nyh splavov / A.M. Ignatova, A.F. Merzljakov, A.M. Hanov // «Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta «Mashinostroenie. Materialovedenie». – 2010. – №3. – t.12. – S.126-134.
6. Saranchina, G.M. Petrografija magmaticheskikh i metamorficheskikh porod / G.M. Saranchina, N.F. Shinkarev. – M.: Nedra, 1967.
7. Greshnikov, V.A. Akusticheskaja jemissija / V.A. Greshnikov, Ju.B. Drobot. – M.: izd-vo Standartov, 1976.
8. Smirnov, A.N. Generacija akusticheskikh kolebanij v himicheskikh reakcijah i fiziko-himicheskikh processah / A.N. Smirnov // Ross.him.zh. – 2001. – t. 45. – S.29-34.
9. Akusticheskaja jemissija v jeksperimental'nom materialovedenii / N.A. Semashko, V.I. Shport, B.N.Mar'in i dr. Pod obwej red. N.A.Semashko. – M.: Mashinostroenie. – 2002. – 240 s.
10. Ignatova, A.M. Issledovanie struktury i svojstv kamnelityh materialov metodom nanoindentirovanija / A.M. Ignatova, A.M. Hanov, A.P. Ckachkov // «Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta «Mashinostroenie. Materialovedenie». – 2010. – №1. – t.12. – S. 139-150.

Ignatova Anna Mikhailovna

Perm State Technical University
graduate student, assistant
Russia, 614000, Perm, st. Kirova 126 A-23
8 (922) 513 78 79
E-mail: Ignatovaanna2007@rambler.ru

Artemov Arseny Olegovich

Perm State Technical University
graduate student, assistant Chairs «Welding technology and construction materials»
614990, Perm, Komsomol prospect, 29, building A, room 120
8 (342) 2-198-371
E-mail: artemoff87@mail.ru

Ignatov Mihail Nickolaevich

Perm State Technical University
Ph.D., professor Chairs «Welding technology and construction materials»
614990, Perm, Komsomol prospect, 29, building A, room 120
8 (342) 2-198-371
E-mail: Ignatovaanna2007@rambler.ru

Chanov Almaz Mullaynovich

Perm State Technical University
Ph.D., professor
614990, Perm, Komsomol prospect, 29, building A, room 208
8 (342) 2-198-023
E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru

С.Н. ХИМУХИН, М.А. ТЕСЛИНА, И.А. АСТАПОВ, В.В. ГОСТИЩЕВ

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ОТЛИВОК ПРИ ВНЕШНЕЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА АЛ9

Исследовано влияние вибрационной обработки расплава АЛ9 при затвердевании от различных исходных температур на качество поверхности отливок, твердость и структуру металла. Предложены механизмы образования дефектов на поверхности отливок, установлено влияние температуры расплава на доминирующее формирование дефектов определенного типа. Вибрационная обработка способствует измельчению и более равномерному распределению структурных составляющих в отливке.

Ключевые слова: поверхностные дефекты отливок, вибрационная обработка, размер зерен, длина осей дендритов, распределение твердости.

ВВЕДЕНИЕ

Качество поверхности отливок является одной из важных характеристик при их производстве. Использование внешней обработки металлического расплава при затвердевании позволяет повысить механические свойства отливок за счет увеличения однородности и измельчения структуры металла. Широко применяемые в практике физические методы воздействия на расплавы [1] в зависимости от вида энергоносителя можно разделить на следующие группы: тепловые, барометрические, гравитационные, механические, электромагнитные, высокоэнергетические (корпускулярные). К электромагнитной группе относится новый метод обработки металлических расплавов с воздействием на них наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) [2].

В предварительном эксперименте для обработки расплава использовали НЭМИ, но существенного влияния на формирование поверхностных дефектов отливок и размеры зерен не выявлено. По нашему мнению в качестве основных причин можно выделить две. Первая заключается в недостаточной продолжительности обработки сплава, находящегося в жидком состоянии. Время затвердевания образцов в данном эксперименте во всех партиях составляло 4 минуты. Второй причиной является схема расположения электродов. Облучение НЭМИ проводили, располагая электроды непосредственно рядом с тиглем. Использовать традиционную схему, при которой электроды погружают непосредственно в расплав, не представляется возможным, так как происходит их схватывание и возникает дополнительная проблема их последующего отделения от отливки.

Основные эксперименты проходили с применением вибрационной обработки кристаллизующегося расплава, т.е. методом, который наиболее широко применяется в условиях промышленного производства

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Металл для отливок выплавлялся в индукционной печи, заготовки одинаковой массы (170 г) сплава АЛ9 помещали в цилиндрические алундовые тигли, имитируя отливку простой формы с отношением основания к высоте $\frac{1}{2}$. Металл в тигле нагревали до температуры 750° С, затем выдерживали 5 минут. После выдержки тигли с расплавом охлаждали до различных температур (750, 700, 660 и 610° С). При этих температурах тигли попарно извлекали из муфельной печи, один из них подвергался обработке, а другой охлаждался без обработки. Обработка вибрацией проводилась до полного затвердевания металла в тигле.

Исследование поверхности отливок проводили с использованием микроскопа МБС 10 в условиях естественного освещения. Для изучения структуры и свойств металла отливок, из их нижней части в поперечном сечении вырезались цилиндрические образцы толщиной 0,01 м. Микроструктура изучалась после полировки и травления поверхности шлифов стандартным реактивом на микроскопе MICRO 200. Оценивался размер зерен и их однородность,

длина оси первого порядка дендрита, размер и морфология кремниевой эвтектики, кремниевых частиц. Оценка размеров неравноосного зерна проводилась в соответствии с ГОСТ 21073.3–75, определялся средний условный размер зерна, минимальный и максимальный условные размеры зерна на шлифе и среднее квадратическое отклонение (СКО) единичных измерений условного размера зерна из множества измерений. Твердость измеряли на шлифах методом Бринеля. Вибрационная обработка осуществлялась на модернизированном электромагнитном вибронном столике. В предварительных экспериментах была подобрана оптимальная частота колебания (50 Гц) и амплитуда вибрации столика ($5 \cdot 10^{-4}$ м) для максимального измельчения зерен сплава АЛ9, что согласуется с результатом других исследований [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхность отливок, не обработанных вибрацией, гладкая, без заметных выступов и дефектов (рис. 1, а). На поверхности отливок, обработанных вибрацией, обнаруживаются выступы в виде отдельных частиц округлой формы различного диаметра и поперечные складки (рис. 1, б). Размеры выступов возрастают по мере увеличения расстояния от основания отливки к ее верхней части. Такой вид дефекта преобладает в случае обработки с температур 750 и 700° С. При более низких температурах увеличивается количество дефектов в виде складок, а локальные дефекты (до 2 мм) в виде выступов имеют остrokонечную форму (рис. 1, в), в верхней части которых, как правило, находится газовая пора.

Для установления механизма образования дефектов на поверхности отливок провели металлографический и элементный анализ металла шлифов, изготовленных из поперечного сечения дефектов. Микроструктура дефектов округлой формы состоит из равноосных зерен α -твердого раствора с кристаллами кремния по границам (рис. 1, г). Химическим анализом металла этого дефекта обнаружено высокое содержание в нем примесей Si (от 15 до 32% мас.) и Fe (от 0,4 до 1,2% мас.). Металлографический анализ металла дефектов в виде поперечных складок (рис. 1, б) показал, что его микроструктура не отличается от микроструктуры основы. Проведенным химическим анализом металла складок доказана идентичность его состава, составу основы.

Анализируя полученные результаты можно предложить механизмы образования дефектов на поверхности отливок, полученных с использованием вибрационной обработки следующим образом. В процессе вибрации расплава в интервале температур ликвидус-солидус сформированная на поверхности слитка корочка совершает волнообразные колебания [4]. В процессе охлаждения увеличение толщины корочки на различных участках не одинаково, что вызывает в месте локального перепада толщин ее деформацию и прорыв металла, обогащенного примесями, на поверхность отливки в виде частиц округлой формы. При вибрации металла с более низких температур, дефекты в виде частиц округлой формы также присутствуют, что свидетельствует о прохождении тех же стадий в формировании корочки на отливке, что и в экспериментах при охлаждении от более высоких температур. Однако, в этом случае преобладающее количество дефектов в виде складок, объясняется более высокой скоростью увеличения толщины корочки и более высокой прочностью. При этом наблюдается некоторое «сползание» корочки, что объясняет большую высоту складок при этих температурах.

Как следует из металлографического анализа, вибрация существенно измельчает размер зерен по сравнению с микроструктурой образцов, которые не подвергались обработке (рис. 2, а). Однако, измельчение не наблюдается при температуре 610° С, что объясняется недостаточным количеством жидкой фазы (в соответствии с диаграммой состояния количество жидкой фазы при этой температуре менее 68%) [5]. Подсчет размеров зерен в образцах показал, что наибольшее влияние на измельчение (в 4,1 раза) оказывает вибрация при температуре 660° С.

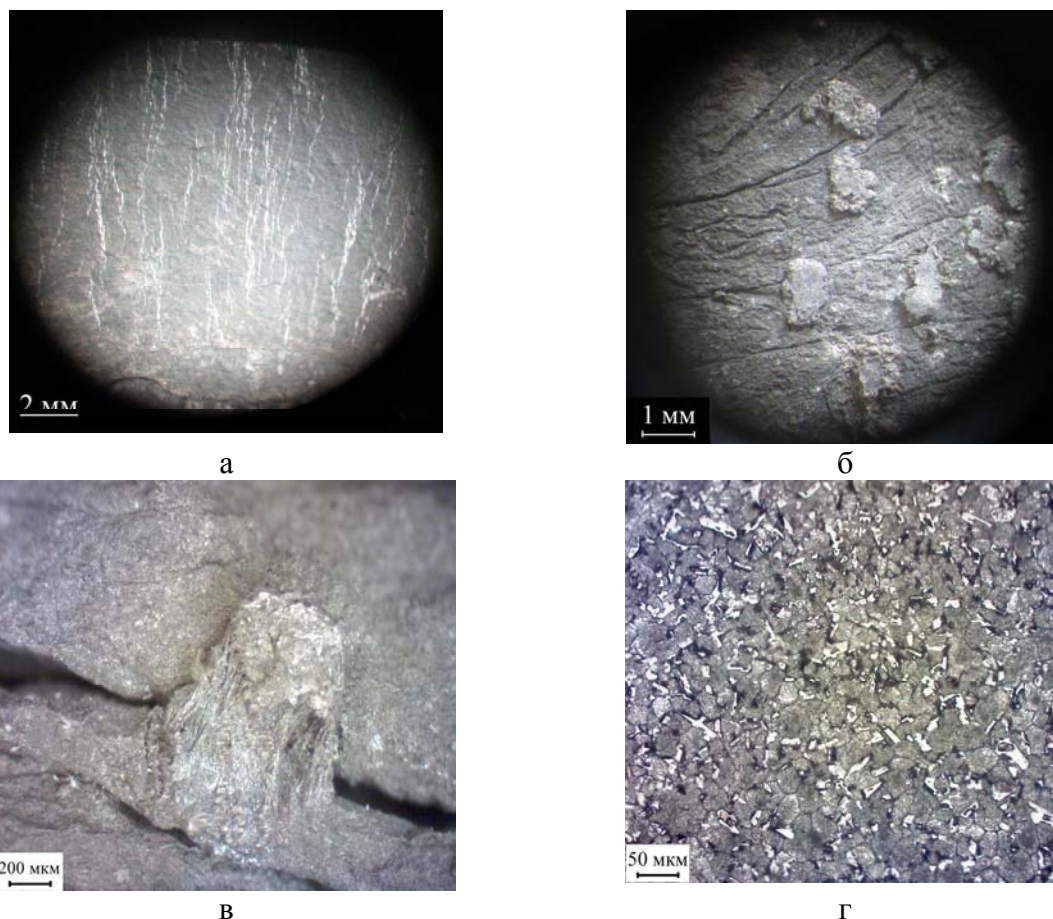


Рисунок 1 – Вид поверхности образцов

*а – без обработки; б – округлые частицы и поперечные складки;
в – локальный дефект в виде выступа; г – микроструктура металла дефектов округлой формы*

В структуре всех полученных образцов измерялась длина оси первого порядка дендритов (рис. 2, б). Как и следовало ожидать, измельчение зерен при вибрации сопровождается уменьшением длины оси первого порядка дендритов. Отличительной особенностью большинства зерен в образцах после обработки вибрацией является то, что они состоят из одного дендрита с осью первого и второго порядков.

Исследование изменения твердости проводили вдоль диаметра поперечных шлифов отливок, при этом установлено, что образцы после вибрационной обработки имеют более высокую твердость в центральной зоне (рис. 3), что в итоге приводит к более равномерному распределению твердости по сечению отливок.

Большая часть отливок в центральной зоне обычно поражена пористостью, которая снижает твердость. В обработанных отливках поры значительно меньших размеров и распределены более равномерно. Этот факт объясняет увеличение твердости в центральной зоне отливок после вибрационной обработки.

Таким образом, при проведении вибрационной обработки необходимо учитывать температуру нагрева расплава, что позволит влиять на тип формирующегося дефекта на поверхности отливки. Обработка при оптимальной температуре нагрева расплава повышает однородность распределения твердости и уменьшает размер структурных составляющих в металле отливки.

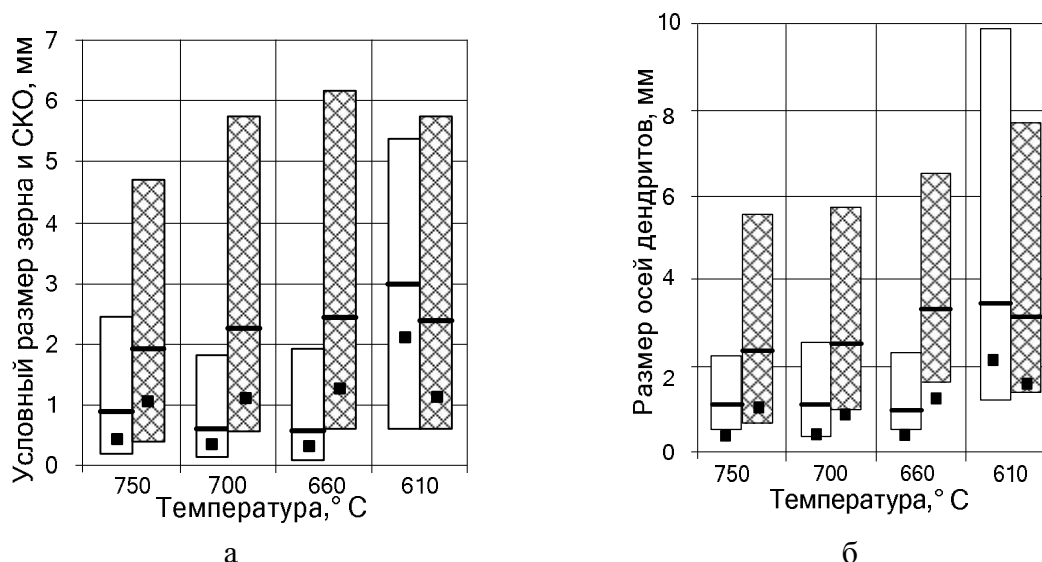


Рисунок 2 – Влияние обработки вибрацией на размерные параметры зерен и СКО
 а – обработка вибрацией; б – размер осей дендритов первого порядка; разброс значений условного размера зерна, с обработкой – □; без обработки – ▨; средний условный размер зерна – «—», ■ – СКО

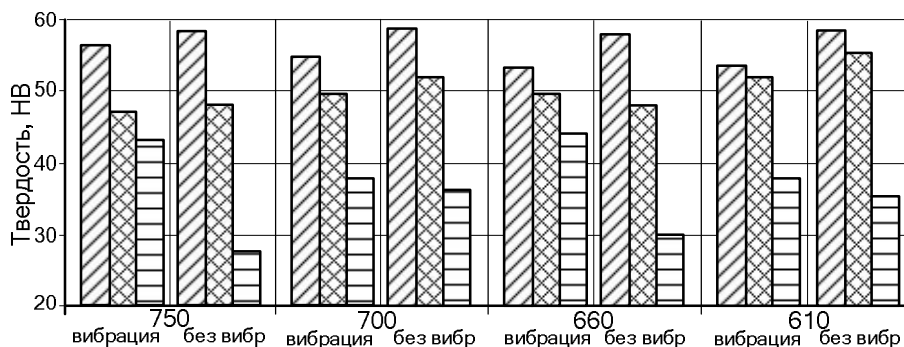


Рисунок 3 – Твердость образцов
 □ - центральная зона образца; ▨ - средняя зона (расстояние $\frac{1}{2} R$ от центра); ▩ - краевая зона образца

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Температура нагрева металла при вибрационной обработке влияет на преимущественное формирование дефектов определенного типа на поверхности отливок.
2. Вибрационная обработка приводит к более равномерному распределению структурных составляющих и значений твердости по сечению отливки.
3. После вибрации зерна состоят из одного дендрита с длиной оси первого порядка в 2 раза меньшей, чем в образцах без обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
2. Дорофеев, С.В. Свойства алюминия и силумина после облучения наносекундными электромагнитными импульсами / В.В. Крымский, Ри Хосен, Е.Б. Кухаренко // Металлургия машиностроения. 2006. – № 4. – С. 18 – 20.
3. F. Taghavi Study on the ability of mechanical vibration for the production of thixotropic microstructure in A356 aluminum alloy / F. Taghavi, H. Saghafian, Y.H.K. Kharrazi – Materials and Design, 30 (2009). p. 115–121
4. G. Chirita Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al–18 wt%Si alloy / G. Chirita, I. Stefanescu, D. Soares, F.S. Silva – Materials and Design, 30 (2009). p. 1575–1580
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3т.:Т.1 / Под. общ.ред. Н.Г. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.: ил.

Химухин Сергей Николаевич

Учреждение Российской академии наук Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией «Конструкционные и инструментальные материалы»

Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153

тел. сот. 89242030609

E-mail: ximuxin@mail.ru

Гостищев Виктор Владимирович

Учреждение Российской академии наук Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Конструкционные и инструментальные материалы»

Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153,

тел. сот. 8-914-545-00-26, тел. сот. 892420 30609, тел. раб. (4212) 22-69-56

Теслина Мария Александровна

Учреждение Российской академии наук Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН

Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Конструкционные и инструментальные материалы»

Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153

тел. сот. 8-924-211-63-30, тел. раб. (4212) 22-69-56

E-mail: mari_teslina@mail.ru

Астапов Иван Александрович

Учреждение Российской академии наук Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН

Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Конструкционные и инструментальные материалы»

Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 153,

тел. сот. 8-924-211-63-30, тел. раб. (4212) 22-69-56

E-mail: vanchop@list.ru

S.N. KHIMUKHIN, V.V. GOSTISHCHEV, M.A. TESLINA, I.A. ASTAPOV

DEFECTS FORMATION AND CHANGE OF CAST METAL PROPERTIES UNDER EXTERNAL TREATMENT OF AL9 MELT

Influence of vibromechanical treatment of AL9 melt at various solidification temperatures upon the castings surface quality, metal hardness and structure has been studied. The formation mechanisms of various types of the defects on the castings surface have been suggested. Melt temperature at vibromechanical treatment proved to be an influencing factor upon the dominant formation of the surface defects of a certain type. Vibromechanical treatment leads to refinement and more uniform distribution of metal structural components in the castings.

Keywords: casting surface defects, vibromechanical treatment, grain size, dendrites axis length, hardness distribution.

BIBLIOGRAPHY

1. Efimov, V.A. Fizicheskie metody vozdeystviya na processy zatverdevaniya splavov / V.A. Efimov, A.S. Jel'darhanov– M.: Metallurgija, 1995. – 272 s.
2. Dorofeev, S.V. Svoystva aljuminija i silumina posle obluchenija nanosekundnymi jelektromagnitnymi impul'sami / V.V. Krymskij, Ri Hosen, E.B. Kuharenko // Metallurgija mashinostroenija. 2006. – № 4. – S. 18 – 20.
3. F. Taghavi Study on the ability of mechanical vibration for the production of thixotropic microstructure in A356 aluminum alloy / F. Taghavi, H. Saghafian, Y.H.K. Kharrazi – Materials and Design, 30 (2009). p. 115–121
4. G. Chirita Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al–18 wt%Si alloy / G. Chirita, I. Stefanescu, D. Soares, F.S. Silva – Materials and Design, 30 (2009). p. 1575–1580
5. Diagrammy sostojanija dvojnih metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3t.:T.1 / Pod. obw.red. N.G. Ljakisheva. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 992 s.: il.

Khimukhin Sergey Nikolaevich

Institute of materials technology of Khabarovsk Science Centre of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences
Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of Constructional and Instrumental Materials Laboratory
153, Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, Russia 680035
Cell phone number: 89242030609
E-mail: ximyxin@mail.ru

Gostishchev Viktor Vladimirovich

Institute of materials technology of Khabarovsk Science Centre of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences
Candidate of Technical Sciences
Senior Research Fellow of Constructional and Instrumental Materials Laboratory
153, Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, Russia 680035
Cell phone number: 89242030609, Cell phone number: 89145450026, Working phone number: (4212) 22-69-56

Teslina Maria Alexandrovna

Institute of materials technology of Khabarovsk Science Centre of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences
Candidate of Technical Sciences
Research Fellow of Constructional and Instrumental Materials Laboratory
153, Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, Russia 680035
Cell phone number: 8-924-211-63-30, Working phone number: (4212) 22-69-56
E-mail: mari_teslina@mail.ru

Astapov Ivan Alexandrovich

Institute of materials technology of Khabarovsk Science Centre of the Far East Branch of Russian Academy of Sciences
Candidate of Technical Sciences
Research Fellow of Constructional and Instrumental Materials Laboratory
153, Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, Russia 680035
Cell phone number: 8-924-211-63-30, Working phone number: (4212) 22-69-56
E-mail: vanchop@list.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 681.5

А.В. АГЕЕНКО

МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ УЧПУ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ КОНТУРА ДЕТАЛИ¹

Предложена методика настройки станочных параметров, позволяющая определить точность всей технологической системы, идентифицировать влияние каждого из факторов на точность обработки траектории перемещения режущим инструментом. Методика позволяет добиться необходимой точности обработки траектории путем оптимизации станочных параметров при проведении планового, капитального ремонта, а также при модернизации токарного станка с ЧПУ.

Ключевые слова: точность траектории инструмента; оптимизация; станочные параметры; система диагностики; токарный станок с ЧПУ, контур положения.

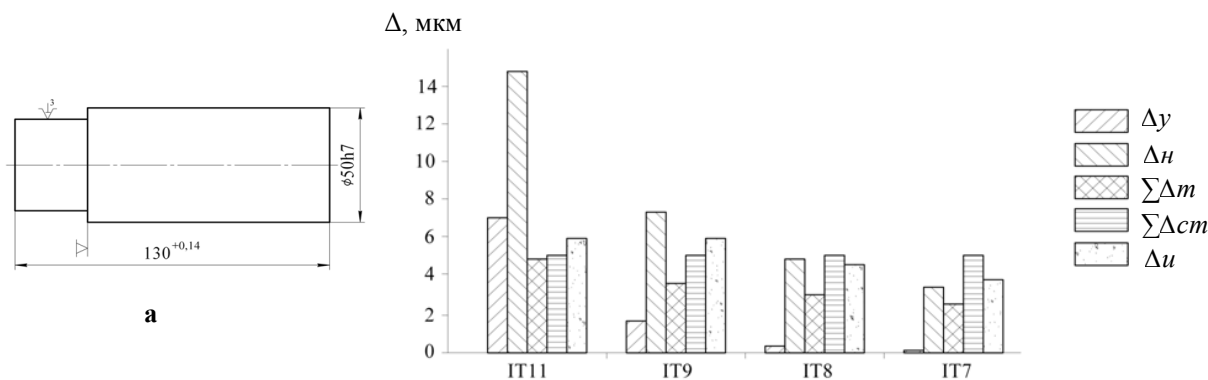
Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений неразрывно связано с обеспечением геометрической точности деталей.

На формирование геометрии поверхности детали оказывают влияние такие факторы как погрешность установки заготовки (сюда входят погрешности базирования, закрепления, а также погрешности приспособления), погрешность настройки станка, размерный износ режущих инструментов, упругие перемещения узлов станка, тепловые деформации технологической системы, остаточные напряжения в деталях, геометрическая неточность станка, обусловленная погрешностями изготовления, установки станков, износом его узлов (направляющих, шарико - винтовой пары (ШВП)), а также кинематическими погрешностями, включающими погрешности позиционирования суппортов станка.

Доля каждой из погрешностей, входящих в допуск на размер, при обработке деталей машин на металлорежущих станках различна. Для детали типа вала, обработанного на токарно-револьверном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) с установкой в трехкулачковом патроне (рис.1а), с уменьшением допуска на размер, доля погрешности, обусловленная геометрическими неточностями станка, растет (рис.1б). При анализе суммарной погрешности обработки детали использовалась методика, представленная в работе [1]. При расчете использовались следующие условия обработки: резцы из твердого сплава (на 1-м переходе - Т5К10, 2-м переходе – Т14К8, 3-м переходе – Т15К6, 4-м переходе – Т30К4) с параметрами лезвия $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\gamma=5^\circ$; $\alpha=5^\circ$, в качестве заготовки для детали использовался прокат сталь 45 ($\sigma_b=600 \text{ Н/мм}^2$) с качеством IT13. На заключительном переходе вал обрабатывался с допуском по качеству IT7. Так, при обработке с допуском IT7 основной погрешностью, определяющей суммарную погрешность обработки, с учетом того, что погрешность, вызванная размерным износом резца, на токарном станке с ЧПУ компенсируется благодаря коррекции положения резца, является погрешность, обусловленная геометрической неточностью станка.

Уменьшение величины этой погрешности позволит значительно повысить точность деталей машин, обрабатываемых на токарных станках с ЧПУ.

¹ Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. № 14.740.11.0324 от 17 сентября 2010 г.



б

Рисунок 1 – Анализ погрешностей, входящих в допуск на размер, при обработке деталей на токарных станках с ЧПУ

Δu - погрешность установки заготовки; Δn - погрешность настройки станка; $\sum \Delta t$ - тепловые деформации узлов станка; $\sum \Delta_{ст}$ - геометрическая неточность станка; Δi - размерный износ режущих инструментов

Решению такой задачи как повышение геометрической точности станка, обусловленной кинематикой станка, посвящено достаточно большое количество работ. В работах [2,3] геометрическая точность станка достигается за счет контроля процесса резания. Требуемая точность достигается за счет адаптивных систем, позволяющих изменять структуру системы управления станком при изменении динамических процессов во время резания, а также формировании корректирующих управляющих воздействий.

Тем не менее, базовая кинематическая точность станка определяется точностью системы управления приводом подачи токарного станка с ЧПУ и зависит от точности ее настройки. Способы синтеза системы управления привода подачи, представлены в работах [4,5]. В данных работах считается, что привод удовлетворяет условиям заданной точности, если логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) разомкнутого контура положения этого привода лежит выше запретной зоны, ограниченной некоторой желаемой ЛАЧХ (рис. 2).

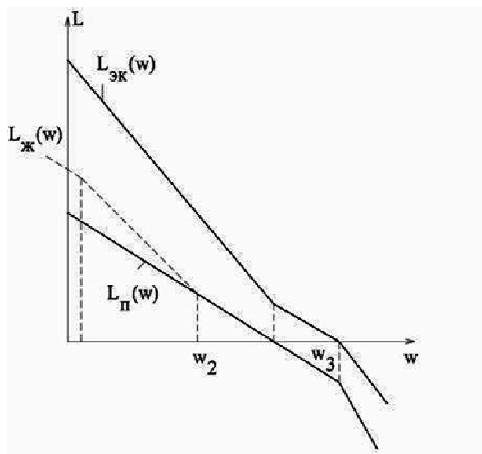


Рисунок 2 – ЛАЧХ аналогового СЭП

$L_n(w)$ – ЛАЧХ, не удовлетворяющая требованиям по точности; $L_{эк}(w)$ – ЛАЧХ, удовлетворяющая требованиям по точности;

$L_{ж}(w)$ – желаемая ЛАЧХ

Данный метод не позволяет оценить влияние на точность станка таких факторов как коэффициентов усиления ПИД-регулятора контура положения, погрешности, обусловленной частотой задающего воздействия на привод, сухого трения, люфта в ШВП, накопленной погрешности ходового винта и других.

Современные системы числового программного управления позволяют компенсировать большинство из выше, перечисленных факторов путем настройки соответствующих станочных параметров [6]. Предлагаемый метод позволит определить точность отработки траектории перемещения режущим инструментом, а также влияние на нее каждого из выше, перечисленных факторов, тем самым, компенсируя соответствующие погрешности, можно добиться необходимой точности отработки траектории инструмента (рис. 5).

В качестве траектории перемещения исследуется дуга окружности, так как именно при отработке круговой траектории проявляется действие всех вышепере-

численных факторов.

Для определения траектории перемещения режущего инструмента, а также идентификации факторов, влияющих на эту траекторию на токарно-револьверном станке с ЧПУ мод. 1В340Ф30 с приводами подачи ТНР, была смонтирована система диагностики. Привод выполнен по одноконтурной схеме с ПИ-регулятором скорости и блоком нелинейного токоограничения. Блок-схема привода приведена на рис. 3 [7].

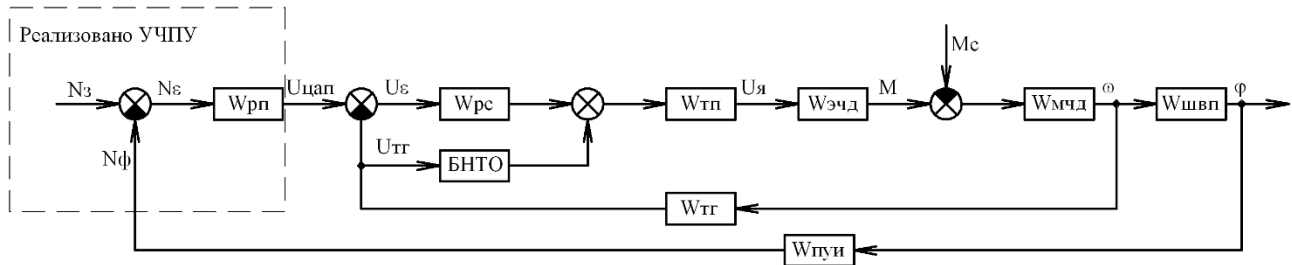


Рисунок 3 – Структурная схема следящего привода подачи

$U_{я}$ – напряжение на якоре, M – момент на двигателе, ω – угловая скорость, φ – угол поворота ШВП, $W_{рп}$ – передаточная функция регулятора положения, $W_{рс}$ – передаточная функция регулятора скорости, $W_{тп}$ – передаточная функция тиристорного преобразователя, $W_{эчд}$ – передаточная функция электрической части двигателя, $W_{дмс}$ – передаточная функция двухмассовой механической системы, $W_{тг}$ – передаточная функция тахогенератора, $W_{пуи}$ – передаточная функция преобразователя «угол-импульс», БНТО – блок нелинейного токоограничения

Система диагностики состоит из датчиков линейных перемещений ЛИР-8.000, установленных на продольном и поперечном суппортах станка (рис.4), и вычислительной ЭВМ, позволяющей обрабатывать данные от датчиков. Датчики линейных перемещений имеют дискретность перемещения (0,1 мкм) на порядок выше, чем дискретность перемещения привода станка (1мкм). Помимо этого возможности датчиков таковы, что они позволяют контролировать перемещения привода во всем диапазоне подач станка без какого-нибудь существенного влияния датчиков на погрешность траектории перемещения инструмента.

С помощью системы диагностики получена реальная траектория перемещения инструмента при отработке круговой интерполяции (рис.5).

Здесь ось абсцисс соответствует идеальной траектории перемещения инструмента, заданной в кадре управляющей программы (УП).

По оси ординат откладывается величина равная разности между радиусом, заданным в УП, и фактическим, измеренным с помощью системы диагностики

$$\Delta R = R - R_{\phi}$$

где R – радиус, заданный в УП, мм;

R_{ϕ} – фактический радиус полученный с помощью системы диагностики, мм.

Качество переходных процессов в приводах подачи является важнейшим показателем точности их работы, который имеет тем большее значение, чем выше скорость подачи при отработке траектории.

На рисунке 5 представлено несколько траекторий инструмента при различных настройках ПИД-регулятора контура положения УЧПУ. Изменяя параметры ПИД-регулятора



а



б

Рисунок 4 – Расположение датчиков линейных перемещений

а – по координате X; б – по координате Z; Д - датчики

контура положения УЧПУ, на выходе регулятора положения формируется различное суммарное управляющее воздействие

$$u_y(i) = k_n N_\varepsilon(i) + k_o \Delta N_\varepsilon(i) + k_u \sum_{i=0}^i N_\varepsilon(i) + k_c [N_z(i) - N_z(i-1)],$$

где k_n – коэффициент добротности привода по положению;

k_o – коэффициент дифференциальной составляющей ошибки по положению;

k_u – коэффициент интегральной составляющей ошибки по положению;

k_c – коэффициент компенсации скоростной составляющей ошибки;

$N_\varepsilon(i)$, $\Delta N_\varepsilon(i)$ – ошибка рассогласования и ее изменение соответственно;

$N_z(i)$, $N_z(i-1)$ – заданное значение перемещения по оси за текущий и предыдущий i -й цикл прерывания соответственно.

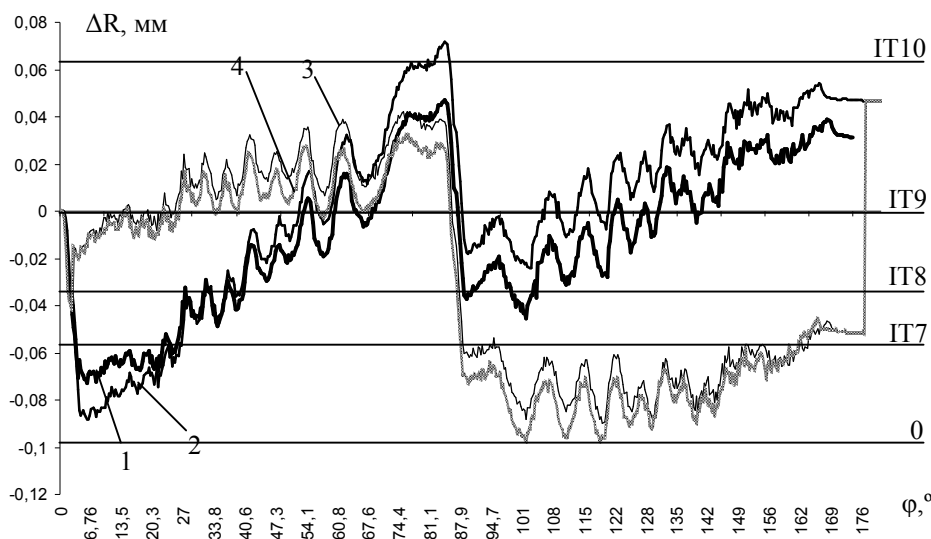


Рисунок 5 – Фактическое отклонение траектории инструмента

1 – $K_\delta=1$; 2 – $K_\delta=0,8$; 3 – $K_\delta=2$; 4 – $K_\delta=2,25$; K_δ – дифференциальный коэффициент усиления

В результате при обработке приводом траекторий с ускорением (обработка сферических или сплайновых поверхностей) смена задания на ЦАП при определенных скоростях происходит во время переходного процесса (рис.6а). При отработке первого задания на ЦАП возникает переходный процесс (кривая 1). При следующем задании возникает новый переходный процесс (кривая 2). Этот переходный процесс накладывается на переходный процесс от предыдущего задания.

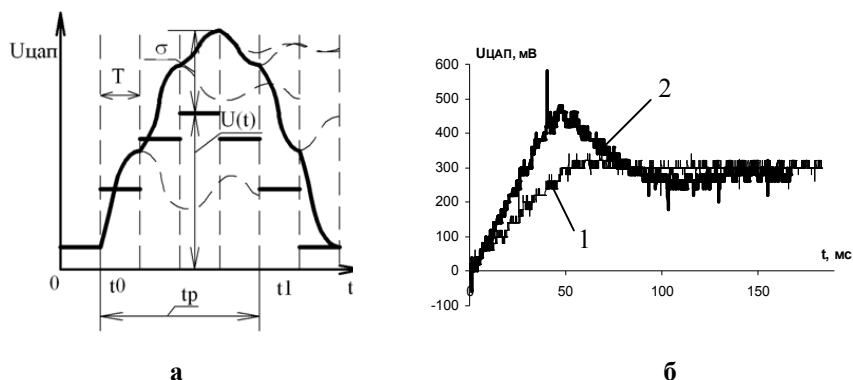


Рисунок 6 – Переходный процесс задающего воздействия на ЦАП

а – при непрерывно изменяющемся напряжении задания,

б – реальный переходный процесс ($U_{цап}$ – напряжение задания,

σ – перерегулирование, T – тик УЧПУ, $U(t)$ – задающее воздействие,

t_p – время регулирования, кривая 1 – при $K_\delta=1$, кривая 2 – при $K_\delta=2$)

от предыдущего задания. Процесс повторяется при последующих задающих воздействиях на ЦАП. В результате возникает накопленная погрешность, вызванная динамикой привода. Это подтверждается экспериментально при отработке единичного воздействия на ЦАП системы ЧПУ NC201M токарно-револьверного станка (рис. 6б). Время регулирования значительно превы-

шает тик УЧПУ, равный 2 мс и изменяется в зависимости от настройки ПИД-регулятора.

Для ее компенсации следует добиться определенных параметров качества переходного процесса, таких как время регулирования, перерегулирование, статическая ошибка, число колебаний (рис.7). В идеальном случае время переходного процесса должно быть сведено к минимуму. Однако существуют определенные ограничения, такие как некомпенсируемая постоянная времени привода, предельный коэффициент усиления пропорциональной составляющей, от которого зависит устойчивость привода, коэффициенты усиления дифференцирующей и интегрирующей составляющих, которые определяют величину перерегулирования и время регулирования.

Для задания коэффициентов цифрового ПИД-регулятора положения системы ЧПУ NC201M в файле характеристики осей AXCFIL в секции 2 программируются две инструкции: GMnn и FRC.

Инструкция GMnn определяет параметры скорости быстрого хода и коэффициент пропорциональной составляющей усиления для текущей характеризуемой оси. Инструкция FRC предназначена для определения коэффициентов дифференцирующей и интегрирующей составляющих ПИД регулятора интерполируемой оси. Помимо этого имеются станочные параметры позволяющие компенсировать сухое трение, люфт в ШВП, накопленную погрешность ходового винта и другие [8].

Метод настройки станочных параметров может широко применяться как при наладке новых токарных станков с ЧПУ, модернизации устаревших, а также при проведении планового и капитального ремонта станочного оборудования. Метод дает возможность принять решение о необходимости проведения капитального ремонта и модернизации станочного оборудования, а также степени проведения модернизации (модернизировать весь станок или только систему управления).

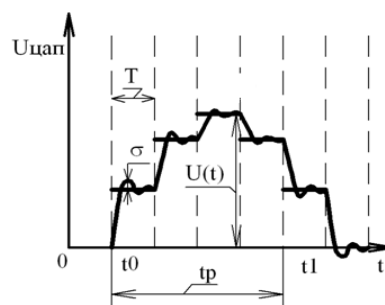


Рисунок 7 – Желаемая динамика привода подачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: «Машиностроение», 1985. - 694 с.
2. Заковоротный, В.Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В.Л. Заковоротный, М.Б. Флек// Ростов н/Д: Терра, 2006. – 876 с.
3. Базров, Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков/ Б.М. Базров. - М.: Машиностроение, 1978. - 216 с.
4. Каган, В.Г. Цифровые электромеханические системы / В.Г. Каган, Ю.Д. Бери, Б.И. Акимов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
5. Коровин, Б.Г. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами / Б.Г. Коровин, Г.И. Прокофьев, Л.Н. Рассудов // Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 352 с.
6. Устройство числового программного управления NC201-M. Руководство по характеристике. Санкт-Петербург: ООО «Балт-Систем», 2008. - 146 с.
7. Чернов, Е.А. Электроприводы подачи станков с ЧПУ: Справочное пособие / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин, С.Г. Синичкин. - Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 271 с.
8. Федонин, О.Н. Способ повышения эффективности работы токарных станков с ЧПУ / О.Н. Федонин, А.В. Агеенко // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011): Сб. тр. 3-й междунар. Науч.-техн. конф., г. Брянск, 19-20 мая 2011 г./ Под общ. ред. А.Г. Сулова. – Брянск: Десяточка, 2011. – С. 328-329.

Агеенко Алексей Владимирович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
 Аспирант каф. «Автоматизированные технологические системы»
 E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

A.V. AGEENKO

METHOD OF SETTINGS CNC TURNING MACHINE FOR THE ACCURACY OF A GIVEN CIRCUIT DETAILS

The method of setting the parameters of machine tool, which allows to determine the accuracy of the whole technological system to identify the influence of each factor on the accuracy of the castings move the cutting tool trajectory. The technique allows to achieve the necessary precision castings trajectory by optimizing the machining parameters during the planning, overhaul, as well as the modernization of CNC lathe.

Keywords: accuracy of the tool path; optimization; machine tool parameters; system diagnostics; lathe with CNC; contour position.

BIBLIOGRAPHY

1. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. V 2 t. T.1/ Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Mewerjakova. M.: «Mashinostroenie», 1985. - 694 s.
2. Zakovorotnyj, V.L. Dinamika processa rezanija. Sinergeticheskij podhod / V.L. Zakovorotnyj, M.B. Flek// Rostov n/D: Terra, 2006. – 876 s.
3. Bazrov, B.M. Tehnologicheskie osnovy proektirovanija samopodnastraivajuvihsja stankov/ B.M. Baz-rov. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 216 s.
4. Kagan, V.G. Cifrovye jelektromehaničeskie sistemy / V.G. Kagan, Ju.D. Beri, B.I. Akimov i dr. – M.: Jenergoatomizdat, 1985. – 208 s.
5. Korovin, B.G. Sistemy programmnoĝo upravlenija promyšlennymi ustanovkami i robototehničeskimi kompleksami / B.G. Korovin, G.I. Prokofev, L.N. Rassudov // Učebnoe posobie dlja vuzov. L.: Jenergo-atomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. - 352 s.
6. Ustrojstvo čislovogo programmnoĝo upravlenija NC201-M. Rukovodstvo po harakterizacii. Sankt-Peterburg: OOO «Balt-Sistem», 208. - 146 s.
7. Chernov, E.A. Jelektroprivody podach stankov s ChPU: Spravočnoe posobie / E.A. Chernov, V.P. Kuz'min, S.G. Sinichkin. - Gor'kij: Volgo-Vjatskoe kn. izd-vo, 1986. – 271 s.
8. Fedonin, O.N. Sposob povyšeniya jeffektivnosti raboty tokarnyh stankov s ChPU / O.N. Fedonin, A.V. Ageenko // Modernizacija mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii na nauchnyh osnovah tehnologii mashi-nostroeniya (TM-2011): Sb. tr. 3-j mezhdunar. Nauch.-tehn. konf., g. Brjansk, 19-20 maja 2011 g./ Pod obw. red. A.G. Suslova. – Brjansk: Desjatočka, 2011. – S. 328-329.

Ageenko Alexey Vladimirovich

Bryansk State Technical University, Bryansk

Graduate student Department. "Automated technological systems"

E-mail: atsysts@tu-bryansk.ru

А.П. БАБИЧЕВ, В.В. ИВАНОВ

НАНЕСЕНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕНнюю ПОВЕРХНОСТЬ ГИЛЬЗЫ ГИДРОЦИЛИНДРА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT-20

В статье представлены материалы по исследованию деталей с нанесённым твердосмазочным покрытием - дисульфид молибдена (MoS_2) с применением низкочастотных колебаний.

Ключевые слова: *вибрационная обработка; вибрационные механохимические покрытия; дисульфид молибдена (MoS_2); дисульфид вольфрама (WS_2); упрочнение.*

Механохимические покрытия твердо завоевывают рынок, связанный с финишными методами обработки, вытесняя традиционные (гальванические, химические и других покрытий). Механохимические покрытия в совокупности с вибрационным упрочнением дают уникальную возможность наносить и комбинировать не только традиционное упрочнение поверхностного слоя металла, но и внедрять в его поверхность различные твердосмазочные материалы. Уникальные свойства твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена (MoS_2), вольфрама (WS_2), графита и не менее уникальные свойства вибрационной механохимии (ВиМХ), создают предпосылки для повышения износостойкости ответственных деталей, входящих в пары трения различных изделий. Дисульфид молибдена обладает слоистой структурой, в которой есть «прочные» и «плотные» слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. При этом в слое, покрывающем, поверхность трения имеются сильные связи, тогда как связь между слоями слабая. Такие свойства твердосмазочного покрытия обеспечивают «лёгкое» скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, существенное снижение коэффициента трения и изнашивания пары трения. Высокая адгезия дисульфида молибдена к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образуемыми атомами серы с металлом. Дисульфид молибдена имеет гексагональную слоистую решетку в форме призматического шестигранника. Такое строение кристаллической решетки обеспечивает наличие важных для смазочных материалов высоких адгезионных свойств.

Вибрационная обработка с одновременным нанесением пленки дисульфида молибдена хорошо зарекомендовала при обработке внутренней поверхности гильзы гидроцилиндра из титанового сплава VT-20 (рис. 1).

Схема расположения гильз на виброплощадке установки УВГ 4×10 показана на (рис. 2.) Гильзы закрепляются в приспособлении (5) параллельно оси вала вибратора в районе опорных пружин (2). Отверстия закрываются специальными заглушками. В каждую гильзу засыпают шары, покрытие MoS_2 вышеописанным способом. В процессе обработки гильзы через каждые 15 минут поворачивают на 90° в одном направлении вокруг оси для равномерного покрытия зеркала гильзы MoS_2 .

Материал инструмента сталь X12Ф1 (HRC 52-56), условия изготовления инструмента одинаковые: единая заготовка и термообработка.



Рисунок 1 – Гидроцилиндры из титанового сплава VT-20

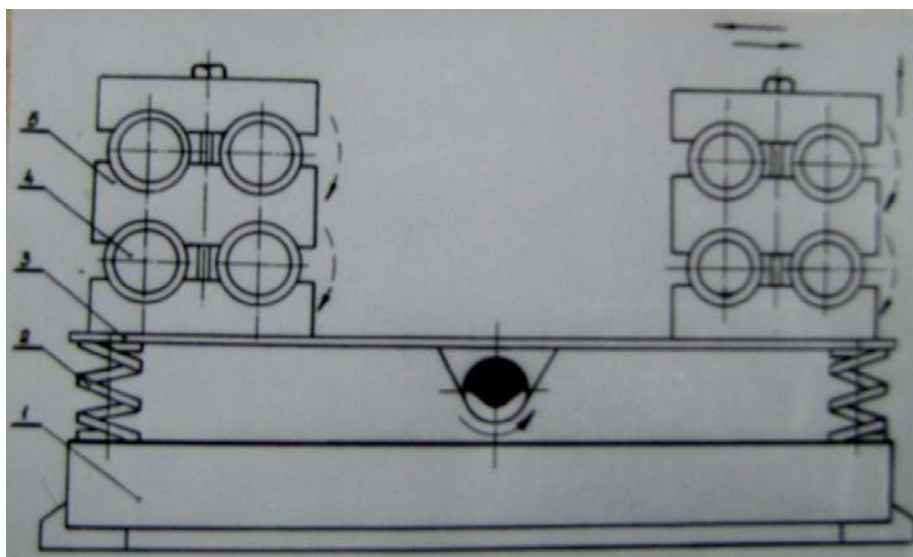


Рисунок 2 – Схема закрепления гидроцилиндров на площадке вибрационной установки УВГ 4×10
1 – основание; 2 – пружины; 3 – виброплощадка; 4 – цилиндры; 5 – приспособление

Внедрение этого процесса позволило увеличить срок службы и надежность работы гильзы и всего изделия в целом за счет уменьшения износа зеркала гильзы гидроцилиндра.

Так-же проведены производственные испытания инструмента для холодного прессования алюминиевых труб (пуансоны, матрицы, иглы), методом вибрационного упрочнения поверхностного слоя с нанесением MoS_2 , на прессе мод. КА-5530 усилием 100 тонн.

Перед обработкой детали подвергались протравливанию для увеличения адгезии покрытия по следующей технологии:

- травильный раствор – 1 часть дистиллированной воды и 0,5 частей HCl ;
- промывочный раствор – 1 часть воды, 0,25 частей H_2SO_4 , 0,25 части хромпика;
- режимы травления - обработка в травильном растворе, нагретом до 60 - 70°C, в течение 10 - 15 минут с последующей промывкой в проточной воде и промывочном растворе.

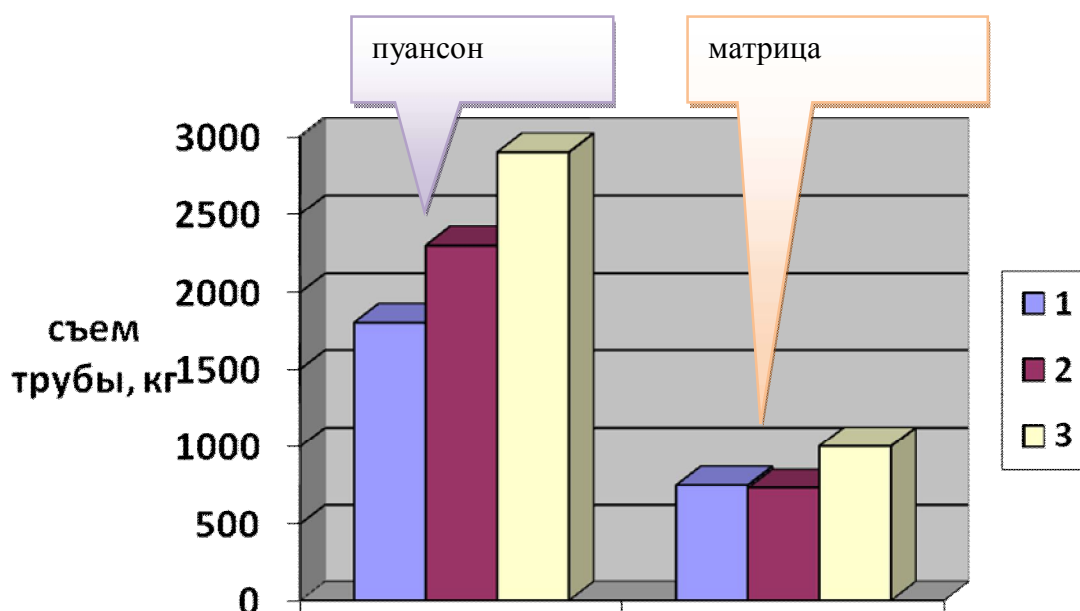
Режимы обработки описаны выше.

Признаками выхода инструмента из строя по износу являются:

- для пуансонов - износ рабочего пояса, что ведет к затеканию прессуемого металла в зазор между пуансоном обоймой, увеличение диаметра пуансона в месте наименьшего сечения;
- для матриц - износ рабочего пояса, приводящий к увеличению диаметра процессуемой трубы, износ конусной части, приводящий к налипанию и ухудшению качества поверхности прессуемой трубы;
- для игл - разрушение по сечению.

При появлении одного из видов износа инструмента считается неработоспособным и заменяется, не подвергаясь восстановлению, что и считается критерием стойкости.

Сравнение данных испытаний нормами средней стойкости инструмента, действующими на предприятии, показывает (рис.3), что увеличение стойкости обработанных пуансонов составляет 28%, а увеличение стойкости матриц 27%.



*Рисунок 3 – Изменение стойкости инструмента для холодного прессования труб
1 – средняя стойкость по нормам предприятия; 2 – стойкость серийного инструмента;
3 – стойкость инструмента, покрытого MoS₂*

Положительные результаты достигнуты также при использовании совмещенного процесса для обработки азотированных зубьев шестерен, сферических и приборных подшипников.

ВЫВОДЫ

1. В качестве рабочей среды рекомендуется применять смесь стальных полированных шаров из стали ШХ15 Ø 2 - 9 мм (HRC 62) и мелкодисперсный порошок дисульфида молибдена марки МВЧ-1 (ЦМТУ06-1-68).

2. Продолжительность обработки, требуемая для получения сплошной, плотной пленки MoS₂ составляет 60 -90 минут.

3. Использовать вибрационные установки различных типов позволяющих получить оптимальный режим обработки, амплитуда колебаний $A = 2,5$ мм и частота колебаний 33 Гц (2100 кол/мин). Рабочая камера или (внутренняя полость детали) заполняется шарами на % V т.к., порошок засыпается из расчета 10 г на литр насыпного объема шаров.

Рекомендуемые режимы позволяют одновременно получить оптимальную толщину пленки MoS₂, обладающую хорошими антифрикционными свойствами, и добиться улучшения качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Процесс вибрационного упрочнения в среде металлических шаров с одновременным нанесением пленки MoS₂ позволяет снизить трудоемкость не только за счет комбинирования этих двух процессов, но также и за счет обработки одновременно большого количества деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Изд.2е, доп. и перераб. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694с.
2. Пугина, Л.И. Дисульфид молибдена / Л.И. Пугина, М.Д. Синявская, И.М. Максимчук. – Киев, Изд-во «Наукова думка», 1968.
3. Иванов, В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий: моногр. / В.В. Иванов. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 140с.
4. Рысева, Т.Н. Повышение износостойкости пар трения путем совмещения процессов вибрационного упрочнения и нанесения твердосмазочного покрытия дисульфида молибдена: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов РИСХМ 1975.

5. Бабичев, А.П. Исследование коэффициента трения, износостойкости и микро/нанопрофиля поверхности вибрационного механохимического покрытия дисульфида молибдена MoS₂ / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, Я.С. Булгаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 1 (285). – С. 35-41.

Бабичев Анатолий Прокофьевич

Донской государственный технический университет
Доктор технических наук, профессор
Тел.: (863) 273–85–13
E-mail: vibrotech@mail.ru

Иванов Владимир Витальевич

Донской государственный технический университет
Кандидат технических наук, доцент.
Тел.: (863) 2-738-360
E-mail: vivanov_dstu@mail.ru

V.V. IVANOV, A.P. BABITHEV

**OUTLOOK OF THE DISULPHUREOUS MOLYBDENUM APPLICATION
FOR FORMING OF VIBRATORY CHEMIMECHANICAL SOLID
OIL COVERINGS**

The brief review of vibration mechano-chemical covering and samples of practical application of the solid oil on the basis of disulphureous molybdenum, made up under conditions of vibration is given in the article.

Keywords: *the author describes a model schema of the forming of the disulphureous molybdenum covering.*

BIBLIOGRAPHY

1. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Izd.2e, dop. i pere-rab. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2008. – 694s.
2. Pugina, L.I. Disul'fid molibdena / L.I. Pugina, M.D. Sinjavskaja, I.M. Maksimchuk. – Kiev, Izd-vo «Naukova dumka», 1968.
3. Ivanov, V.V. Vibracionnye mehanohimicheskie metody nanesenija pokrytij: monogr. / V.V. Ivanov. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2007. – 140s.
4. Ryseva, T.N. Povyshenie iznosostojkosti par trenija putem sovmewenija processov vibracionnogo uprochnenija i nanesenija tverdosmazochного pokrytija disul'fida molibdena: dis. ... kand. tehn. nauk. – Rostov RISHM 1975.
5. Babichev, A.P. Issledovanie koeficienta trenija, iznosostojkosti i mikro/nanoprofilja poverhno-sti vibracionnogo mehanohimicheskogo pokrytija disul'fida molibdena MoS₂ / A.P. Babichev, V.V. Ivanov, Ja.S. Bulgakov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2011. – № 1 (285). – S. 35-41.

Babichev Anatoly Prokofievich

Don state technical university
Doctor of technical science, professor
Tel: 863-273-85-13
E-mail: vibrotech@mail.ru

Ivanov Vladimir Vitalievich

Don state technical university
Candidate of technical science, associate professor
Tel: 863-2738-360
E-mail: vivanov_dstu@mail.ru

УДК 621.9

Е.А. КУДРЯШОВ, Д.Ю. ЛУНИН, Е.В. ПАВЛОВ

ПРЕИМУЩЕСТВА ЛЕЗВИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КОМПОЗИТА

Описаны основные преимущества лезвийного инструмента из композита 10 при обработке комбинированных поверхностей. Приведены примеры замены круглошлифовальной операции на чистовое точение инструментом из композита 10 и замены материала режущей части (сплава ВК2) на композит 10.

Ключевые слова: детали машин, композит, точность, качество, прерывистое резание.

В условиях происходящего после длительного застоя подъема отечественного машиностроения и металлообработки, все большее значение приобретают универсальные и недорогие технологии, позволяющие за короткий промежуток времени значительно повысить эффективность производства.

Успешному решению этих проблем способствует широкое применение новых конструкционных материалов, заменителей металлов, что позволяет снизить металлоемкость машин и повысить эксплуатационные свойства оборудования, а это особенно важно при работе механизмов с повышенным давлением, влажностью и наличием агрессивных сред.

Однако недостаточная жесткость и твердость деталей из пластмасс, полученных методами формообразования, не всегда обеспечивает необходимую точность размеров. Решение проблемы заключается в создании конструкции детали состоящей из комбинированных поверхностей, а именно: металлической основы и наполнителя пластмассы. В этом случае требуемая точность размеров и качество поверхностей детали могут быть получены только механической обработкой.

Опыт работы предприятий машиностроения Центрального Черноземья показывает, что высокая эффективность обработки трудоемких деталей достигается внедрением специальных технологий, основанных на применении лезвийных инструментов, оснащенных композитами. Применение композитов позволяет не только повысить эффективность обработки конструктивно и технологически сложных поверхностей деталей, но и дает возможность высокопроизводительной обработки комбинированных поверхностей, состоящих из несовместимых, с точки зрения традиционной лезвийной обработки конструкционных материалов.

Практика промышленного использования композитов и анализ литературных источников свидетельствуют, что эти прогрессивные инструментальные материалы практически не известны при обработке комбинированных поверхностей, следовательно, потенциальные возможности композитов используются не в полной мере [5].

Таким образом, совершенствование технологии изготовления деталей с комбинированными поверхностями из различных конструкционных материалов композитами, за счет полного раскрытия их технологических возможностей, является актуальной научной и практической задачей.

В ЮЗГУ, на кафедре машиностроительных технологий и оборудования, проводятся работы по проектированию технологических процессов ремонта и изготовления деталей различной конструктивной и технологической сложности, из разнообразных конструкционных материалов с применением инструмента из композита.

Состав и последовательность операций технологического процесса зависит от типа производства: групповая технология при единичном и мелкосерийном производстве, маршрутная технология при серийном производстве.

Использование для конструкций деталей разнородных по своим характеристикам высокопрочных, износостойких и жаропрочных материалов, неравномерная величина припуска, неоднородные твердость и физико-механические свойства материалов, образующих обрабатываемую поверхность, позволяли при очень низкой производительности процесса делать поверхности только твердосплавным лезвийным инструментом или шлифованием с большой вероятностью брака.

Эффективность абразивной обработки достигается только при правильном подборе характеристики круга применительно к данному виду пластмассы. Наиболее часто для этой

цели используют карборундовые и корундовые круги; первые показывают большие стойкость и производительность. Во избежание прижогов рекомендуют избегать длительного контакта с обрабатываемой поверхностью [5].

Например, круглое наружное шлифование (рис. 1) производят электрокорундовыми кругами зернистостью 60, твердостью М1 на режимах: $t=0,15$ мм; $V_q=0,20...0,25$ м/мин; $V_{кр}=30...35$ м/с [2].

В силу вышеперечисленных проблем, в том числе и при возрастании требований к качеству и точности, из-за низкой производительности традиционных технологий и экономических соображений, наиболее радикальным методом получения заданных характеристик процесса является замена твердосплавного инструмента и абразивной обработки на лезвийную, осуществляемую композитом 10, как наиболее подходящим для этих целей инструментальным материалом [3].

Теоретические исследования, экспериментальные проверки, а также опыт промышленного использования, свидетельствуют в пользу композита 10. Этот прогрессивный инструментальный материал в условиях чистового прерывистого резания комбинированных поверхностей, среди материалов группы композитов, обладает большей стойкостью, работоспособностью и обеспечивает стабильную точность не грубее 6...7 квалитета при шероховатости обработанных поверхностей $Ra < 0,63... 1,25$ мкм. В качестве критерия работоспособности принят износ инструмента из композита по задней поверхности $h_3 < 0,35$ мм, чему соответствуют выше, указанные точность и качество обработки.

Последовательность операций технологического процесса и выбор оптимального метода обработки комбинированных поверхностей зависят от конструктивно-технологической сложности детали.

Как правило, для создания необходимых для окончательной обработки технологических баз, точности формы и расположения поверхностей, окончательной операции с применением композита 10 должна предшествовать обработка режущим инструментом из твердых сплавов [1].

Производственные испытания и внедрение результатов исследования в производство свидетельствуют о перспективности новой технологии.

Изготавливаемая деталь	Ось										
Материал обрабатываемой заготовки	сталь 45										
Оборудование	полиамид ПА6-211/15										
Оборудование	Станок токарно-винторезный, модель УТ16П										
№	Содержание перехода (операции)	Вид режущего инструмента	Режимы резания						СОЖ	$t_{осн}$, мин	T, (шт, заг)
			n, об/мин	V, м/с	S, мм/об	t, мм	i	L, мм			
1	Точение	Резец проходной, оснащенный элементом из композита 10	2000	3,5	0,05	0,15	1	120	-	2,4	150
Элементы старой технологии		Технико-экономическая эффективность внедрения									
Оборудование: станок круглошлифовальный, модель 3А141		Увеличилась производительность обработки в 6 раз, исключен брак									

Рисунок 1 – Информационная карта процесса механической обработки

Например, при замене круглошлифовальной операции на чистовое точение инструментом из композита 10, производительность процесса увеличилась до 6 раз, рисунок 1. Замена материала режущей части инструмента на композит 10, вместо твердого сплава ВК2, позволила не только достигнуть высокого качества и точности обработки, но и до 4-х раз повысить производительность за счет интенсификации процесса (скорость резания до 5,5 м/с; подача 0,05 мм/об; глубина резания 0,10 мм) и полностью исключить брак, рис.2 [4].

Изготавливаемая деталь	Ось										
Материал обрабатываемой заготовки	сталь 45 полиамид ПА6-211/15										
Оборудование	Станок токарно-винторезный, модель УТ16П										
№	Содержание перехода (операции)	Вид режущего инструмента	Режимы резания						СОЖ	t _{осн} , мин	T, (шт, заг)
			n, об/мин	V, м/с	S, мм/об	t, мм	i	L, мм			
1	Растачивание R56H8	Вставка резцовая, оснащенная элементом из композита 10	1000	5,5	0,05	0,15	1	40	-	1,55	24
Элементы старой технологии		Технико-экономическая эффективность внедрения									
Материал режущей части инструмента: Твердый сплав ВК2 V=2,5 м/с; T=6 шт.заг.		Увеличилась производительность обработки в 4-е раз, исключен брак									

Рисунок 2 – Информационная карта процесса механической обработки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов, Е.А. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Обработка металлов. – 2009. – №4(45). – С. 3-8.
2. Кудряшов, Е.А. Зависимость качества обработки от геометрии и условий контакта резца с конструктивно сложной поверхностью заготовки / Е.А. Кудряшов // Известия КурскГТУ. – 2010. – №2(31). – С. 77-82.
3. Кудряшов, Е.А. Эффективность инструментального материала композит 10 при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей машин / Е.А. Кудряшов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал. – ИрГУПС. – 2010. – №2(26). – С. 245-247.
4. Кудряшов, Е.А. Количественная оценка процессов в обработанном композитом поверхностном слое деталей машин / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №12(72). Волгоград: ВолГТУ, 2010. – С. 10-15.
5. Кудряшов, Е.А. Технологические особенности лезвийной обработки режущими инструментами оснащенными композитами / Е.А. Кудряшов, Е.В. Павлов, Е.И. Яцун // Современные тенденции в технологиях и конструкциях металлообрабатывающего оборудования: материалы межд. станкостроительного форума. – М.: ЦВК Экспоцентр, 2011. – С. 74-76.

Кудряшов Евгений Алексеевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор кафедры МТиО, первый проректор - проректор по учебной работе

Телефон (факс): 8(4712) 50-48-14

E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

Павлов Евгений Васильевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
Кандидат технических наук, доцент кафедры МТиО
E-mail: evp.kstu@mail.ru

Лунин Дмитрий Юрьевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск
Аспирант, инженер кафедры МТиО
Домашний адрес: г. Курск, 305038, ул. Косухина, д. 26, кв. 23.
E-mail: LDY-SWSU@yandex.ru

E.A. KUDRYASHOV, D.Y. LUNIN, E.V. PAVLOV

**ADVANTAGES EDGE OF TECHNOLOGY OF PROCESSING OF DETAILS
THE TOOL FROM THE COMPOSITE**

Describes the main advantages of blade tools made of composite material 10 in the processing of composite surfaces. Examples of the replacement of circular grinding operation on the finish turning tool of the composite material 10 and the replacement of the cutting part (alloy VK2) on the composite 10.

Keywords: machine components, composite, accuracy, quality, intermittent cuts.

BIBLIOGRAPHY

1. Kudrjashov, E.A. Tehnologicheskij klassifikator detalej i poverhnostej, podlezhawih obrabotke rezaniem / E.A. Kudrjashov, A.Ju. Altuhov, D.Ju. Lunin // Obrabotka metallov. – 2009. – №4(45). – С. 3-8.
2. Kudrjashov, E.A. Zavisimost' kachestva obrabotki ot geometrii i uslovij kontakta rezca s konstruk-tivno slozhnoj poverhnost'ju zagotovki / E.A. Kudrjashov // Izvestija KurskGTU. – 2010. – №2(31). – S. 77-82.
3. Kudrjashov, E.A. Jefferktivnost' instrumental'nogo materiala kompozit 10 pri obrabotke konstruk-tivno slozhnyh poverhnostej detalej mashin / E.A. Kudrjashov // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. Nauchnyj zhurnal. – IrGUPS. – 2010. – №2(26). – S. 245-247.
4. Kudrjashov, E.A. Kolichestvennaja ocenka processov v obrabotannom kompozitom poverhnostnom sloe de-talej mashin / E.A. Kudrjashov, A.Ju. Altuhov, D.Ju. Lunin // Izvestija VolGTU: mezhvuz. sb. nauch. st. №12(72). Volgograd: VolGTU, 2010. – S. 10-15.
5. Kudrjashov, E.A. Tehnologicheskie osobennosti lezviyjnoj obrabotki rezhuwimi instrumentami os-nawennymi kompozitami / E.A. Kudrjashov, E.V. Pavlov, E.I. Jacun // Sovremennye tendencii v tehnologijah i kon-strukcijah metalloobrabatyvajuwego oborudovanija: materialy mezhd. stankostroitel'nogo foruma. – M.: CVK Jekspo-centr, 2011. – S. 74-76.

Kudryashov Evgeny Alekseevich

Southwest state university, Kursk
Doctor of technical science, professor of department “Machine-building Technologies and Equipment”, first pro-rector – pro-rector for academic affairs
Tel (Fax): 8-4712-50-48-14
E-mail: LDY-KurskSTU@yandex.ru

Pavlov Eugeny Vasilievich

Southwest state university, Kursk
Candidate of technical science, associate professor of department “Machine-building Technologies and Equipment”
E-mail: evp.kstu@mail.ru

Lunin Dmitry Yurievich

Southwest state university, Kursk
Post-graduate student, engineer of department “Machine-building Technologies and Equipment”
Home address: Kursk, 305038, ul.Kosuhina,26,23.
E-mail: LDY-SWSU@yandex.ru

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТУРБУЛИЗАТОРОВ В КАНАЛАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье рассматривается влияние размеров и формы турбулизаторов на интенсификацию проточного охлаждения узлов жидкостных ракетных двигателей и предложен эффективный электрохимический метод их получения.

Ключевые слова: жидкостные ракетные двигатели; охлаждение; турбулизаторы; электрохимическая обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация охлаждения камеры сгорания и сопла жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является одним из основных направлений их дальнейшего совершенствования. В настоящее время наиболее эффективным способом такого процесса является наружное проточное охлаждение – компонент топлива (горючее или окислитель) прокачивается по каналам камеры сгорания и сопла, унося часть тепловой энергии.

В большинстве случаев каналы охлаждения конструктивно реализуют по схеме, представленной на рисунке 1.

На рисунке 1 представлено поперечное сечение типовых каналов охлаждения 4, выполненных фрезеровкой в «огневой» стенке 1 с последующим креплением к торцам полученных ребер 2 наружной «рубашки» 3 (чаще всего – пайкой).

По каналам охлаждения со скоростью до 100 м/с и более прокачивается компонент топлива. Большие скорости охладителя обеспечивают турбулентный характер его течения, что положительно влияет на интенсивность теплообмена между компонентом и стенками каналов изделия.

Однако известно, что при турбулентном режиме течения жидкости в пристеночной зоне образуется тонкий пограничный ламинарный слой [1], теплопередача в котором менее интенсивна по сравнению с турбулентным перемешиванием в основном потоке. Очевидно, что снижение термического сопротивления пристеночного ламинарного слоя потока позволит значительно повысить общую интенсивность охлаждения.

Одним из эффективных способов снижения термического сопротивления пограничного ламинарного слоя является его разрушение выступами-турбулизаторами (рис. 2).

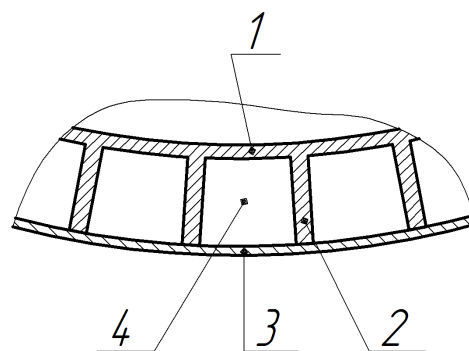


Рисунок 1 – Поперечное сечение типовых каналов охлаждения камер сгорания и сопел ЖРД
1 – «огневая» стенка; 2 – ребро охлаждения; 3 – наружная «рубашка»; 4 – канал охлаждения

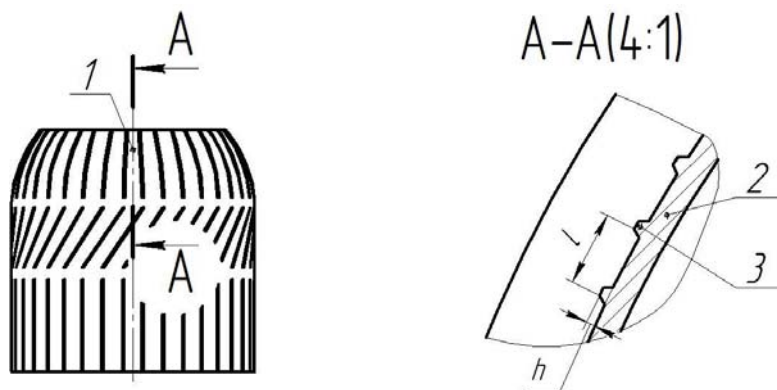


Рисунок 2 – Турбулизаторы на поверхности «огневой» стенки канала охлаждения
1 – канал охлаждения; 2 – «огневая» стенка канала охлаждения; 3 – турбулизатор;
l – шаг турбулизаторов; h – высота турбулизаторов

ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Многочисленными опытами установлено [2], что оптимальным шагом турбулизаторов является расстояние от 12 до 14 их высот:

$$l = 12 \dots 14 \cdot h. \quad (1)$$

Высота турбулизаторов выбирается в зависимости от толщины ламинарного пограничного слоя, которая приближенно может быть определена по эмпирической формуле, полученной из соотношения Кармана [2]:

$$\delta_x = \frac{32,5 \cdot d_z}{\sqrt{\lambda \cdot \text{Re}_{d_z}}}, \quad (2)$$

где $d_z = \frac{4 \cdot S}{\Pi}$ – диаметр гидравлический (S – площадь поперечного сечения потока, Π – смоченный периметр);

λ – коэффициент гидравлического сопротивления гладкого канала;

$\text{Re}_{d_z} = \frac{\rho \cdot W \cdot d_z}{\mu}$ – число Рейнольдса (ρ – плотность жидкости, W – скорость ее течения, μ – динамический коэффициент вязкости).

В [2] рекомендуется использовать высоту выступов-турбулизаторов, равную десятикратной толщине ламинарного слоя, т.е.:

$$h \approx 10 \cdot \delta_x. \quad (3)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ

При известных зависимостях для определения размеров турбулизаторов, исчерпывающие исследования по оптимизации их формы отсутствуют, однако очевидно, что она должна обеспечить максимальное повышение интенсивности теплообмена при минимальном росте гидравлического сопротивления канала.

В [2] и [3] указано, что форма турбулизаторов, не оказывая существенного влияния на интенсивность охлаждения, значительно влияет на гидравлическое сопротивление канала. На рисунках 3, 4 показана скоростная съемка процесса срыва и турбулизации ламинарного потока на выступах прямоугольного и плавного профиля [4].

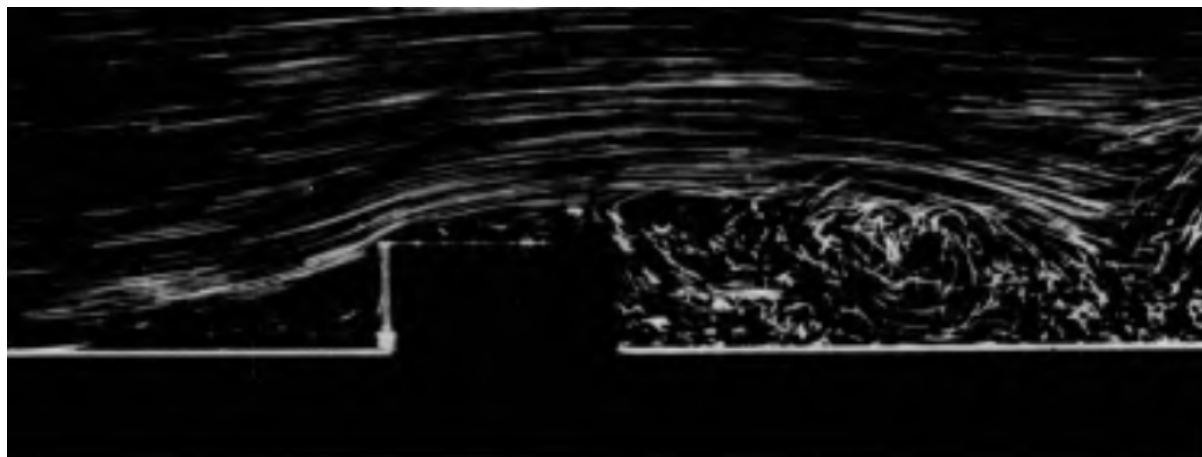


Рисунок 3 – Срыв ламинарного потока на выступе прямоугольного профиля



Рисунок 4 – Срыв ламинарного потока на выступе плавного профиля

При визуальном сравнении представленных изображений видно, что выступ прямоугольного профиля (рис. 3) создает за собой вихревую зону, превышающую его по высоте. Также возникают вихревые структуры над выступом и в угловых зонах, которые значительно повышают гидравлическое сопротивление канала. Так как в нашем случае высота турбулизаторов выбирается больше толщины ламинарного слоя, вихревые структуры, превышающие величину турбулизатора нецелесообразны.

На рисунке 4 видно, что толщина вихревой зоны за выступом плавного профиля примерно соответствует его высоте. Из-за плавного очертания выступа отсутствуют «угловые» вихри.

Нами было проведено моделирование и расчет параметров процесса охлаждения каналов с различным профилем внутренних поверхностей. Исследования проводились для канала без турбулизаторов, с турбулизаторами прямоугольного профиля на одной из стенок, турбулизаторами прямоугольного профиля с скруглением угловых зон (радиусом r_y) и верхних граней (радиусом $r_{в.г.}$) на одной из стенок, турбулизаторами каплеобразного профиля (располовиненный по оси профиль капли с отношением диаметра к длине $d/l=1/2,5$) на одной из стенок и турбулизаторами прямоугольного профиля с скруглением верхних граней и угловых зон на трех сопряженных стенках. Внутренние размеры каналов - $5 \times 5 \times 100$ мм, толщина стенок - 1 мм каждая, заданный материал каналов - медь, шероховатость внутренних стенок - 3,2 мкм. Начальная температура материала стенок - 873 К. В качестве охлаждающей жидкости была задана вода с начальной температурой 293,2 К, постоянным расходом - 0,125 кг/с, постоянным давлением на выходе - 101325 Па. Размеры и шаг турбулизаторов, рассчитанные по формулам (1), (2), (3): $h=0,4$ мм, $l=5,2$ мм. Количество турбулизаторов в случае их размещения на одной из стенок канала - 14; на трех сопряженных стенках - $3 \times 14=42$.

Основные результаты расчета смоделированного процесса охлаждения представлены на рисунке 5 и в таблице 1.

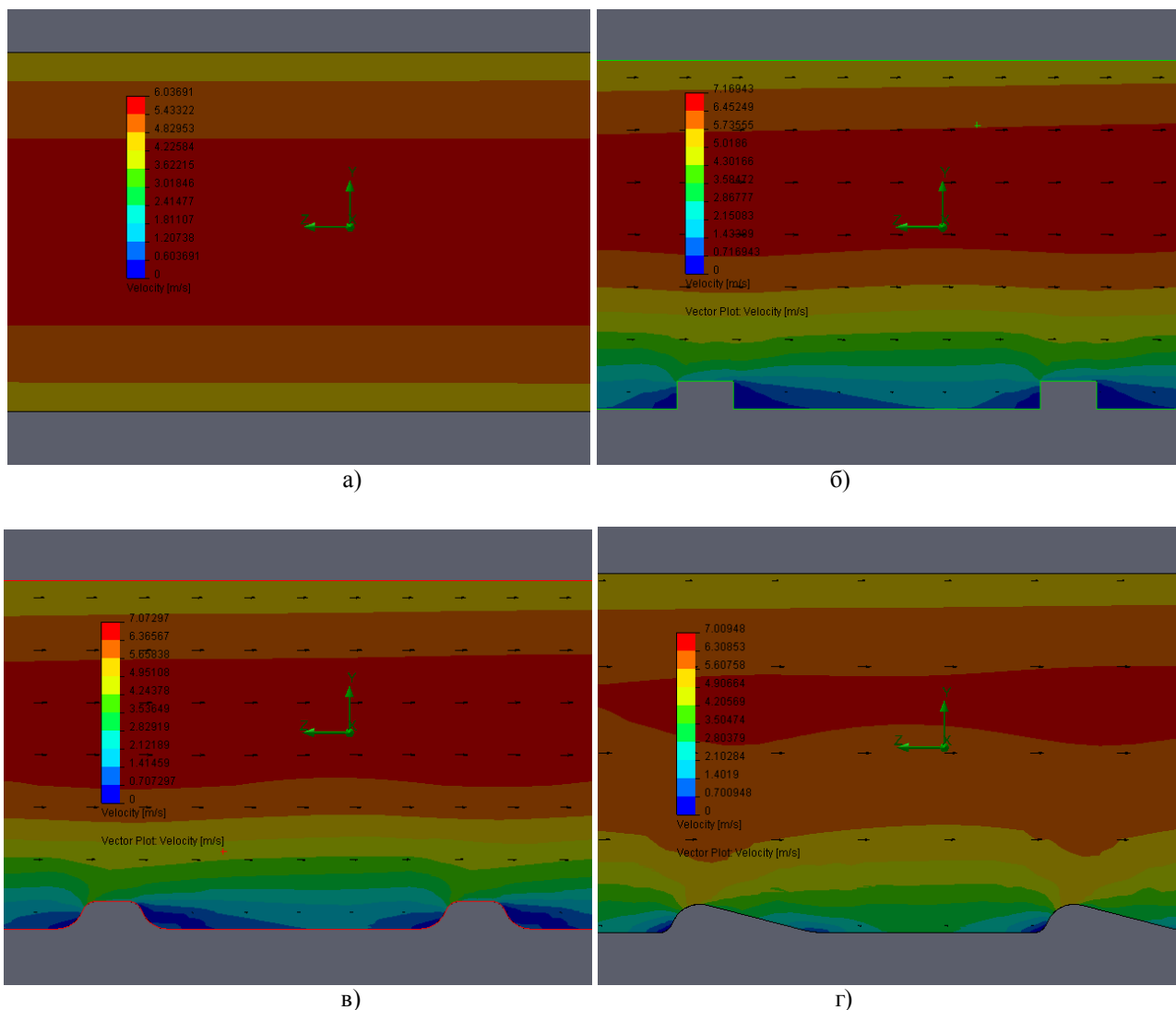


Рисунок 5 – Распределение скоростей потока в каналах с различной конфигурацией внутренних поверхностей стенок
a – канал без турбулизаторов; б – канал с турбулизаторами прямоугольного профиля на одной стенке; в – канал с турбулизаторами плавного профиля на одной стенке; г – канал с турбулизаторами каплеобразного профиля на одной стенке

По величине падения давления $\Delta P = P_{вх.} - P_{вых.}$ можно судить о гидравлическом сопротивлении канала, а по величине падения средней температуры тела канала $\Delta t = t_{нач.} - t_{кон.}$ – о интенсификации охлаждения. Анализ результатов расчета показывают, что переход от прямоугольного профиля турбулизаторов к плавному сопровождается снижением перепада давления, необходимого для прокачки жидкости с постоянным для всех случаев расходом, на 8-10% при ухудшении интенсивности охлаждения на 1-4%, т.е. имеет место опережающее падение гидравлического сопротивления относительно интенсивности охлаждения. При применении турбулизаторов каплеобразной формы с отношением диаметра к длине $d/l=1/2,5$ получены схожие результаты расчета со случаем, когда использовались турбулизаторы прямоугольной формы с плавным скруглением угловых зон и верхних граней радиусами 0,5 и 0,3 мм соответственно, однако изготовление каплеобразных турбулизаторов более сложное. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности применения турбулизаторов прямоугольного профиля с плавным скруглением угловых зон и верхних граней, при этом для каждого конкретного случая необходимо подбирать оптимальные значения радиусов скругления.

Таблица 1 – Интегральные параметры давления и температуры в процессе охлаждения каналов с различной конфигурацией внутренних поверхностей стенок

Конфигурация внутренних поверхностей стенок канала	$P_{вх.}$ - давление на входе в канал, Па	$P_{вых.}$ - давление на выходе из канала, Па	$t_{нач.}$ - температура средняя тела до прокачки воды, К	$t_{кон.}$ - температура средняя тела при прокачке воды, К
Гладкий канал	108446	101325	873	850,088
С турбулизаторами прямоугольного профиля на одной стенке	116353	101325	873	848,696
С турбулизаторами плавного профиля на одной стенке ($r_y=0,4$ мм, $r_{в.г.}=0,2$ мм)	115089	101325	873	849,347
С турбулизаторами плавного профиля на одной стенке ($r_y=0,5$ мм, $r_{в.г.}=0,3$ мм)	114877	101325	873	849,614
С турбулизаторами плавного профиля на одной стенке ($r_y=0,8$ мм, $r_{в.г.}=0,3$ мм)	115026	101325	873	849,579
С турбулизаторами плавного профиля на одной стенке ($r_y=0,8$ мм, $r_{в.г.}=0,6$ мм)	115126	101325	873	849,559
С турбулизаторами каплеобразного профиля на одной стенке ($d/l=1/2,5$)	114913	101325	873	849,548
С турбулизаторами плавного профиля на трех стенках ($r_y=0,4$ мм, $r_{в.г.}=0,2$ мм)	133509	101325	873	847,94

Создание турбулизаторов плавного профиля на трех сопряженных внутренних поверхностях (что имитирует получение выступов на «огневой» стенке и на поверхностях ребер) более существенно увеличивает интенсивность охлаждения, однако при этом одновременно растет гидравлическое сопротивление канала. Применение данной схемы требует более глубокого анализа.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Для максимального повышения эффективности турбулизаторов необходима технология, позволяющая получать эти элементы с необходимой формой профиля и высокой производительностью.

Используемый в настоящее время метод получения турбулизаторов на «огневой» стенке фрезерованного канала охлаждения электроэрозионной обработкой (ЭЭО) не позволяет вести процесс с достаточной производительностью при получении выступов сложного профиля из-за необходимости корректировки электрода-инструмента вследствие его износа [5]. Схема обработки данным методом является довольно сложной, необходимы системы подачи, перемещения электрода-инструмента и т.д. Кроме того, после ЭЭО, вследствие термического влияния данного процесса, в поверхностном слое материала детали могут возникать растягивающие остаточные напряжения, при больших значениях которых возможно трещинообразование, недопустимое в рассматриваемых узлах.

Метод накатки турбулизаторов на «огневой» стенке фрезерованного канала охлаждения более производителен, чем ЭЭО. Однако данная схема также является довольно сложной в реализации, затруднена или отсутствует возможность обработки жестких материалов. Также отсутствуют глубокие исследования влияния процесса деформации материала детали на работу узла при эксплуатации.

Стоит также отметить, что вышеперечисленные методы ЭЭО и накатки турбулизаторов в каналах камер сгорания и сопел не позволяют эффективно получать выступы на поверхностях ребер, вследствие чего в настоящее время не реализуют возможность интенсификации процесса охлаждения за счет данных элементов.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод о целесообразности применения для создания выступов-турбулизаторов метода электрохимической обработки (ЭХО) [5]. Данный метод позволяет обрабатывать практически все известные металлы и сплавы, обладает высокой производительностью при большой площади обработки (что справедливо для рассматриваемого случая при одновременном получении большого числа выступов), позволяет получать поверхности с высокой точностью, низкой шероховатостью, не оставляя каких-либо физико-химических изменений в поверхностном слое. При этом данный процесс может быть осуществлен по безыносной схеме, что актуально, учитывая сложность (и, соответственно, дороговизну) инструмента, и не вызывает погрешности износа.

Исходя из небольшой глубины обработки (обычно не превышает 0,5 мм), целесообразно при получении турбулизаторов методом ЭХО использовать схему с неподвижным электродом-инструментом. Данная схема не требует сложных систем подачи электрода-инструмента и контроля межэлектродного промежутка, более безопасна относительно схемы с подвижным электродом-инструментом в плане возможности возникновения короткого замыкания. Предлагаемые нами схемы проведения ЭХО с неподвижным электродом-инструментом при получении выступов-турбулизаторов на поверхностях канала охлаждения представлены на рисунке 6.

На рисунке 6а, 6б представлена схема ЭХО электродом-инструментом с вырезами на рабочей части. При данной схеме прокачку электролита можно осуществлять как продольно, так и поперечно оси канала. Также можно осуществить прокачку электролита через отверстия в электроде-инструменте, изготовленные в местах вырезов (на рисунках не показано).

На рисунке 6в, 6г представлена схема ЭХО электродом-инструментом с диэлектрическими вставками напротив мест получаемых турбулизаторов. При осуществлении обработки по данной схеме прокачку электролита, возможно, осуществлять в направлении, перпендикулярном оси канала.

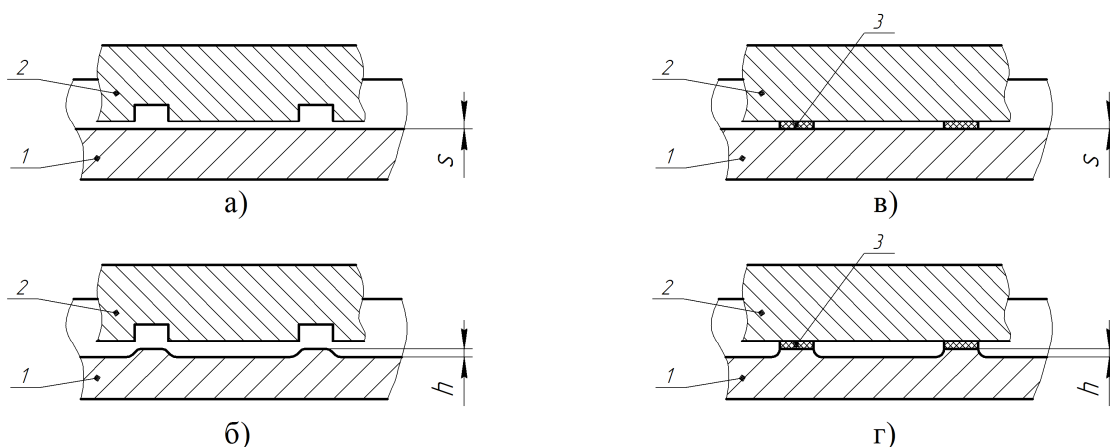


Рисунок 6 – Получение турбулизаторов в каналах охлаждения узлов ЖРД
 а, б – начальный и конечный момент ЭХО по схеме с вырезами на рабочей части электрода-инструмента: 1 – канал; 2 – электрод-инструмент;
 в, г – начальный и конечный момент ЭХО по схеме с диэлектрическими вставками на рабочей части электрода-инструмента: 1 – канал; 2 – электрод-инструмент;
 3 – диэлектрическая вставка; S – начальный межэлектродный зазор;
 h – высота полученного турбулизатора

Нами была произведена обработка имитатора фрезерованного канала охлаждения по схеме рисунка бв, бг. Результаты проведенной работы представлены на рисунке 7.

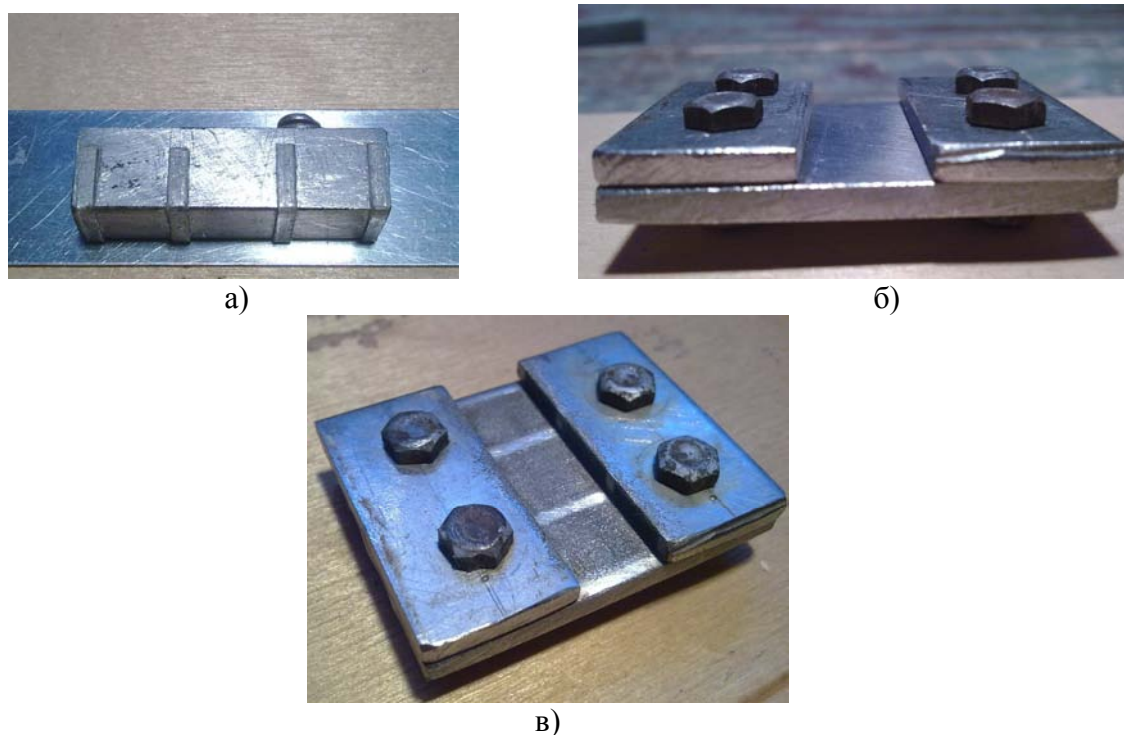


Рисунок 7 – ЭХО имитатора фрезерованного канала охлаждения
 а) – электрод-инструмент; б) – имитатор фрезерованного канала охлаждения до ЭХО;
 в) – имитатор фрезерованного канала охлаждения после ЭХО

Обработка производилась по схеме с неподвижным электродом-инструментом. Начальный межэлектродный зазор, определяемый толщиной диэлектрических вставок – 0,3-0,35 мм. Глубина полученных впадин - $0,1 \pm 0,03$ мм. Шероховатость обработанных поверхностей (поверхностей впадин) – $Ra=0,8-1,6$ мкм. Электролит прокачивался в направлении, перпендикулярном оси канала. При этом были получены выступы на боковых поверхностях, имитирующих ребра.

Представленный метод обработки с прокачкой электролита в направлении, перпендикулярном оси канала, из-за особенностей гидродинамики жидкой среды позволяет получать выступы с плавным профилем сопряжения, что, как было описано выше, положительно влияет на эффективность процесса охлаждения. При этом есть основания полагать, что имеется возможность управления формой профиля турбулизаторов путем изменения гидродинамических параметров прокачиваемого электролита. В настоящее время нами проводятся теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении.

ВЫВОДЫ

Таким образом, метод ЭХО с неподвижным электродом-инструментом позволит эффективно получать турбулизаторы необходимого профиля на поверхностях фрезерованных каналов охлаждения. При этом есть возможность получения выступов на ребрах, что в настоящее время в большинстве случаев не реализуется, но при этом может предоставить возможность повышения общей энергоэффективности двигателя. Кроме того, имеются перспективы использовать ЭХО не только для получения выступов-турбулизаторов, но и для удаления недорезов фрезерования перекрещивающихся каналов [6], а также в качестве замены операций фрезеровки данных каналов [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. С.-Пб, АНО НПО «Мир и семья», 2001. - 1154 с., илл.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; Под ред. В.М. Кудрявцева. – 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. школа, 1983. – 703 с., ил.
3. Калинин, Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.: ил.
4. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ./ Сост. М. Ван-Дейк. – М.: Мир, 1986. – 184 с., ил.
5. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие (в 2-х томах). Т.1. Обработка материалов с применением инструмента / Под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983.-208 с., ил.
6. Коровин, А.А. Эффективные методы удаления недорезов фрезерования при изготовлении перекрещивающихся пазов / А.А. Коровин, В.П. Смоленцев // Студент, специалист, профессионал: материалы 3-й междунаучно-техн. конф., Воронеж, 2010. – С. 47-52.
7. Коровин, А.А. Методы обработки полостей вафельных панелей / А.А. Коровин, В.П. Смоленцев // ТМ – 2010. – Воронеж: ВГТУ, 2010. С. 113-116.

Смоленцев Владислав Павлович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
Тел. 8-904-212-64-43
E-mail: ccorvinartem@mail.ru

Коровин Артем Александрович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Аспирант
Тел. 8-904-212-64-43
E-mail: ccorvinartem@mail.ru

V.P. SMOLENTSEV, A.A. KOROVIN

MAKING OF TURBULENCE PROMOTERS IN COOLING CANALS OF LIQUID-PROPELLANT ENGINES

In article stated results of research of dependence liquid-propellant engines units' current cooling intensity from sizes and shapes of turbulence promoters. There also afford the effective electrochemical method of making them.

Keywords: liquid-propellant engine; cooling; turbulence promoter; electrochemical machining.

BIBLIOGRAPHY

1. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventiljacionnyh sistem. S.-Pb, ANO NPO «Mir i sem'ja», 2001. - 1154 s., ill.
2. Osnovy teorii i rascheta zhidkostnyh raketnyh dvigatelej: uchebnik / A.P. Vasil'ev, V.M. Kudrjavcev, V.A. Kuznecov i dr.; Pod red. V.M. Kudrjavceva. – 3-e izd., ispr. i dop. M.: Vyssh. shkola, 1983. – 703 s., il.
3. Kalinin, Je.K. Intensifikacija teploobmena v kanalakh / Je.K. Kalinin, G.A. Drejcer, S.A. Jarho. – 3-e. izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 208 s.: il.
4. Al'bom techenij zhidkosti i gaza: Per. s angl./ Sost. M. Van-Dejk. – M.: Mir, 1986. – 184 s., il.
5. Jelektrofizicheskie i jelektrohimicheskie metody obrabotki materialov: Ucheb. posobie (v 2-h tomah.). T.I. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta / Pod red. V.P. Smolenceva. – M.: Vyssh. shk., 1983.-208 s., il.
6. Korovin, A.A. Jefferektivnye metody udalenija nedorezov frezerovanija pri izgotovlenii perekrewivajuvihsja pazov / A.A. Korovin, V.P. Smolencev // Student, specialist, professional: materialy 3-j mezhdun. nauchno-tehn. konf., Voronezh, 2010. – S. 47-52.
7. Korovin, A.A. Metody obrabotki polostej vafel'nyh panelej / A.A. Korovin, V.P. Smolencev // TM – 2010. – Voronezh: VGTU, 2010. S. 113-116

Smolenzev Vladislav Pavlovich

Voronezh state technical university, Voronezh
Doctor of technical science, professor
Tel: 8-904-212-64-43
E-mail: ccorvinartem@mail.ru

Korovin Artyom Aleksandrovich

Voronezh state technical university, Voronezh
Post-graduate student
Tel: 8-904-212-64-43
E-mail: ccorvinartem@mail.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 331.1; 378.2

О.П. МУЛЮКИН

ВЫБОР НАУЧНОЙ КАРЬЕРЫ. ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД

Дана оценка и результаты систематизации основополагающих и выделенных автором ранее неосвещаемых мотивов выбора научной карьеры.

***Ключевые слова:** мотивы выбора научной карьеры; ступени карьерной лестницы; процесс творчества; любопытство; полезность людям; научное тщеславие; ореол успеха; боязнь скуки; протекционизм в науке; рынок диссертационных услуг; человеконенавистнические планы «лжеученых».*

Участниками Всероссийского форума «Молодые кадры наукоемких отраслей инновационной России», состоявшегося в МИФИ в 2009г., отмечалось, что «сегодня средний возраст научных сотрудников в стране составляет 40 лет, кандидатов наук – 50, докторов наук – 60, академиков – 70. За кризисные 90-ые годы практически прекратилось воспроизводство научных кадров, а также увеличился разрыв между разными поколениями исследователей».

Такое положение дел в российской науке, безусловно, беспокоит отечественных ученых, размышляющих о ее будущем в рамках ответа на традиционный вопрос: «А кто придет нам на смену?» Волнует это и ученых развивающейся научной школы Самарского государственного университета путей сообщения «Динамика, прочность и виброзащита агрегатов и оборудования транспортных систем», созданной более десяти лет назад автором настоящей статьи [1-3].

Ответ на поставленный вопрос предполагает, прежде всего, исследование мотивов выбора научной карьеры, в том числе, ее привлекательности для творчески одаренной части молодого поколения.

В известных исследованиях, как правило, освещаются позитивные мотивы выбора научной карьеры, и, за редким исключением, негативные, единодушно отвергаемые большинством российских ученых; причем некоторые мотивы, на первый взгляд второстепенные, не получили должного освещения до настоящего времени.

Вышеизложенное предопределило цель настоящей работы – детальное исследование и систематизацию основополагающих и выделенных автором ранее неосвещаемых мотивов выбора научной карьеры в виде блока из десяти составляющих [4-8]:

1. Жажда денег, власти, славы; всепоглощающее стремление быстрого восхождения на высшие ступени иерархической карьерной лестницы.

Общепризнанно, что подлинными учеными крайне редко движут эти мотивы, поскольку для достижения успеха в науке существуют более надежные способы. Очень образно высказался об этом английский математик **Бертран Рассел**: «Стремление к собственности больше, чем что-либо другое мешает людям жить свободно и достойно».

При этом обычно забывается, что материальные символы успеха, - деньги, власть, слава, а, в ряде случаев, условия труда, - это только средства в достижении счастья, которые приносят подчас лишь жалкое его подобие.

2. Удовольствие от научной деятельности, процесса творчества; восхищение красотой закономерностей, бескорыстная любовь к Природе и Правде.

Для большинства ученых фундаментальные научные достижения сопоставимы с нерукотворными творениями Природы (восход Солнца, морской прилив, радуга, грохочущий водопад и др.), - своего рода «зрелищный вид спорта», который не только доставляет удовольствие, но и в котором ученый активно участвует в процессе творчества, раскрытии величественного и прекрасного.

Настоящее научное свершение (раскрытие тайн Вселенной; доказательство теоремы, длительное время неподдающейся доказательству мировому научному сообществу; подтверждение выдвинутой глобальной научной гипотезы и пр.) не только исключительно полезно, но и возвышает нас над заботами повседневной жизни, принося нам умиротворение, безмятежность и счастье.

И если скупец может часами перебирать свои сокровища, то и некоторые ученые, как это ни странно, получают настоящее наслаждение как от непрерывного пополнения своих «научных богатств» (книги, статьи, патенты и др.), так и многократного «перебирания» (обозрения) этих «богатств», - своего рода наглядных средств, подтверждающих свершение когда-то задуманных научных планов.

Необъяснима красота перехода от тайны к закономерности. Чем более разнообразны, необычны и загадочны объекты, тем большее удовлетворение доставляют открывателю обнаруженные им закономерности, в соответствии с которыми эти объекты можно размещать в иерархическом или гармоническом порядке, делающем их доступнее для понимания.

Известно, что мелочная череда каждодневных житейских проблем приглушает наш восторг от соприкосновения с возвышенным, притупляет нашу чувствительность к бескорыстному наслаждению чудесным и величественным в нашем естественном общении с Природой, силой ее Правды. Весьма образно выразился о восприятии Правды учеными немецкий философ-материалист **Людвиг Фейербах**: «Любовь к науке – это любовь к правде, поэтому честность является основной добродетельностью ученого».

Подмечено, что подлинные ученые, даже в глубокой старости, сохраняют романтизм, мечтательный и исполненный воображения склад ума и продолжают жить в мире увлекательного, причудливого, необычного, не перестают изумляться грандиозности и непогрешимому постоянству законов, правящих гармонией Природы внутри и вне человека.

3. Любопытство (любопытность).

Как правило любопытство отождествляется с чем-то дурным, ибо люди склонны смешивать любопытность с пронырливостью. И если любопытный человек хочет узнать лишь то, что как-то касается его, в том числе в области научных интересов, то проныра сует свой нос в личные дела других, вызывая в них возмущение, а порой и ярость. Очень остроумно выразился по поводу проныр немецкий писатель-гуманист **Севастьян Брант**: «Кто сует повсюду нос, бывает часто бит, как пес».

Настоящего ученого любопытство одолевает всю творческую жизнь, без него он не может жить. И если исследователь теряет эту побудительную силу, - потому ли, что его усилия слишком часто заканчивались неудачей или потому, что он самодовольно удовлетворился «научными достижениями», - ученый сразу же удаляется от науки, находя прибежище в самооплакивании или чванливой гордости своим благополучием.

4. Желание приносить пользу, быть полезным людям.

Это один из самых действенных мотивов в научной деятельности большинства ученых. Французский физиолог **Шарль Рише** выразился по этому поводу очень четко: «И все ученые, все без исключения, поддерживают себя в своих тяжелых трудах этой величественной мечтой – принести пользу своим человеческим собратьям».

Первый шаг в этом направлении – создание из обыденной жизни картины мира (дело чистой науки), второй (дело техники) – использование картины мира а практических целях. Как первое, так и второе одинаково важны, и каждое из них целиком поглощает каждого отдельного исследователя, стремящегося продвинуть свое дело и осознанно сосредотачивающего все свои силы на решение одного-единственного вопроса, оставляя на потом мысли о всех других интересах. В связи с этим не следует осуждать такого ученого за его отчужденность от текущих жизненных проблем, за его индифферентность к важным вопросам общественной жизни. Без такой односторонней ориентированности **Генрих Герц** никогда бы не открыл беспроволочные волны, а **Генрих Кох** – туберкулезную бациллу.

Каковы бы ни были сознательные мотивы ученых, многие из них обладают искренним желанием быть полезными обществу. Вот почему даже среди тех, кто занимается фун-

даментальными исследованиями, не ожидая от них в ближайшее время никакого практического выхода, лишь немногие лишены надежды, что в далеком будущем их открытия будут полезны людям.

5. Потребность в одобрении и жажда авторитета.

Выдающийся немецкий физик, основатель квантовой теории **Макс Планк** как-то отметил, что «сознание значимости своей работы является счастьем для исследователя. Оно является полноценной наградой за те различные жертвы, которые он постоянно приносит в повседневной жизни».

Ученые, как правило, индивидуалисты и тщеславны, то есть горят желанием осознавать, что открыли некий важный закон Природы исключительно с помощью собственного разума и изобретательности. И не надо этого стыдиться, что подтверждает известный английский продюсер **Уильям Вудворт**: «Тщеславие без сомнения, принесло гораздо больше цивилизации, чем скромность».

Причем чем более велик ученый, тем меньше число людей, мнением которых он дорожит. Ученых, входящих вместе с ним в интеллектуальную элиту конкретной научной деятельности, он воспринимает как равных себе и чувствует глубокое удовлетворение от того, что благодаря своей работе приобрел духовное родство с ними, с равнодушием взирая на всякую мелочную ненависть и зависть, разделяющих других, в том числе по отношению к нему.

6. Ореол успеха, преклонение перед научными светилами и желание им подражать.

Ни один ученый не появляется спонтанно, так как «все мы стоим на плечах своих предшественников». Но в отличие от сына по крови сын по разуму может, по крайней мере, выбрать себе родителя-ученого. И вполне понятны преклонение ученых перед научными светилами и желание им подражать. Причем присущий научным авторитетам ореол успеха является своего рода маяком для ученого, находящегося в начале длительного «научного плаванья». Еще великий русский полководец **А.В. Суворов** советовал: «Возьми себе образец героя древних времен, наблюдай его, иди за ним вслед, поровняйся, обгони – слава тебе!» С ним солидарен великий русский писатель **И.С. Тургенев**: «Жалок тот, кто живет без идеала».

Многим своим достижениям на научном поприще я обязан профессору Самарского государственного аэрокосмического университета **Дмитрию Евгеньевичу Чегодаеву**, которого знал лично, с которым дружил и который ввел меня в многогранный мир науки. Это был настоящий человек и истинный ученый. Он оказал на меня огромное влияние, и на всю свою жизнь я сохраню к нему большую привязанность и, не побоюсь этого сказать, любовь. Как много идей Д.Е. Чегодаева я воспринял и считаю своим долгом продолжить их развитие в память о своем учителе-друге.

7. Боязнь скуки.

Об этом мотиве очень редко упоминается, хотя боязнь скуки – один из наимоощнейших мотивов в науке, действующих эффективно и беспощадно отсекающий все пути к отступлению.

Не надо никого убеждать, что движение – это жизнь, и все живые существа должны находиться в постоянном движении (человек трудиться, птица летать, рыба плавать, растения расти и т.д.) или должны погибнуть.

Вынужденное безделье, - будь оно следствием лени человека или отстранения его от дел не по своей воле, - порождает в нем чувство неуверенности в себе, депрессию, ипохондрическую озабоченность состоянием своего тела и разума. Занятый человек не имеет времени на решение даже самых серьезных проблем, а бездействующий изводит себя, чтобы как-то убить время.

Творческие люди постоянно заняты интенсивным поиском «духовных отдушин», и если они уже приобрели вкус к серьезным умственным упражнениям, то все другое в сравнении с этим, представляется им не стоящим внимания. Мало кто из настоящих ученых увлекается еще чем-то кроме науки (как правило, у них нет даже хобби), причем именно боязнь скуки с такой же силой не дает им заняться «мирскими» делами, с какой страсть к науке влечет их к исследованиям.

8. Протекционизм в науке, - вовлечение в науку случайных людей, не способных к научной деятельности.

В основе такого протекционизма могут лежать следующие причины:

- увеличение числа защищающих диссертации для повышения значимости (престижности) отдельного ученого или действующей научной школы, в целом;
- формирование «научной» свиты самовлюбленным руководителем-ученым, в том числе, как для повышения собственного научного авторитета в глазах окружающих, так и для создания условий, гарантирующих ему получение различных научных наград, премий и других отличий, в том числе государственного ранга;
- вовлечение в науку лиц, оказывающих ученым значительную материально-техническую подпитку и финансовую помощь при осуществлении крупных научных проектов (создание научных центров; материально-техническое оснащение открываемых лабораторий и дооснащение действующих; организация и проведение конференций, выставок; обеспечение длительных научных стажировок за границей и пр.) или при решении их личных проблем, не имеющих к науке никакого отношения (предоставление различных общественных благ; вовлечение в коммерческие структуры при сращивании научных и финансовых элит и др.);
- приобщение к науке далеких от нее лиц вследствие приятельства, кумовства и родственных связей («ну как не порадовать родному человечку») и иных меркантильных интересов.

9. Деятельность платного «рынка диссертационных наук».

Готовить и защищать диссертацию некоторых людей побуждают меркантильные интересы, так как степень кандидата или доктора наук немаловажна в материальном отношении – прибавка в вузах и НИИ составляет соответственно 3000 и 7000 руб. в месяц. И нередки случаи, когда часть из этих людей, не способных к серьезной научной деятельности, обращается «за помощью» к платному рынку диссертационных услуг, ибо принцип «Все продается и все покупается» пробивает себе дорогу и в образовании. Как известно, аспирантуры открыты во многих негосударственных университетах, институтах и академиях. В то же время государственные вузы набирают аспирантов не только на бюджетные, но и на платные места: 50000 – 150000 руб. в год (в зависимости от вуза и специальности), - и через три-четыре года Вы кандидат наук.

Также не секрет, что сегодня в ряде вузов страны есть «черные» прайсы. «Научные рабы», как правило, из числа самих же преподавателей вузов, берут в среднем по 8-10 тысяч «зеленых», чтобы состряпать на самом высоком уровне кандидатские диссертации. При этом гарантируется полная конфиденциальность и создание режима наибольшего благоприятствования при защите степеней в диссертационных советах. Диссертации – как и все – стали товаром и только «слепой» не заметит в Интернете десятки сайтов, где за строго фиксированную цену вам обещают сделать диссертацию под ключ (выбор темы и научного руководителя, организацию публикаций, написание и защиту диссертации). По поводу подготовки «ученых» такого рода очень образно выразился французский писатель-моралист **Эдм-Пьер Бошен**: «Образование может превратить дурака в ученого, но оно никогда не изгладит первородного отпечатка».

10. Стремление к использованию и совершенствованию средств науки для осуществления человеконенавистнических планов в отношении общин иного вероисповедания, отдельно взятого общества, отдельных рас и народов, человечества в целом.

К таким «ученым» следует отнести опасных для общества психически неуравновешенных людей с большим воображением, чрезмерными амбициями и манией величия, неприемлющих принципы и идеалы цивилизованного общества, людей с реваншистскими устремлениями, шовинистов и т.д. На опасность, исходящую от этих «ученых» указывал еще много веков назад греческий философ-ученый **Аристотель**: «Природа дала человеку в руки оружие – интеллектуальную моральную силу, но он может пользоваться этим оружием и в обратную сторону, поэтому человек без нравственных устоев оказывается существом и самым нечестивым и диким, низменным в своих половых и вкусовых инстинктах».

Эти люди, в силу отторжения цивилизованным обществом их опасных взглядов, способны к генерированию «научных» идей и технических средств, нацеленных против общепринятых человеческих ценностей. И долг каждого настоящего ученого всегда и всюду противодействовать осуществлению планов таких «ученых».

ВЫВОДЫ

1. Тезисно охарактеризована актуальность проблемы вовлечения в российскую науку представителей молодого поколения.
2. Представлены результаты исследования и систематизации основополагающих и выделенных автором ранее неосвещаемых мотивов выбора научной карьеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулюкин, О.П. Философские аспекты вхождения в науку студентов технического вуза [Текст] / А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин, С.Ф. Родионов // Наука и культура России: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Дню славянской письменности и культуры, памяти равноапостольных Кирилла и Мефодия (12-13 мая 2004 года). – Самара: СамГАПС, 2004. – С.8-11.
2. Мулюкин, О.П. К оценке интеллектуальных, физических и морально-волевых качеств молодого ученого [Текст] / А.В. Ковтунов, В.А. Финогонова, О.П. Мулюкин // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: Материалы VI Всероссийской дистанционной научно-практической конференции. – Самара: СамГУПС, 2010. – С.113-115.
3. Мулюкин, О.П. Виды и этапизация профессиональной научной карьеры: принципы и правила реализации карьерной стратегии [Текст] / А.В. Ковтунов, О.П. Мулюкин, В.А. Носков // Вестник транспорта Поволжья. - №2 (19). - Самара: СамГУПС, 2011. – С.20-23.
4. Мулюкин, О.П. Концепция развития российской науки [Текст] / Д.Е.Чегодаев, О.П. Мулюкин // Сборник статей: Управление организационно-техническими системами: моделирование взаимодействий, принятие решений. – Самара: СГАУ, 1997. – С.190-196.
5. Старобинский, Э.Е. Как управлять персоналом: Монография [Текст] / Э.Е. Старобинский. – М.: АО «Бизнес-школа» «Интел-Синтез», 1995. – 240с.:ил.
6. Ганс Селье. От мечты к открытию: Как стать ученым: Монография [Текст] / Ганс Селье – Пер. с англ. Н.И. Войскунской; Общ. Ред. М.Н. Кондрашовой, И.С. Хорола; Послесл. М.Г. Ярошевского, И.С. Хорола. – М.: Прогресс, 1987. – 368с.:ил.
7. Мулюкин, О.П. Путь в науку: от первых статей к технической диссертации: Монография [Текст] / В.А. Барвинок, О.П. Мулюкин, А.Н. Кирилин и др. – М: Наука и технология, 2004. – 330с.:ил.
8. Мулюкин, О.П. Как преуспеть в науке или всерьез и с шуткой о научной карьере: Монография [Текст] / О.П. Мулюкин. – Самара: СамГУПС, 2010. – 293с.: ил.

Мулюкин Олег Петрович

Самарский государственный университет путей сообщения

Доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Инженерная графика»

Заслуженный изобретатель Российской Федерации, Заслуженный деятель наук Российской Федерации
443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19

Тел.: 8-963-916-06-34

E-mail: om46@mail.ru

O.P. MULYUKIN

THE CHOICE OF SCIENTIFIC CAREER. INNOVATIVE APPROACH

The evaluation and the results of systematization of primary motivations for choosing a scientific career, pointed out by the author but not aforementioned in general, are presented.

Keywords: *motivations for choosing a scientific career; career ladder steps; creative process; curiosity; utility for people; scientific vanity; aura of success; fear of boredom; scientific protectionism; dissertations market service; sciolists' misanthropic plans.*

BIBLIOGRAPHY

1. Muljukin, O.P. Filosofskie aspekty vhozhenija v nauku studentov tehničeskogo vuza [Tekst] / A.V. Kovtunov, O.P. Muljukin, S.F. Rodionov // Nauka i kul'tura Rossii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, posvjawennoj Dnju slawjanskoj pis'mennosti i kul'tury, pamjati rawnoapostol'-nyh Kirilla i Mefodija (12-13 maja 2004 goda). – Samara: SamGAPS, 2004. – S.8-11.
2. Muljukin, O.P. K ocenke intellektual'nyh, fizičeskix i moral'no-volevyh kachestw molodogo uče-nogo [Tekst] / A.V. Kovtunov, V.A. Finogenova, O.P. Muljukin // Aktual'nye problemy razwitija transportnogo kompleksa: Materialy VI Vserossijskoj distancionnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. – Samara: SamGUPS, 2010. – S.113-115.
3. Muljukin, O.P. Vidy i jetapizacija professional'noj nauchnoj kar'ery: principy i pravila reali-zacii kar'ernoj strategii [Tekst] / A.V. Kovtunov, O.P. Muljukin, V.A. Noskov // Vestnik transporta Povol-zh'ja. - №2 (19). - Samara: SamGUPS, 2011. – S.20-23.
4. Muljukin, O.P. koncepcija razwitija rossijskoj nauki [Tekst] / D.E.Chegodaev, O.P. Muljukin // Sbornik statej: Upravlenie organizacionno-tehničeskimi sistemami: modelirovanie wzaimodejstwij, pri-njatje reshenij. – Samara: SGAU, 1997. – S.190-196.
5. Starobinskij, Je.E. Kak upravljat' personalom: Monografija [Tekst] / Je.E. Starobinskij. – M.: AO «Biznes-shkola» «Intel-Sintez», 1995. – 240s.:il.
6. Gans Sel'e. Ot mečty k otkrytiju: Kak stat' učenym: Monografija [Tekst] / Gans Sel'e – Per. s angl. N.I. Vojskunskoj; Obw. Red. M.N. Kondrashovoj, I.S. Horola; Poslesl. M.G. Jaroshevskogo, I.S. Horola. – M.: Progress, 1987. – 368s.:il.
7. Muljukin, O.P. Put' v nauku: ot pervyh statej k tehničeskoj dissertacii: Monografija [Tekst] / V.A. Barvinnok, O.P. Muljukin, A.N. Kirilin i dr. – M: Nauka i tehnologija, 2004. – 330s.:il.
8. Muljukin, O.P. Kak preuspet' v nauke ili vserez i s shutkoj o nauchnoj kar'ere: Monografija [Tekst] / O.P. Muljukin. – Samara: SamGUPS, 2010. – 293s.: il.

Muljukin Oleg Petrovich

Samara state university of communication lines

Doctor of technical science, professor, head of department “Engineering graphics”

Honored inventor of the Russian Federation, honored science worker of the Russian Federation

443066, Samara, 1st Bezymjanny per., 19

Tel. 8-963-916-06-34

E-mail: om46@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье анализируется практика применения метода анализа иерархий при проектировании вариативной части образовательной программы по подготовке специалистов среднего звена в области технической эксплуатации и обслуживания электрического и электромеханического оборудования

Ключевые слова: *метода анализа иерархий, специалист, техническая эксплуатация, электрическое оборудование, электромеханическое оборудование, вариативная часть, образовательная программа*

Образовательная программа по специальности 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования» ориентирована на подготовку специалистов по организации и проведению работ по техническому обслуживанию, ремонту и испытанию электрического и электромеханического оборудования, объектами профессиональной деятельности которых являются технологическое оборудование и технологические процессы, технологическая оснастка, электрическое и электромеханическое оборудование, материалы и комплектующие изделия, средства измерения, техническая документация и т.д. Основными видами деятельности специалистов является организация технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования, выполнение сервисного обслуживания бытовых машин и приборов, а также организация деятельности производственных подразделений и выполнение работ по одной из рабочих профессий (например, электромонтажник). Молодые специалисты в области технической эксплуатации и обслуживания электрического и электромеханического оборудования наиболее востребованы на предприятиях электротехнической промышленности, машиностроения, топливно-энергетического комплекса, транспорта, агропромышленного комплекса, коммунального хозяйства и строительства [2].

Современная электротехническая промышленность России, являющаяся одной из девяти подотраслей машиностроительного комплекса страны – это турбо- и гидрогенераторы, низковольтная аппаратура и системы управления, силовые полупроводниковые приборы, высоковольтная аппаратура и трансформаторы, магистральные электровозы, аккумуляторы и крупные электротехнические печи, электродвигатели и источники света, провода, кабели, товары бытового назначения и многие другие виды изделий. Электротехническая промышленность поставляет оборудование практически во все отрасли экономики и социальную сферу; ее основными потребителями являются топливно-энергетический комплекс, аграрный комплекс, оборонная промышленность, коммунальное хозяйство и транспорт. Наиболее емкими потребителями электротехнической продукции являются отрасль капитального строительства, ремонтно-эксплуатационные фирмы, машиностроительное производство (комплектация оборудования) и гражданское население.

Перспективные исследования российских ученых в области развития электротехнической отрасли по материалам диссертационных исследований (2006 - 2011 гг.) ориентированы на создание новых видов оборудования и его использования в нескольких направлениях.

– Материаловедение для электротехнической отрасли и энергоснабжения: «Влияние конструкции кабельных изделий на процесс теплового старения полимерных материалов» (Анисимова О.А, Томск, 2010); «Композиционные материалы диэлектрик-проводник (высокотемпературный сверхпроводник) для электроэнергетики» (Егоров Н.Ю., Санкт-Петербург, 2007); «Применение тонкопленочных устройств в электроозонаторах» (Разнован О.Н., Краснодар, 2007); «Разработка и исследование противокоррозионных покрытий ленточного типа для

современных способов изготовления систем изоляции высоковольтных электрических машин» (Кокцинская Е.М., Санкт-Петербург, 2007); «Разработка и исследование кабеля с пленко-пористо-пленочной изоляцией для широкополосного абонентского доступа» (Баннов В.В., Москва, 2010) и др.

– Оборудование для электроэнергетики: «Разработка методики обеспечения качества электроэнергии от напряжения 0,4 кВ до 220 кВ в условиях реформирования энергетики» (Зеленкова Л.И., Москва, 2009); «Повышение электромагнитной совместимости в системах энергоснабжения при гармоническом воздействии (Ордабаев М.Е., Москва, 2009); «Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством совершенствования сетевого автоматического резервирования» (Астахов С.М., Липецк, 2007); «Разработка методов расчета удельного расхода электроэнергии в системе электротехнического комплекса» (Вдовин А.М., Казань, 2005); «Разработка методики выбора сечений проводников и кабелей при проектировании объектов второго уровня систем электроснабжения» (Хазиев Д.Н., Москва, 2002); «Теория конструирования оптических кабелей для эксплуатации при многофакторных воздействиях» (Геча Э.Я., Москва, 2008); «Макромоделирование подсистем промышленного электроснабжения на основе частотных характеристик» (Стасовский О.Н., Краснодар, 2004); «Непрямое адаптивное управление электроприводом постоянного тока» (Лопатин А.А., Красноярск, 2006); «Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением» (Соломатин А.А., Липецк, 2006); «Ограничение воздействия кратковременных нарушений электроснабжения на промышленных потребителей» (Забелкин Б.А., Казань, 2008); «Развитие теории переходных процессов при замыкании на землю, разработка методов и средств повышения надежности работы электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью» (Рыжкова Е.Н., Москва, 2009);

– Электроснабжение технологического и промышленного оборудования машиностроения: «Гибкие электротехнические комплексы для электроснабжения технологического оборудования» (Томашевский Ю.Б., Саратов, 2005); «Теплогенерирующий комплекс на основе электромеханического преобразователя энергии с короткозамкнутыми вторичными обмотками» (Уханов С.В., Комсомольск-на-Амуре, 2009); «Исследование и разработка современных систем изоляции статорных обмоток высоковольтных турбо- и гидрогенераторов повышенной мощности» (Азизов А.Ш., Санкт-Петербург, 2009) и др.

– Электротехнические устройства и приборы: «Комплекс методов определения работоспособности силовых трансформаторов без отключения с использованием экспертных оценок» (Карчин В.В., Казань, 2008); «Комбинированные системы регулирования напряжения с элементами искусственного интеллекта для бесконтактных синхронных генераторов» (Асадуллин В.М., Уфа, 2009); «Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода с системой управления углом между векторами тока статора и ока намагничивания» (Корчагина В.А., Липецк, 2009); «Методика определения эффективности электроприводов гелиоустановок с концентрацией потока лучистой энергии» (Пшеннов В.Б., Москва, 2009); «Резонансные полупроводниковые преобразователи частоты для электротехнологий» (Сосновский Д.А., Уфа, 2008); «Разработка системы управления движением сканирования установки магнетронного вакуумного напыления» (Нечаев М.А., Томск, 2010) и др.

– Электроснабжение, автоматизация и электрооборудование на транспорте: «Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом» (Коняхин С.Ф., Москва, 2006); «Выбор рациональной структуры, основных компонентов и систем управления электротрансмиссией гусеничных машин» (Назаров С.В., Москва, 2007); «Частотно-каскадный электропривод большегрузных автотранспортных средств с импульсным регулированием скольжения тяговых двигателей» (Полуказаков А.В., Воронеж, 2010); «Автоматизация диспетчерского управления электроснабжением железнодорожного транспорта» (Сиромаха В.Н., Москва, 2009); «Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза» (Алексеев А.С., Москва, 2009) и др.

– Электроснабжение и технологическое электрооборудование для горнодобывающей и топливной промышленности: «Обеспечение показателей надежности нефтепогружных кабелей на стадии изготовления и в процессе эксплуатации» (Фризен А.Н., Томск, 2007); «Обоснование и выбор структур системы управления электроприводом шахтной подъемной установки» (Решетняк С.Н., Москва, 2010); «Разработка и исследование электропривода для нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем» (Окунева Н.А., Москва, 2008); «Обоснование и выбор структур управления электроприводами исполнительных органов горных машин в энергосберегающих режимах» (Пейль Н.Г., Москва, 2007); «Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса вспомогательного оборудования нефтегазодобывающего предприятия» (Смирнова С.И., Санкт-Петербург, 2011); «Силовая электромагнитная импульсная система для наземной сейсморазведки малых глубин» (Вырыханов Д.А., Саратов, 2006) и др.

– Электроснабжение, автоматизация и технологическое электрооборудование литейной промышленности и машиностроения: «Литейный асинхронный электропривод двойного питания с нечетким регулятором» (Кольцова В.В., Воронеж, 2005); «Влияние параметров системобразующих связей на режимы и процессы в промышленных электротехнических системах» (Лебедев А.А., Москва, 2009); «Модернизация многосвязной системы электропривода листового стана холодной прокатки» (Бодров Е.Э., Магнитогорск, 2010); «Интеллектуальный электропривод на основе вентильного двигателя для запорной арматуры» (Шабуров П.О., Челябинск, 2009); «Разработка автоматизированного электропривода прокатного проволочного блока с промежуточной неприводной клетью» (Малахов О.С., Магнитогорск, 2006); «Методика расчета мощности главного электропривода станков с учетом вероятностных характеристик нагрузки» (Максименко Э.О., Нижний Новгород, 2007); «Совершенствование системы управления электроприводами основных механизмов машины непрерывного литья заготовок» (Красильников С.С., Магнитогорск, 2010); «Повышение точности системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи за счет позиционирования нелинейной характеристики регулятора» (Кожеуров В.Н., Екатеринбург, 2007) и др.

– Электроснабжение и технологическое электрооборудование предприятий агропромышленного комплекса и строительства: «Исследование и выбор энергосберегающих режимов электроснабжения животноводческих комплексов и птицефабрик» (Храмцов Р.А., Кемерово, 2006); «Исследование и разработка математических моделей и методики расчета электрических нагрузок жилых зданий» (Саков В.В., Москва, 2007); «Повышение эффективности циркуляционных систем горячего водоснабжения средствами регулируемого электропривода» (Штин Е.Н., Москва, 2010) и др.

В этой связи, по нашему мнению, при разработке вариативной части образовательной программы по специальности 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования» следует учитывать основные тенденции развития современного научного знания в области электрооборудования и электроснабжения, отраженные в вышеперечисленных работах. Поэтому образовательная программа по специальности 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования», реализация которой будет осуществляться на базе Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» (г. Орел), ориентирована не только на подготовку специалистов среднего звена и высококвалифицированных рабочих, но и на создание условий для профессионального становления молодых специалистов, заинтересованных впоследствии в получении не только высшего, но и, возможно, послевузовского образования. В ней учитывалась необходимость формирования фундамента социально-профессиональных компетенций, наличие которых позволит молодым специалистам работать в новых условиях наукоемкого производства и эксплуатации наукоемкой техники.

Решение этого вопроса вдвойне актуально, т.к. на протяжении ряда последних лет резко возрос среди абитуриентов интерес к получению этой специальности (рис. 1 и 2).

Таким образом, коллектив разработчиков предлагает внести в вариативную часть (профессиональные модули) образовательной программы по специальности 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования» изучение таких разделов как «Измерительная техника», «САПР электрических схем», «Вычислительная техника», «Детали машин и механизмов», «Микроконтроллеры и микропроцессоры», «Автоматика», «Автоматизация производства», «Правила устройства электроустановок», «Компьютерный анализ данных технических измерений» [1]. Они позволят сформировать систему конкурентных преимуществ молодых специалистов в области технической эксплуатации и обслуживания электрического и электромеханического оборудования на региональном рынке труда [2]. К ним относятся наличие практического опыта:

- организации технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования;

- применения прикладного программного обеспечения и информационно-коммуникативных технологий, обеспечивающих эффективное решение профессиональных задач;

- обслуживания и эксплуатации электрического и электромеханического оборудования и сервисного обслуживания бытовых машин и приборов;

- проектирования и конструирования микроконтроллерной и микропроцессорной техники;

- программирования и отладки программного обеспечения микроконтроллерных и микропроцессорных систем;

- настройки и ремонта микроконтроллерной и микропроцессорной техники;

- применения элементов автоматизированного управления к электрическому и электромеханическому оборудованию;

- разработки и изготовления автоматических электротехнических приборов и устройств [5];

- применения правил безопасной эксплуатации электроустановок потребителей;

- безопасного снятия напряжения в электроустановке, оказания первой медицинской помощи пострадавшему при поражении электрическим током;

- оформления и ведения технической документации при выполнении электротехнических работ, относящихся к категории «особо опасных»;

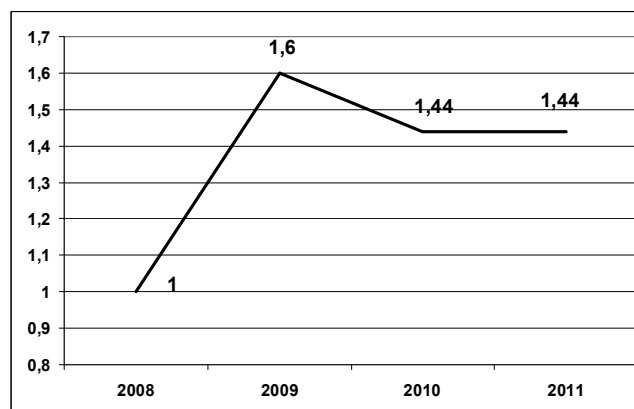


Рисунок 1 – Динамика формирования конкурса (чел./место) абитуриентов на специальность 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электротехнического оборудования» (ФСПО, Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», 2008 – 2011 гг.)

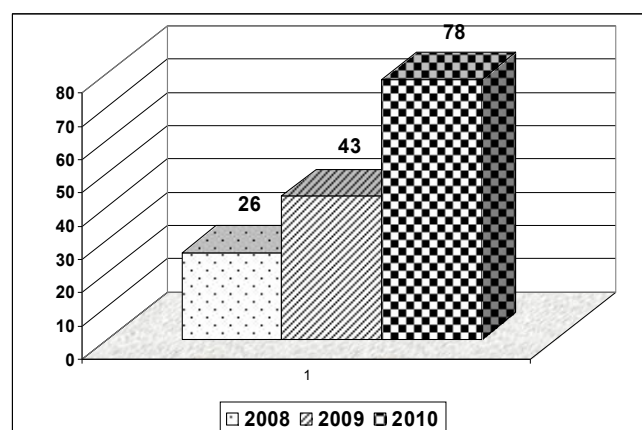


Рисунок 2 – Динамика формирования проходного балла на специальность 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электротехнического оборудования» (ФСПО Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», 2008 – 2010 гг.)

- использования инструментарий статистического наблюдения при организации технического эксперимента;
- применения знаний в области правил устройства электроустановок, необходимых для сдачи обязательных экзаменов по электробезопасности на промышленных предприятиях для получения категории допуска к работе по эксплуатации и обслуживанию электроустановок;
- формирования ряда распределения данных технического эксперимента;
- проведения анализа вариационных рядов распределения данных технических экспериментов и выполнения их геометрической интерпретации;
- формирования корреляционно-регрессионной модели взаимосвязи признаков, полученных на основании данных технических измерений, в том числе, с применением прикладного программного обеспечения;
- формирования прогнозной модели процесса и ее применения для прогнозирования ряда динамики данных технических измерений.

ВЫВОДЫ

При проектировании системы конкурентных преимуществ специалистов за счет средств вариативной части ФГОС целесообразно учитывать не только материально-технические и кадровые возможности образовательного учреждения, реализующего образовательную профессиональную программу. Актуальным является исследование перспектив внедрения в производственную и социально-экономическую среду регионов результатов современных научных разработок и современной наукоемкой продукции с тем, чтобы молодые специалисты по окончании учебного заведения имели высокий уровень адаптивности к новым наукоемким объектам их профессиональной деятельности [3]. При этом компетентностную базу профессиональной адаптивности составляют профессиональные знания, умения и практические навыки, для индикации наличия и оценки уровня сформированности которых целесообразно использовать современные методы тестовой квалиметрии профессиональных кадров [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко, С.В. Специфика формирования практикоориентированного содержания подготовки специалистов в области автоматизации машиностроительных производств / С.В. Дьяченко, Ю.К. Сотников, Т.А. Ноздрачева, А.В. Морозова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2011. – № 3(287). – С. 135-144.
2. Иновационное развитие и кадровое обеспечение современного машиностроения: моногр. / О.В. Авдейчик, В.М. Александров, А.В. Морозова и др.; под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 226 с.
3. Морозова, А.В. Управление профессиональной социализацией студентов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения: моногр. / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 230 с.
4. Морозова, А.В. Методологические основы тестовой квалиметрии профессиональных кадров в машиностроении: моногр. / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 280 с.
5. Ноздрачева, Т.А. НИРС как фактор профессионально-ролевой дифференциации студентов профессионального колледжа / Ноздрачева Т.А., Сотников Ю.К., Морозова А.В. // *Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2009. – № 3-2/275(561). – С. 123-127.

Морозова Анна Валентиновна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Кандидат социологических наук, заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 55-55-24

E-mail: niotiostu@gmail.com

Егоров Михаил Васильевич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Преподаватель кафедры электротехнических дисциплин Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 55-51-45

A.V. MOROZOVA, M.V. YEGOROV

DEVELOPMENT OF COMPETITIVE ADVANTAGE SYSTEM FOR EXPERTS IN TECHNICAL MAINTENANCE OF ELECTRICAL AND ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT

This paper reports the analysis of application practices of the method for hierarchy analysis at design of a variation part in the curriculum for experts of operating level in technical maintenance and service of electrical and electromechanical equipment

Key words: *hierarchy analysis method, expert, technical maintenance, electrical equipment, electromechanical equipment, variation part, curriculum*

BIBLIOGRAPHY

1. D'jachenko, S.V. Specifika formirovanija praktikoorientirovannogo sodержaniya podgotovki spe-cialistov v oblasti avtomatizacii mashinostroitel'nyh proizvodstv / S.V. D'jachenko, Ju.K. Sotnikov, T.A. Nozdracheva, A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2011. – № 3(287). – S. 135-144.
2. Innovacionnoe razvitie i kadrovoe obespechenie sovremennogo mashinostroenija: monogr. / O.V. Avdejchik, V.M. Aleksandrov, A.V. Morozova i dr.; pod red. A.V. Kiricheka i A.V. Morozovoj – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. – 226 s.
3. Morozova, A.V. Upravlenie professional'noj socializaciej studentov v uslovijah mnogourovnevoj praktikoorientirovannoj sistemy podgotovki kadrov dlja mashinostroenija: monogr. / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 230 s.
4. Morozova, A.V. Metodologicheskie osnovy testovoj kvalimetrii professional'nyh kadrov v mashi-nostroenii: monogr. / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 280 s.
5. Nozdracheva, T.A. NIRS kak faktor professional'no-rolevoj differenciacii studentov profes-sional'nogo kolledzha / Nozdracheva T.A., Sotnikov Ju.K., Morozova A.V. // Izvestija OrelGTU. Serija Funda-mental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2009. – № 3-2/275(561). – S. 123-127.

Morozova Anna Valentinovna

State University – ESPC, Orel

Candidate of sociological science, deputy director in research engineering of Technological institute named by N.N.Polikarpova

Tel. 4862-55-55-24

E-mail: notiostu@gmail.ru

Egorov Mihail Vasilievich

State University – ESPC, Orel

Teacher of department of electro technical disciplines in Technological institute named by N.N.Polikarpova

Tel. 4862-55-51-45

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 004.94

А.В. ТЮТЯКИН, Е.А. СЕМАШКО, А.В. ДЕМИДОВ, П.П. СИЛАЕВ

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В статье предложена функциональная модель исследования алгоритмов сжатия диагностических изображений в нотации IDEF0, позволяющая на ее основе синтезировать модели и методики выбора профиля сжатия.

***Ключевые слова:** функциональная модель; исследование алгоритмов сжатия; диагностические изображения; полутоновые изображения; сжатие изображений без потерь.*

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих задач технической диагностики сводится к обработке и анализу полутоновых растровых изображений, полученных такими методами, как рентгенография, ультразвуковая локация и т. п. [1]. В настоящее время распространено представление указанных изображений, их хранение и пересылка в электронном виде. Однако их непосредственное представление в таком виде характеризуется большими объемами файлов (порядка одного мегабайта на один кадр).

Исходя из вышесказанного, хранение и пересылка по коммуникационным сетям вышеназванных изображений весьма затруднительна или невозможна без их компактного кодирования (сжатия).

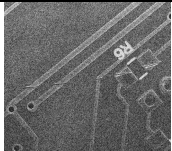
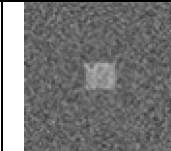
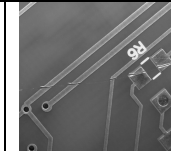
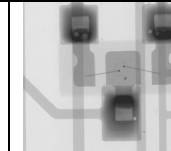
В настоящее время известны разнообразные алгоритмы сжатия изображений [2]. Большинство из них ориентировано на сжатие с потерями информации, при условии, что они незаметны или малозаметны для человеческого глаза. С другой стороны, алгоритмы сжатия с потерями неприменимы при решении большинства практических задач ввиду того, что обусловленные потерями информации артефакты изображений, будучи приемлемы для мультимедиа, недопустимы при обработке и анализе, например, результатов ультразвуковой локации или рентгенографии. Поэтому при хранении, передаче и обработке изображений в технической диагностике применимы только алгоритмы сжатия изображений без потерь.

Однако до настоящего времени остается нерешенным вопрос выбора **профилей** сжатия, т. е. сочетаний алгоритмов их параметров, характеристик и опциональных возможностей, в зависимости от характера и параметров кодируемого изображения.

В существующих системах технической диагностики задача выбора профиля сжатия полностью не решена. В большинстве систем, например, в фотограмметрической системе **V-STARS/S8** применяется один заранее заданный алгоритм для всего множества изображений, вне зависимости от их параметров и характеристик. Однако, как следует из нижеприведенной таблицы 1, такой подход не может обеспечить выбор предпочтительного профиля сжатия даже для изображений одного типа и назначения. Также существуют системы с возможностью выбора алгоритма сжатия из числа нескольких алгоритмов, как, например, в тепловизорах **HotShot B-View**. Однако выбор профиля при этом целиком возлагается на пользователя, обычно не являющегося специалистом в области обработки и кодирования изображений и, следовательно, не обладающего достаточной компетенцией для выбора предпочтительного профиля для каждого конкретного изображения. Следовательно, *рациональным решением задачи выбора профиля сжатия представляется автоматизированный выбор алгоритма*

сжатия на основании параметров и характеристик конкретного изображения, подвергаемого сжатию.

Таблица 1 – Коэффициенты компрессии, достигаемые различными алгоритмами сжатия для различных изображений систем диагностики качества плат печатного монтажа

Алгоритм	Изображения			
				
Профиль по умолчанию				
	Коэффициент сжатия			
APT	0,96	1,42	2,78	2,25
BMF	1,07	4,26	3,28	3,51
ВTPC	0,96	1,37	2,77	2,24
CALIC	1,02	1,79	3,53	2,32
CTW	1,10	9,44	2,82	3,81
GRALIC	1,05	2,20	3,78	4,41
JPEG-LS	0,94	1,26	3,26	2,00
JPEG-2000	0,93	0,85	2,97	1,98
PAQ9	1,17	36,02	2,88	3,84
PGF	0,94	0,86	2,80	1,91
PWC	1,01	2,13	3,34	2,83

До настоящего времени в недостаточной мере проведены комплексные исследования практического применения указанного подхода для решения задач технической диагностики, а именно:

- предпочтительности применения каждого из известных алгоритмов сжатия без потерь для кодирования распространенных классов диагностических изображений;
- выбора профиля сжатия, наиболее предпочтительного для каждого конкретного изображения;
- создания автоматизированных систем исследования алгоритмов архивирования полутоновых диагностических изображений без потерь и их сжатия в процессе эксплуатации систем диагностики.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ

На основании вышеперечисленных задач, а также предлагаемого подхода к выбору профиля сжатия предложена функциональная модель процессов исследования алгоритмов сжатия полутоновых изображений без потерь, представленная на рисунке 1 в терминах IDEF0 и формально описывающая данные процессы.

Функциональная модель, представленная на рисунке 1, служит основанием для исследований алгоритмов сжатия и разработки теоретических основ выбора профилей сжатия.

Процесс исследования алгоритмов сжатия состоит из нескольких этапов:

- формирования множества тестовых изображений;
- поиска применимых в системах технической диагностики профилей сжатия;
- поиска профилей, предпочтительных для сжатия тех или иных групп (классов) диагностических изображений;
- формирования базы значений характеристик изображений, являющихся критериями выбора профилей сжатия;
- группирования изображений по предпочтительным профилям;
- формирования правил выбора профиля сжатия и модели профилирования сжатия.

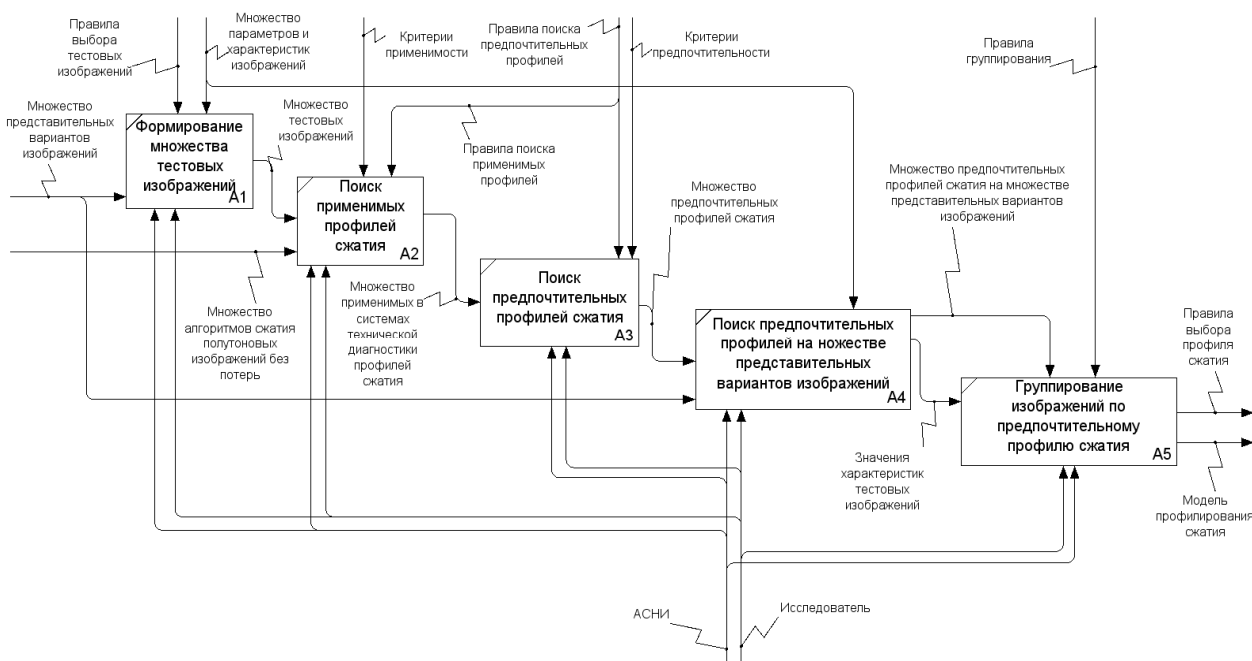


Рисунок 1 – Функциональная модель процессов исследования алгоритмов сжатия

При этом реализация каждого из этапов осуществляется как исследователем, так и разработанным для этих целей программным комплексом автоматизированной системы научных исследований (АСНИ). В нотации IDEF0 АСНИ и исследователь представляют собой механизмы, которые обозначаются стрелками снизу, а этапы исследования представлены функциональными блоками. Для каждого такого блока существуют входные данные, результат функционального преобразования и закон, по которому это преобразование проходит.

Опишем вкратце основные элементы функциональной модели, представленной на рисунке 1.

Множество параметров и характеристик изображений.

В работе [3] были предложены статистические признаки, которые потенциально могут оказывать влияние на коэффициент сжатия тем или иным алгоритмом. Также были предложены и другие характеристики, описывающие неоднородности изображения. Таким образом, потенциально влияет на профиль сжатия изображения множество параметров и характеристик изображений, представленное в таблице 2.

Множество представительных вариантов изображений $\{IM\}$ – множество изображений, включающих изображения различных типов: реальные изображения, а также сгенерированные по различным законам тестовые изображения.

Множество алгоритмов сжатия полутоновых изображений без потерь включает в себя алгоритмы, которые могут осуществлять компрессию полутоновых изображений без потерь. Необходимо, чтобы сравнение исследуемых алгоритмов проводилось на одном классе изображений для корректности исследований. В частности, недопустимо сравнивать алгоритмы на разных форматах изображений, например 8 и 24-битных, бинарных и ASCII-файлах (формат PGM) и т.д.

Формирование множества тестовых изображений. Множество тестовых изображений – репрезентативное множество изображений, которое позволяет охарактеризовать все множество возможных вариантов изображений. При этом исследование алгоритмов сжатия, очевидно, должно осуществляться на репрезентативном множестве. Для обеспечения репрезентативности множества тестовых изображений, т. е. возможности оценивания с его помощью различных профилей сжатия необходимо выполнение условия случайности выбранных изображений [5].

Таблица 2 – Параметры изображения, потенциально влияющие на выбор профиля сжатия

Группа характеристик	Характеристики
Пространственные спектральные характеристики	– характер спектра; – характер кепстра.
Гистограммные характеристики	1. энтропия; – энтропия второго порядка; 2. ковариация; – дисперсия; – коэффициент эксцесса; – энергия; – момент инерции; – средняя абсолютная разность; – коэффициент асимметрии гистограммы.
Статистические характеристики	3. характер автокорреляционной функции; – размер; – энергия второго порядка; – плотность резких перепадов яркости на изображении с выделенными контурами.

Введены также дополнительные *правила*, обеспечивающие попадание в репрезентативное множество изображений тех из них, которые удовлетворяют следующим критериям:

$$\left. \begin{aligned}
 \{IMD\} &\subset \{IM\} \\
 x_{i\max} \{IMD\} &= x_{i\max} \{IM\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}} \\
 x_{i\min} \{IMD\} &= x_{i\min} \{IM\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}} \\
 \exists P_{ij} \{IMD\} &= P_{ij} \{IM\} \Big|_{\substack{\forall P_j \in \{P_1 \dots P_M\} \\ \forall j=1,M}} \\
 med \{x_i \{IMD\}\} &\approx med \{x_i \{IM\}\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}} \\
 mod \{x_i \{IMD\}\} &\approx mod \{x_i \{IM\}\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}} \\
 M \{x_i \{IMD\}\} &\approx M \{x_i \{IM\}\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}} \\
 \sigma^2 \{x_i \{IMD\}\} &\approx \sigma^2 \{x_i \{IM\}\} \Big|_{\forall i=1,\overline{N}}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где IMD – множество тестовых изображений для оценивания параметров x_i, P_{ij} ;

IM – множество представительных вариантов изображений;

M – количество качественных характеристик изображения;

N – количество численных характеристик изображения;

x_i – значение i -той количественной характеристики изображения на множествах представительных вариантов изображений IM и тестовых изображений IMD ;

j – качественная характеристика изображения;

$\{P_1 \dots P_N\}$ – множество качественных характеристик изображения;

$med \{x_i \{IMD\}\}, mod \{x_i \{IMD\}\}, M \{x_i \{IMD\}\}, \sigma^2 \{x_i \{IMD\}\}$ – медиана, мода, математическое ожидание и дисперсия характеристики изображения x_i на множестве изображений.

На основании *правил формирования тестовых изображений* определяется *репрезентативное множество тестовых изображений*, которые используются при поиске применимых профилей сжатия.

Поиск применимых профилей сжатия осуществляется на основании предложенных критериев их применимости и предпочтительности для использования в системах техниче-

ской диагностики. Нетрудно показать, что *критерий применимости* профилей сжатия в системах технической диагностики имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{сум}} &\leq t_{\text{дон}} \\ \delta_{\text{max}} &\leq \frac{1}{2^N} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $t_{\text{сум}} = t_{\text{сж}} + t_{\text{дек}}$ – суммарное время сжатия и декомпрессии изображения;

$t_{\text{дон}}$ – максимально допустимое суммарное время сжатия и декомпрессии, которое определяется используемым аппаратным обеспечением, а также конкретной прикладной задачей и не превышает нескольких десятков секунд;

δ_{max} – максимальное относительное отклонение интенсивности пикселя восстановленного изображения от интенсивности пикселя исходного изображения, определяемое по выражению:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\max_{i,j} \{ |K(i,j) - I(i,j)| \}}{I_{\text{max}}} \quad (3)$$

где N – количество значащих разрядов при представлении интенсивностей пикселей изображения;

$K(i, j), I(i, j)$ – интенсивность пикселя изображения с координатами (i, j) соответственно восстановленного и исходного изображения;

I_{max} – максимальная интенсивность исходного изображения.

В свою очередь, критерий *предпочтительности* профилей сжатия, применимых в системах диагностики, целесообразно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{сж}} &= K_{\text{сжmax}} \\ t_{\text{сум}} &= \min \{ (t_{\text{сж+дек}})_j \}, j \in \{PRF\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $K_{\text{сж}}$ – степень сжатия файлов изображений, определяемая как отношение объемов исходного $S_{\text{исх}}$ и сжатого $S_{\text{сж}}$ файлов изображения;

$\{PRF\}$ – множество профилей сжатия, для которых выполняется условие $K_{\text{сж}} = K_{\text{сжmax}}$.

На основании сформированного в соответствии с критериями (1) множества тестовых изображений, а также в соответствии с критериями применимости (2) и предпочтительности (3) проводится поиск профилей сжатия, предпочтительных для распространенных разновидностей диагностических изображений на основе *правил поиска* предпочтительного профиля.

Согласно правилам поиска, при сравнительно небольшом числе вариантов опциональных возможностей и параметров алгоритма сжатия предпочтительный профиль целесообразно определять методом перебора. При большом количестве вариантов сочетаний параметров и опциональных возможностей алгоритма сжатия (порядка десятков тысяч), целесообразным является выбор профиля методом поиска на основе несбалансированного дерева, позволяющим сократить число вариантов перебора за счет отсеивания диапазонов значений параметров профиля, которые не удовлетворяют критерию (4).

Поиск предпочтительных профилей сжатия на представительном множестве тестовых изображений позволяет получить множество и диапазоны значений параметров и характеристик изображений, служащих критериями при выборе профиля сжатия.

По результатам проведенных экспериментов осуществляется *группирование изображений по предпочтительным профилям сжатия*. Правила такого *группирования* заключаются в образовании групп изображений, а, следовательно, и их характеристик, имеющих одинаковый профиль сжатия. В результате анализа группирования изображений, исследова-

тель может сформировать *правила и модель выбора профиля сжатия*, которые позволят создать средства автоматического выбора такого профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная функциональная модель исследования алгоритмов сжатия полутонновых изображений без потерь позволяет:

– определять степень предпочтительности и области применимости любого (в том числе вновь разработанного) алгоритма для сжатия изображений в системах технической диагностики;

– разрабатывать методики автоматизированного выбора предпочтительных профилей сжатия в зависимости от параметров и характеристик конкретных изображений, независимо от опыта разработчиков и пользователей диагностической системы, что обеспечивает минимальный достижимый объем сжатого изображения и минимальное время его передачи по сетям связи.

Работа выполнена в рамках исследований по ГК № 16.740.11.0041 (Заказчик – Минобрнауки РФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Априори системс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://aprioris.ru/>, свободный. – Яз. рус.
2. Еременко, В.Т. Алгоритмы сжатия без потерь полутонновых изображений в автоматизированных системах [Текст] / В.Т. Еременко, А.В. Тютякин, Е.А. Семашко // IV Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП – 2010)». Материалы конференции. Т.2 (5). – Орел, 2010. – С. 132 – 141
3. Прэтт, Э. Цифровая обработка изображений [Текст] / Э. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – 312 с.
4. Salomon, D Data compression: The complete reference [Текст] / David Salomon – Springer-Verlag New York, 2004. – 920 с. – ISBN 0-387-40697-2
5. Панков, А.Р. Практикум по математической статистике [Текст] / А.Р. Панков, Е.Н. Платонов. – М.: МАИ, 2006. – 87 с.

Тютякин Александр Васильевич

«Госуниверситет-УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЭВТиБ
Тел. +7 (4862) 45-57-57
E-mail: avt@rbcmail.ru

Семашко Евгений Александрович

«Госуниверситет-УНПК», г. Орел
Аспирант кафедры ЭВТиБ
Тел.: + 7(920) 287-10-68
E-mail: semashko@metasystems.ru

Демидов Александр Владимирович

«Госуниверситет-УНПК», г. Орел
Аспирант кафедры ЭВТиБ
Тел. +7 (4862) 41-98-88
E-mail: a.demidov@ostu.ru

Силаев Павел Павлович

«Госуниверситет-УНПК», г. Орел
Магистрант кафедры ИС
Тел. +7 (4862) 41-98-88
E-mail: kaktyzzz_89@mail.ru

A.V. TYUTYAKIN, E.A. SEMASHKO, A.V. DEMIDOV, P.P. SILAEV

FUNCTIONAL MODEL OF IMAGES COMPRESSION ALGORITHMS RESEARCH IN TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

A functional model of diagnostic images compression algorithms researches in IDEF0 notation is proposed in the article. The model allows synthesize models and methodologies of compression profile choice.

Keywords: *functional model; compression algorithms research; diagnostic images; grayscale images; lossless images compression.*

BIBLIOGRAPHY

1. Apriori sistems [Jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://aprioris.ru/>, svobodnyj. – Jaz. rus.
2. Eremenko, V.T. Algoritmy szhatija bez poter' polutonovyh izobrazhenij v avtomatizirovannyh sis-temah [Tekst] / V.T. Eremenko, A.V. Tjutjakin, E.A. Semashko // IV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konfe-rencija «Informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve (ITNOP – 2010)». Materialy konferencii. T.2 (5). – Orel, 2010. – S. 132 – 141
3. Prjett, Je. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij [Tekst] / Je. Prjett. – M.: Mir, 1982. – 312 s.
4. Salomon, D Data compression: The complete reference [Tekst] / David Salomon – Springer-Verlag New York, 2004. – 920 c. – ISBN 0-387-40697-2
5. Pankov, A.R. Praktikum po matematicheskoj statistike [Tekst] / A.R. Pankov, E.N. Platonov. – M.: MAI, 2006. – 87 s.

Tyutyakin Aleksandr Vasilyevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department “Electronics, Computer Science and Information Security”

Tel. +7 (4862) 45-57-57

E-mail: avt@rbcmail.ru

Semashko Evgeniy Aleksandrovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Electronics, Computer Science and Information Security”

Tel. +7(920) 287-10-68

E-mail: semashko@metasystems.ru

Demidov Aleksandr Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Electronics, Computer Science and Information Security”

Tel. +7 (4862) 41-98-88

E-mail: a.demidov@ostu.ru

Silaev Pavel Pavlovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Magistrand of department “Electronics, Computer Science and Information Security”

Tel. +7 (4862) 41-98-88

E-mail: kaktyzzz_89@mail.ru

В.А. ЛОБАНОВА, О.А. ВОРОНИНА

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

В данной статье в качестве альтернативного направления применения электронных средств контроля рассматривается возможность использования технологии on-line мониторинга технологического процесса для прогнозирования состояния качества нефтепродуктов путем получения новых знаний о текущем состоянии процесса ректификации нефти и динамике его изменения через математическую обработку оперативных и ретроспективных данных о технологических параметрах процесса переработки.

Ключевые слова: контроль качества нефтепродуктов, процесс ректификации, контроль качества, on-line анализаторы, максимальная идентифицируемость, математическая модель, качественные и количественные показатели выходной продукции технологического процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач в нефтепереработке является задача контроля качества нефтепродуктов. Для сбора данных и формирования выходных воздействий широкое применение нашли вставные (вставляемые в шину компьютера или ее расширителя) платы. Это наиболее простой, надежный и относительно дешевый способ сопряжения компьютера с объектом автоматизации. Такие платы на рынке России сейчас можно найти превеликое множество самых различных производителей (начиная от коленочных разработок плат АЦП от 100 рублей до уважаемых нашими потребителями плат американской фирмы National Instruments по цене сотни и тысячи долларов за плату). Данные разработки, как правило, нельзя использовать для достоверной оценки собираемых данных. Достаточно распространены на нашем рынке платы тайваньской фирмы Advantech. Эти платы дешевле многих других зарубежных производителей, но нуждаются в дополнительной метрологической аттестации. Из отечественных производителей выгодно выделяются платы Центра АЦП (ЗАО Руднев-Шиляев). Качество плат этой фирмы вполне конкурирует с ведущими мировыми производителями (цены существенно ниже). В России это сейчас единственный производитель, все платы которого метрологически аттестованы и имеют хорошую программную поддержку. Вставные платы легко подключаются к источнику сигнала и программируются даже начинающим программистом (в комплект практически любой такой платы входят набор драйверов, библиотек программ управления и примеры программирования платы). Критическим аспектом практического использования вставных плат в IBM PC является интеграция их в системы. Дополнительное программное обеспечение, предлагаемое солидными фирмами-производителями плат, как правило, позволяет использовать компьютер с такой платой как виртуальный прибор. Так, например, фирма TiePie Engineering обеспечивает для своих измерительных плат режимы работы запоминающего осциллографа, спектроанализатора, вольтметра. Фирма National Instruments предлагает к своим платам целую библиотеку драйверов для управления различными приборами с оболочками в виде виртуальных приборов (немалая доля из них написана российскими программистами).

В условиях острой нехватки приборов и ограниченности средств на их приобретение, для российского потребителя виртуальный прибор становится иногда единственной палочкой-выручалочкой. По своим потребительским свойствам, удобству работы виртуальные приборы ни в чем не уступают реальным, а по параметрам превосходят дешевые варианты живых приборов. Ремонт устаревших приборов обходится примерно как стоимость виртуального. В таблице 1 приводится сравнение основных характеристик и стоимости наиболее распространенных цифровых запоминающих осциллографов с виртуальными осциллографами Центра АЦП на базе платы АЦП.

Таблица 1 – Сравнительная таблица наиболее распространенных цифровых запоминающих осциллографов

Наименование	C1-137	C9-28	DS-303P	«Виртуальные осциллографы» «Центра АЦП»	
				ЦЗО_01	ЦЗО_02
Полоса пропускания (-3дБ), МГц	0 - 25	0 - 100	0 - 30	0 - 100	0 - 200
Количество каналов	2	2	2	2	2
Частота дискретизации, МГц	1	20	20	100	400
Разрядность АЦП	8	8	8	8	8
Объем памяти, Кбайт	4	2	4	64	512

Из применяемых в настоящее время на мини-НПЗ из трех способов контроля показателей качества, в том числе лабораторные анализы, данные поточных анализаторов, данные on-line анализаторов, ранее были использованы первые два. В связи с тем, что лабораторные анализы не могут использоваться для управления качеством в реальном времени из-за недостаточной полноты и оперативности, а поточные анализаторы требуют регулярного высококвалифицированного эксплуатационного обслуживания, в качестве перспективного направления может быть выбрано применение on-line (виртуальных) анализаторов в дополнение к, например, системе мониторинга состояния резервуарного парка для управления качеством по косвенным технологическим параметрам. Многие крупные фирмы, специализирующиеся в области промышленной автоматизации (Honeywell, Aspin Tech, Siemens и др.), используют технологию виртуального мониторинга технологического процесса.

Виртуальный мониторинг состояния качества нефтепродуктов состоит в получении новых знаний о текущем состоянии процесса ректификации нефти и динамике его изменения путем математической обработки оперативных и ретроспективных данных о технологических параметрах процесса переработки, полученных с помощью существующей контрольно-измерительными аппаратуры (рис. 1). Основным назначением использования такой технологии является создание достаточной информационной базы для формирования оптимального управления как отдельными технологическими процессами, так и всего техпроцесса.

Основными источниками информации для виртуального анализа состояния техпроцесса являются:

- дополнительная информация, извлекаемая из исходных массивов измерительной информации благодаря наличию взаимозависимостей и связей между измеряемыми параметрами;
- знания о технологических параметрах сырья, накопленные в процессе управления техпроцессом и хранящиеся в базе данных, которые формируются исходя из автоматизированного сопоставительного анализа текущих измерений технологических параметров техпроцесса с моделируемыми значениями, сформированными на основе начальных данных о резервуарном парке, а также с описаниями аналогичных производственных ситуаций, накопленными в БД.

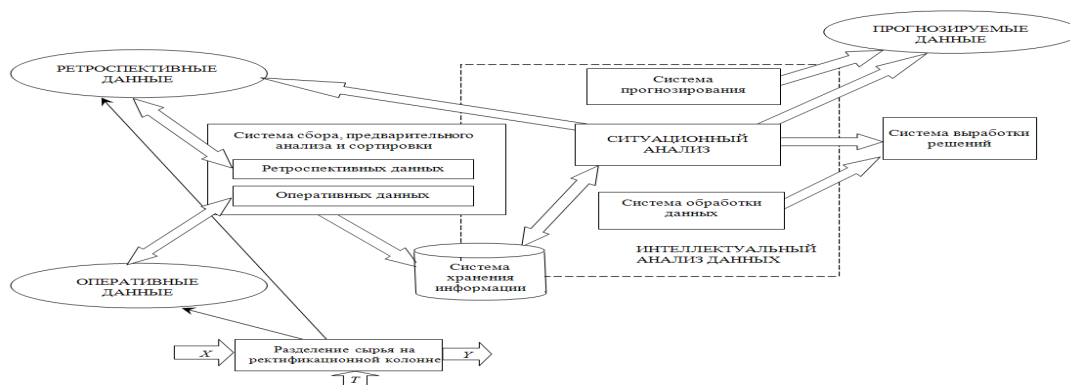


Рисунок 1 – Виртуальный мониторинг состояния качества нефтепродуктов

Таблица 2 – Основные функции виртуальной системы мониторинга процесса ректификации нефти

Основные функции	Частные задачи виртуального анализа
<i>Оперативное управление технологическим процессом хранения нефти</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Прогнозирование качества выходного нефтепродукта для выбранного технологического режима; • Оценка параметров сырья и коррекция требований к ним; • Формирование оптимальных технологических управлений (решений) для заданных критериев качества
<i>Технологический анализ и исследование процесса ректификации как объекта управления</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Выявление и корректный учет значимых взаимозависимостей технологических параметров; • Поиск наиболее рациональных решений по управлению процесса ректификации для различных критериев эффективности; • Поиск новых технологических режимов для различных критериев эффективности; • Анализ значимости и функций влияния отдельных технологических параметров РП.
<i>Контроль состояния КИПиА</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Верификация контрольно-измерительной аппаратуры; • Основа для построения системы гибкого планирования процессов контроля и ремонта КИС

В настоящее время, в связи с предстоящим вступлением России в ВТО, для отечественных предприятий весьма актуальным является выполнение требований стандартов серии ISO 9000 по обеспечению максимальной «идентифицируемости, наблюдаемости и управляемости» производства. Обеспечение этих требований в отношении процесса ректификации нефти является весьма сложной проблемой. Нефть как сырье процесса и источник основных возмущений процесса является самостоятельной и чрезвычайно сложной динамической системой, наблюдение свойств которой в режиме реального времени является отдельной и весьма непростой проблемой. В этом главное отличие процесса ректификации нефти. Одни и те же значения интегральных параметров качества (таких как плотность, температура застывания вязкость и т.п.), которые в настоящее время служат главными критериями целями управления, могут быть получены при различных отборах и наложениях смежных фракций, т.е. при разных состояниях процесса. Таким образом, решение общей проблемы контроля процесса первичной перегонки имеет как бы «удвоенную сложность» по сравнению с ректификацией ограниченного числа компонентов и соответственно включает две группы проблемных задач:

1– оперативная оценка (идентификация) свойств нефти;

2 – оперативная оценка (идентификация) состояния процесса.

Для описания процесса ректификации нефти составляется несколько множеств:

$$O = \langle T, X, Y \rangle,$$

где $T = \{ p_1, p_2, \dots, p_n, y_1, y_2, \dots, y_r, v_1, v_2, \dots, v_\beta \}$ – множество входных воздействий;

$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_m \}$ – множество состояний технологического процесса;

$Y = \{ z_1, z_2, \dots, z_\delta, w_1, w_2, \dots, w_\gamma \}$ – множество выходных процессов.

Эти переменные можно разделить на контролируемые, характеризующие свойства и управляющие.

На этапе определения структуры системы обобщенная модель может усложниться. Обусловлено это необходимостью добавления множеств отношений между элементами системы, матрицы отношений между множествами. Таким образом, усложненное описание объекта будет выглядеть:

$$O = \langle A, R, T, X, Y, G \rangle$$

где A – множество элементов системы;

R – матрица отношений между элементами системы, заданной на A ;

G – матрица отношений между множествами A и X .

Часть $\{A, R\}$ – структура, а $\{U, X, Y\}$ – программа функционирования

Система в данном случае – это объединение этих двух элементов, единство которой определяется отношением G .

При таком представлении технологического процесса учитывают только те переменные, которые существенно влияют на значения входных переменных, а остальные относят к неконтролируемым возмущениям. По этим причинам технологический процесс в атмосферной колонне следует рассматривать как систему с неполной априорной информацией.

Сказанное ранее даёт представление о структуре программного комплекса (рис.2), позволяющего собирать, анализировать и прогнозировать информацию о качестве получаемого на выходе продукта. Основным назначением такой системы является повышение уровня информационно-аналитического обеспечения технологического персонала и создание условий для формирования оптимального управления как отдельными ТП, так и всего технологического цикла производства, формирование методик для технологического персонала.

В основе решения функциональных задач, решаемых средствами такого комплекса, должна лежать математическая модель, отображающая взаимосвязи между качественными и количественными показателями выходной продукции ТП, характеристиками входных материальных потоков и управлением, выраженным через параметры состояния технологической установки. Данная модель должна представлять собой некоторое многомерное отображение, заданное в виде системы взаимосвязанных (в общем случае, нелинейных) уравнений.

Решение данной системы уравнений по отношению к отдельным ее составляющим позволит обеспечить выполнение основных задач, в первую очередь, задач анализа, а именно:

- прогнозирование качества выходной продукции ТП по результатам анализа сырьевых потоков и выбранному управлению (технологическому режиму);
- определение требуемого технологического режима по результатам анализа сырьевых потоков и заданному (желаемому) качеству выходной продукции;
- определение требований к качеству сырья исходя из заданного (желаемого) качеству выходной продукции и типовых параметров технологической установки.

Наблюдения в реальном времени за технологическими процессами, решение проблем, связанных с практической реализацией систем управления технологическими процессами должны поддерживаться современными регуляторами с определенным запасом «интеллектуальности». Поэтому альтернативой виртуальным анализаторам авторы считают использование свойства нечеткой логики обрабатывать неполную информацию, моделировать человеческие знания и выдавать обоснованные решения, т.е. внедрением в процесс управления нечетких электронных регуляторов, способных обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веревкин, А.П. О моделях ректификационных колонн при оперативном управлении по показателям качества продуктов / А.П. Веревкин, Ю.М. Муниров // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. -1996. – №7-8.
2. Мусаев, А.А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными технологическими процессами / А.А. Мусаев // Автоматизация в промышленности. 2003. – № 8. – С. 28-33.

Лобанова Валентина Андреевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Тел.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: lvanata@yandex.ru

Воронина Оксана Александровна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Тел.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: Voronina_o_a@mail.ru

V.A. LOBANOVA, O.A. VORONINA

ABOUT DEVELOPMENT OF NEW DECISIONS OF THE TASK OF QUALITY CONTROL OF OIL PRODUCTS

In given article as a perspective direction authors consider possibility of usage of technology on-line monitoring of technological process for forecasting of a state of quality of oil products by obtaining of new knowledge of a current state of process of rectification of oil and dynamics of its change through mathematical handling of the operative and retrospective data about technological parameters of process of processing.

Keywords: *quality control of oil products, rectification process, quality control, on-line analyzers, the maximum identifiability, mathematical model, qualitative and quantity indicators of output production of technological process.*

BIBLIOGRAPHY

1. Verevkin, A.P. O modeljah rektifikacionnyh kolonn pri operativnom upravlenii po pokazateljam kachestva produktov / A.P. Verevkin, Ju.M. Munirov // Neft', gaz i neftehimija za rubezhom. -1996. – №7-8.
2. Musaev, A.A. Virtual'nye analizatory: koncepcija postroenija i primenenija v zadachah upravlenija nepreryvnymi tehnologicheskimi processami / A.A. Musaev // Avtomatizacija v promyshlennosti. 2003. – № 8. – S. 28-33.

Lobanova Valentina Andreevna

State University – ESPC, Orel

Candidate of technical science, professor of department “Electronics, computing technique and information security”

Tel. 4862-45-57-57

e-mail: Voronina_o_a@mail.ru

А.В. ДУНАЕВ, О.В. ИНОЖАРСКАЯ, Е.В. ШУРАЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В работе исследованы возможности лазерной доплеровской флоуметрии для оценки эффективности применения ортопедических средств на основе микросфер. На основании анализа полученных результатов сделаны выводы о перспективности использования лазерной доплеровской флоуметрии для индивидуализации применения ортопедических средств по критерию достижения эффекта стимуляции системы микроциркуляции крови.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флоуметрия; ортопедические средства; микроциркуляция крови.

Современный рынок товаров для здоровья широко представлен различными ортопедическими средствами, как бытового назначения, так и для использования в медико-профилактических и реабилитационных целях для коррекции и предупреждения патологий системы микроциркуляции крови (болезнь Рейно, вибрационная болезнь), последствий травм и переломов, нарушений венозного оттока и других патологических состояний. Однако проблема индивидуализации применяемых ортопедических средств носит по-прежнему актуальный характер.



Рисунок 1 – Ортопедическое средство на основе микросфер (варежка) фирмы «Альсария»

Очевидно, что эффективность применения того или иного ортопедического средства связана с особенностями его конструкции и свойствами наполнителя. В качестве объекта исследования эффективности применения были выбраны ортопедические изделия фирмы «Альсария» с наполнителем из микросфер, обладающие рядом особенностей [1].

Ортопедическое средство в виде варежки, представленное на рисунке 1, характеризуется тем, что содержит два чехла, размещенные один в другом, и наполнитель, который является смесью из микростеклосфер (микросфер) из натриевоборосиликатного стекла размерами 15-200 мкм и микростеклосфер из калий-натриевого стекла размерами 50-160 мкм с кремнийорганическим покрытием. Структура смеси микростеклосфер во внутреннем чехле показана на рисунке 2 [2].

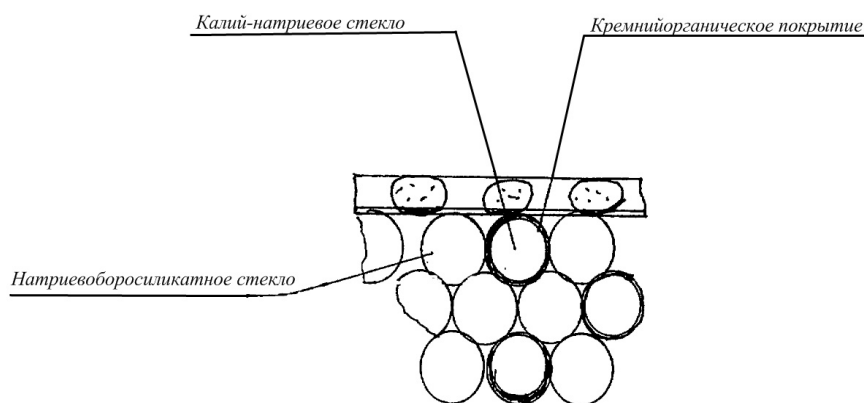


Рисунок 2 – Структура смеси микростеклосфер во внутреннем чехле

Диапазоны размеров микростеклосфер каждого вида определены технологией их производства. Среднестатистические размеры микростеклосфер разных видов приблизительно равны между собой, что обеспечивает однородность смеси при её получении и повышает эффект псевдожидкости смеси во время использования ортопедического средства. Отражающее покрытие внутренней стороны внутреннего чехла также способствует уменьшению трения микростеклосфер о поверхность ткани, что тоже повышает подвижность ортопедического изделия.

Ортопедические средства на основе микросфер обладают рядом специфических свойств, сочетание которых даёт множество положительных эффектов, в первую очередь связанных со стимуляцией системы микроциркуляции крови.

Свойство псевдожидкости, позволяющее потребителю испытывать состояние псевдоневесомости.

В замкнутой оболочке изделия (например, варежки) находится наполнитель, свойства которого очень схожи со свойствами жидкости, такими, как внутренний коэффициент трения (или вязкость) – это значит, что наполнитель не оказывает никакого сопротивления изменению формы при неизменном объёме; способность при воздействии внешнего давления передавать это давление по всем направлениям одинаково. Эти свойства приводят к эффекту псевдоплавания (псевдоневесомости), благодаря которому улучшается кровоснабжение органов и тканей, дополнительное раскрытие капилляров, то есть происходит стимуляция системы микроциркуляции крови, а улучшение трофики позволяет репаративным процессам протекать более интенсивно. Создавая состояние псевдоневесомости, ортопедическое изделие приводит к максимальному расслаблению мышц.

Способность накапливать инфракрасное тепло человеческого тела.

Поскольку тело человека излучает инфракрасную энергию в диапазоне приблизительно 3-50 мкм с пиком в 9,6 мкм, при воздействии на организм инфракрасной энергии с длиной волны 9,6 мкм имеет место явление активного поглощения телом внешней энергии (так называемое резонансное поглощение). В результате этого воздействия повышается потенциальная энергия клеток организма, и из них будет уходить несвязанная вода, повышается деятельность специфических клеточных структур, растёт уровень иммуноглобулинов, увеличивается активность ферментов и эстрогенов, происходят и другие благоприятные биохимические реакции. Это характерно для всех типов клеток организма и крови. Инфракрасное излучение проникает в ткани организма глубже, чем другие виды световой энергии, что вызывает прогревание всей толщи кожи и отчасти подкожных тканей. Более глубокие структуры прямому прогреванию не подвергаются. Область терапевтического применения инфракрасного излучения довольно широка: негнойные хронические и подострые воспалительные местные процессы, в том числе внутренних органов, некоторые заболевания опорно-двигательного аппарата, центральной и периферической нервной системы, периферических сосудов, глаз, уха, кожи, остаточные явления после ожогов и отморожений.

Лечебный эффект инфракрасного облучения определяется механизмом его физиологического действия – он ускоряет обратное развитие воспалительных процессов, повышает тканевую регенерацию, местную сопротивляемость и противоинфекционную защиту. Происходящее при поглощении энергии ИК-излучения образование тепла приводит к локальному повышению температуры облучаемых кожных покровов на 1-2 °С и вызывает местные терморегуляционные реакции поверхностной сосудистой сети. Сосудистая реакция выражается в кратковременном спазме сосудов (до 30 с), а затем увеличении локального кровотока и возрастании объема циркулирующей в тканях крови. Выделяющаяся тепловая энергия ускоряет тканевой обмен веществ. Активация микроциркуляторного русла и повышение проницаемости сосудов способствует дегидратации воспалительного очага и удалению продуктов распада клеток. Активация пролиферации и дифференцировки фибробластов приводят к ускорению заживления ран и трофических язв.

Таким образом, оценка эффективности применения ортопедических средств на основе микросфер, основанная на регистрации отклика в системе микроциркуляции крови, является актуальной и важной задачей на современном этапе.

В последнее время в связи с интенсивным развитием диагностических методов, основанных на неинвазивной медицинской спектродетекции – фотоплетизмографии (ФПГ), пульсоксиметрии (SaO₂), оптической тканевой оксиметрии (ОТО), лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) и др., всё более актуальным становится вопрос о возможности их применения в качестве методов контроля эффективности различных физических воздействий в режиме реального времени [3].

Наиболее чувствительным методом регистрации динамики процессов микроциркуляции крови в биотканях является сегодня метод ЛДФ. Этот метод является наиболее доступным для оценки состояния МЦК и позволяет в клинических условиях получить объективную информацию о параметрах функционирования микроциркуляторного русла с любого участка поверхности тела в реальном масштабе времени и затем оперативно использовать ее для проведения и коррекции лечебного процесса.

Метод ЛДФ основан на измерении доплеровского сдвига частоты, возникшей после отражения излучения от ансамбля эритроцитов, движущихся с разными скоростями и поразному количественно распределенных в артериолах, капиллярах, венах. Результат измерений по данной методике – показатель микроциркуляции (ПМ), измеряемый в перфузионных единицах (пф. ед.), который определяют согласно общеизвестной формуле [4]:

$$ПМ = K \cdot N_{эр} \cdot V_{ср} , \quad (1)$$

где ПМ – показатель микроциркуляции;

K – коэффициент пропорциональности ($K=1$);

$N_{эр}$ – количество эритроцитов;

$V_{ср}$ – средняя скорость эритроцитов в зондируемом объеме.

В методе ЛДФ выходной сигнал непрерывно регистрируется в течение времени исследований и диагностика состояния микроциркуляции крови основывается на анализе графической записи изменений перфузии, которая называется ЛДФ-граммой. ЛДФ-сигнал имеет постоянную и переменную от времени составляющие. Постоянная составляющая – это средняя перфузия в микроциркуляторном русле за определенный промежуток времени исследований или за выбранный временной интервал анализа. Переменная составляющая ЛДФ-сигнала обусловлена факторами, влияющими на постоянство потока крови в микроциркуляторном русле, и содержит ценную информацию о модуляции кровотока. Применение спектральных алгоритмов обработки сигналов позволяет извлекать информацию о состоянии сосудистого тонуса в терминах вклада в него разных механизмов регуляции (миогенный, эндотелиальный и пр.) микрогемодинамики.

Целью данной работы является исследование возможностей метода лазерной доплеровской флоуметрии для оценки эффективности применения ортопедических средств на основе микросфер (варежки) по регистрации отклика системы микроциркуляции крови.

Для исследования влияния применения ортопедического средства (варежки) на динамику параметров системы МЦК проведены оценочные эксперименты с использованием лазерного доплеровского флоуметра «ЛАКК-02» (НПП «ЛАЗМА»), представленного на рисунке 3а, и инфракрасного термометра «CASON CA380», представленного на рисунке 3б.



а



б

Рисунок 3 – Внешний вид экспериментального оборудования:

а – аппарат ЛДФ «ЛАКК-02», б – инфракрасный термометр «CASON CA380»

Эксперименты проводились на четырех условно здоровых добровольцах (19, 20, 21 и 23 лет) и состояли из нескольких этапов. На первом этапе измерялась температура безымянного пальца правой руки условно здорового добровольца с помощью инфракрасного термометра и проводилась запись ЛДФ-граммы с помощью аппарата ЛДФ. Затем на 15 минут доброволец надевал варежку на основе микросфер на правую руку. После истечения заданного времени варежка снималась с руки, производилось повторное измерение температуры и регистрация ЛДФ-граммы. Типичные ЛДФ-граммы для добровольца (21 год) и их вейвлет-анализ до и после применения ортопедического средства (варежка на основе микросфер) приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.



Рисунок 4 – ЛДФ-граммы условно здорового добровольца (21 год): до (а) и после (б) применения ортопедического средства (варежки)

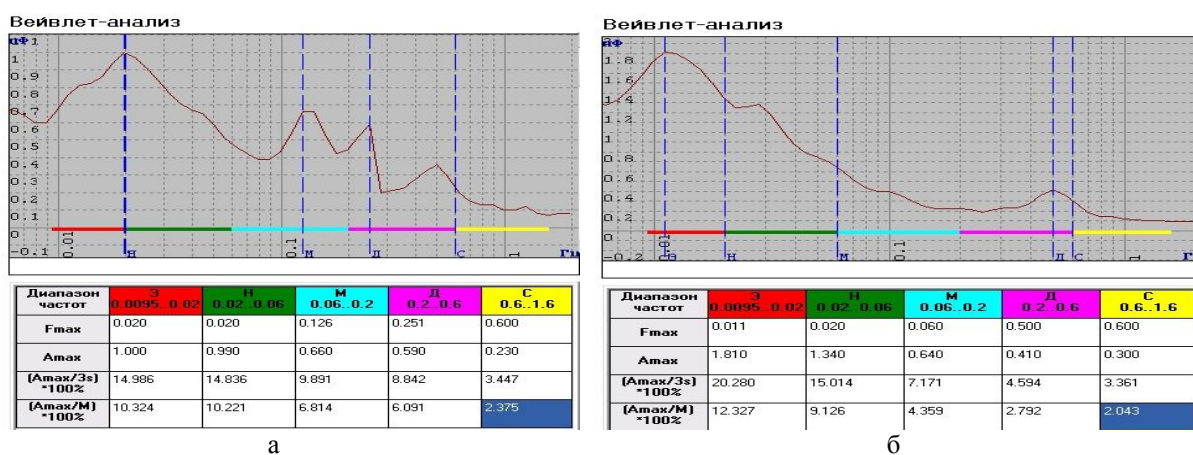


Рисунок 5 – Вейвлет-анализ ЛДФ-грамм: до (а) и после (б) применения ортопедического средства (варежки)

Результаты экспериментов с использованием данного ортопедического средства (варежки) фирмы «Альсария» и их анализ приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

В ходе проведенных исследований и анализа полученных данных прослеживается тенденция увеличения параметра ΔМ, наиболее объективно свидетельствующего о стимуляции системы микроциркуляции крови, которая наблюдается в большинстве случаев (5 из 7). Однако, в эксперименте №2 нагрев биоткани при использовании варежки с микросферами произошел только на 0,6 °С, что явно недостаточно для стимуляции микроциркуляции крови, так как ранее показано [5], что порог реакции микроциркуляционного русла составляет от 0,8 до 1 °С. В эксперименте №4 явно превышен начальный уровень ПМ, возможно наблюдался венозный застой крови, то есть, очевидно, что данный случай – это отклонение от нормы.

Таблица 1 – Результаты экспериментов с использованием ортопедического средства (варежки) фирмы «Альсария»

№ п/п	Этапы эксперимента	t, °C	M, пф.ед.	σ, пф.ед.	Kv, %	Результаты вейвлет-анализа ЛДФ-грамм δPM , пф.ед.				
						Э	Н	М	Д	С
1	до	26,6	4,55	3,9	85,53	1,11	1,17	2,42	1,52	0,57
	после	27,9	9,57	1,15	12,02	0,65	0,57	0,38	0,26	0,19
2	до	26,3	23,18	2,33	10,03	0,94	0,87	0,71	0,4	0,24
	после	26,9	22,7	4,07	17,95	2,27	2,26	0,69	0,49	0,24
3	до	27,2	9,69	2,22	22,96	1	0,99	0,66	0,59	0,23
	после	29,4	14,68	2,97	20,26	1,81	1,34	0,64	0,41	0,3
4	до	28,5	27,97	2,52	9,03	1,76	1,38	0,96	0,34	0,24
	после	26,9	29,07	1,82	6,27	1,19	1,18	0,77	0,36	0,25
5	до	26,2	18,02	4,26	23,62	2,03	1,26	0,71	0,44	0,34
	после	28,3	11,26	1,53	13,58	1,07	0,83	0,58	0,42	0,26
6	до	24	15,37	3,76	24,49	1,99	0,74	0,35	0,36	0,15
	после	28,4	26,87	2,47	9,21	1,34	1,48	0,89	0,37	0,26
7	до	26,8	17,44	3,66	20,98	1,61	1,82	0,66	0,51	0,38
	после	31,2	19,76	2,22	11,24	0,92	1,1	0,56	0,42	0,31

Э – эндотелиальные ритмы; Н – нейрогенные ритмы; М – миогенные ритмы; Д – дыхательные ритмы; С – сердечные ритмы

Таблица 2 – Анализ результатов экспериментов с использованием ортопедического средства (варежки) фирмы «Альсария»

№ п/п	$\Delta t^\circ, C$	ΔM , пф.ед.	$\Delta \sigma$, пф.ед.	$\Delta Kv, \%$	Результаты вейвлет-анализа ЛДФ-грамм, δPM , пф.ед.				
					$\Delta \text{Э}$	$\Delta \text{Н}$	$\Delta \text{М}$	$\Delta \text{Д}$	$\Delta \text{С}$
1	1,30	5,02	-2,75	-73,51	-0,46	-0,60	-2,04	-1,26	-0,38
2	0,60	-0,48	1,74	7,92	1,33	1,39	-0,02	0,09	0,00
3	2,20	4,99	0,75	-2,70	0,81	0,35	-0,02	-0,18	0,07
4	-1,60	1,10	-0,70	-2,76	-0,57	-0,20	-0,19	0,02	0,01
5	2,10	-6,76	-2,73	-10,04	-0,96	-0,43	-0,13	-0,02	-0,08
6	4,40	11,50	-1,29	-15,28	-0,65	0,74	0,54	0,01	0,11
7	4,40	2,32	-1,44	-9,74	-0,69	-0,72	-0,10	-0,09	-0,07

Таким образом, применение метода лазерной доплеровской флоуметрии совместно с измерением температуры биоткани для оценки эффективности использования ортопедических средств (например, варежки на основе микросфер) является объективным, так как позволяет установить оптимальное время воздействующего фактора (время, проведенное с надетой варежкой) по критерию достижения эффекта стимуляции системы микроциркуляции крови и, следовательно, индивидуализировать медико-профилактические и реабилитационные мероприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aksiomiya.ru/>.
2. Пат. 2393752 Российская Федерация, МПК А 47 G 9/10. Ортопедическое устройство [Текст] / Е.В. Шураева, Е.П. Семина ; заявители и патентообладатели Е.В. Шураева, Е.П. Семина . - 2009107363/14 ; заявл. 03.03.2009 ; опубл. 10.07.2010, бюл. № 13.

3. Дунаев, А.В. К вопросу о возможности использования методов неинвазивной спектродофотометрии для контроля эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии [Текст] / А.В. Дунаев, Д.А. Рогаткин // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – №3, 275(561). – 2009. – С.110-115.

4. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови [Текст]: Руководство для врачей. / Под. ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова – М.: Медицина, 2005. – 256 с.: ил.

5. Дунаев, А.В. Динамика изменений параметров микроциркуляции крови и температуры биоткани при низкоинтенсивной лазерной терапии [Текст] / А.В. Дунаев, Е.А. Жеребцов, Д.А. Рогаткин, К.С. Литвинова, М.И. Щербаков // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады IX международной научно-технической конференции. – Владимир, 2010. – С. 67-70.

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Кандидат технических наук, докторант, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», исполнительный директор научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»

Тел. +79192619906

E-mail: dunaev@ostu.ru

Иножарская Ольга Васильевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Магистрант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. +79202880725

E-mail: vasilevna87@gmail.com

Шураева Елена Владимировна

ООО «Альсария», г. Орёл
Генеральный директор, врач терапевт

Тел. +74862486320

E-mail: alsariya@mail.ru

A. V. DUNAEV, O. V. INOZHARSKAYA, E. V. SHURAEVA

**INVESTIGATION OF LASER DOPPLER FLOWMETRY POSSIBILITIES
FOR ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF APPLICATION OF
ORTHOPEDIC DEVICES**

We studied the possibility of laser Doppler flowmetry to assess the effectiveness of orthopedic products based on microspheres. Based on analysis of the results there were drawn conclusions on the prospects of utilizing the laser Doppler flowmetry for individualization of orthopedic aids by criterion of achievement of the effect of blood microcirculation system stimulation.

Keywords: laser Doppler flowmetry; orthopedic devices; blood microcirculation.

BIBLIOGRAPHY

1. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.aksiomiya.ru/>.
2. Pat. 2393752 Rossijskaja Federacija, MPK A 47 G 9/10. Ortopedicheskoe ustrojstvo [Tekst] / E.V. Shuraeva, E.P. Semina ; zajaviteli i patentoobladateli E.V. Shuraeva, E.P. Semina . - 2009107363/14 ; zajavl. 03.03.2009 ; opubl. 10.07.2010, bjul. № 13.
3. Dunaev, A.V. K voprosu o vozmozhnosti ispol'zovanija metodov neinvazivnoj spektrofotometrii dlja kontrolja jeffektivnosti nizkointensivnoj lazernoj terapii [Tekst] / A.V. Dunaev, D.A. Rogatkin // Izvestija OrelGTU, serija «Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – №3, 275(561). – 2009. – С.110-115.
4. Lazernaja dopplerovskaja floumetrija mikrociirkuljacii krovi [Tekst]: Rukovodstvo dlja vrachej. / Pod. red. A.I. Krupatkina, V.V. Sidorova – М.: Medicina, 2005. – 256 s.: il.
5. Dunaev, A.V. Dinamika izmenenij parametrov mikrociirkuljacii krovi i temperatury biotkani pri nizkointensivnoj lazernoj terapii [Tekst] / A.V. Dunaev, E.A. Zherebcov, D.A. Rogatkin, K.S. Litvinova, M.I. Werbakov // Fizika i radiojelektronika v medicine i jekologii: Doklady IX mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. – Vladimir, 2010. – С. 67-70.

Dunaev Andrey Valeryevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, postdoctoral student, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”, Executive Director of REC “Biomedical engineering”

Tel. +79192619906

E-mail: dunaev@ostu.ru

Inozharskaya Olga Vasilyevna

State University – Education Science Production Complex, Orel

Magistrand of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. +79202880725

E-mail: vasilevna87@gmail.com

Shuraeva Elena Vladimirovna

LLC “Alysariya”, Orel

General manager, medical man

Tel. +74862486320

E-mail: alsariya@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.112

В.В. МАРКОВ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представлены результаты патентного поиска за период с 1983 по 2010 годы по проблеме методов и средств контроля, исследований и анализа смазочных материалов. Проведен анализ патентной и лицензионной ситуации в рамках обозначенной проблемы. Установлена классификация методов контроля смазочных материалов, определён перечень диагностических параметров, выявлены тенденции развития и направления наиболее эффективного применения различных методов и средств контроля смазочных материалов.

Ключевые слова: *методы трибомониторинга; смазочный материал; контроль; патентный поиск; патентно-лицензионная ситуация; диагностический параметр; классификация методов контроля.*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема контроля, исследований и анализа смазочных материалов является одной из важнейших при решении ряда актуальных задач трибологических исследований, в число которых входит также широкий круг задач технического диагностирования, контроля и прогнозирования состояния триботехнических систем механизмов и машин при их изготовлении, испытаниях, техническом обслуживании в процессе эксплуатации и ремонта.

В процессе эксплуатации машины смазочный материал становится элементом триботехнической системы, состояние которого в значительной степени зависит от характера сложных процессов и явлений, происходящих в зонах трения трущихся деталей. Это приводит к тому, что, с одной стороны, для оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов может быть использовано большое количество методов трибомониторинга, основанных на различных физических принципах, а с другой стороны, невозможно получить исчерпывающую информацию о состоянии смазочного материала при использовании только одного из методов. Каждый из методов лишь в большей или меньшей степени характеризует различные стороны сложных процессов и явлений, протекающих в зоне трения. В связи с этим различными научными школами и производственными коллективами проводятся исследования по усовершенствованию существующих и поиску новых принципов выявления информации о состоянии смазочных материалов в зонах трения, алгоритмов обработки измерительных сигналов с целью выделения требуемой информации, а также по разработке реализующих эти принципы и алгоритмы средств контроля смазочных материалов. Проводятся такие работы и в ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК».

Очевидно, что при решении обозначенного круга научно-технических задач проводится анализ состояния вопроса, для реализации которого необходима информационная база, включающая данные: по существующим методам контроля смазочных материалов и направлениям их развития; по перспективным областям применения отдельных методов и конкретных технических решений по средствам; по диагностическим параметрам в рамках каждого из методов, их информативности и эффективности при решении конкретных задач и т.п.

Такая информационная база на протяжении ряда лет формируется на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК». В этой статье представлены результаты очередного этапа работ, выполненных в этом направлении. Содержанием данного этапа работ стало проведение патентных исследований по

проблеме методов и средств контроля смазочных материалов, анализ патентно-лицензионной ситуации в данной области, выявление тенденций развития объекта исследований и областей наиболее эффективного применения физических принципов различной природы.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Патентные исследования проведены с целью определения современного состояния и тенденций развития методов и средств контроля, исследования и анализа смазочных материалов. Они направлены на решение следующих задач:

- исследование, конкретизация и анализ задач методов анализа смазочных материалов, применяемых в триботехнических системах;
- исследование и анализ номенклатуры диагностических признаков и параметров, используемых при анализе свойств смазочных материалов;
- анализ патентно-лицензионной ситуации в области методов и средств исследования и анализа смазочных материалов.

Патентные исследования проведены в соответствии с ГОСТ 15.011-96 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» [1]. Глубина патентного поиска принята с 1983 г. по 2010 г. В качестве информационной базы определен отраслевой фонд ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» и средства Глобальной информационной сети «Интернет» в базе данных Роспатента «Российские патенты на изобретения и патенты на полезные модели, заявки на изобретения, рефераты (1994-2010 г.)». Для поиска информации выбраны УДК 621.891, 621.9.01, 621.822, 620.179, при этом регламент патентного поиска охватил следующие классификационные рубрики МПК в разделе G «Физика»:

- G 01 D 21/00 «Способы и устройства для измерения или испытания, не отнесенные к другим подклассам»;
- G 01 K 11/06 «Термометры, действие которых основано на изменении физических или химических свойств веществ в зависимости от температуры, не отнесенные к группам 3/00 - 9/00, с использованием плавления, замерзания, размягчения»;
- G 01 N 11/10 «Исследование свойств текучих сред, например определение вязкости, пластичности; анализ материалов путем определения их текучести путем перемещения какого-либо тела в материале»;
- G 01 N 13/00 «Исследование поверхностных или граничных свойств, например смазывающей способности; исследование диффузионных эффектов; анализ материалов путем определения их поверхностных, граничных и диффузионных эффектов; исследование или анализ поверхностных структур в атомном диапазоне»;
- G 01 N 15/06 «Исследование свойств частиц; определение проницаемости, пористости или площади поверхности пористых материалов; определение концентрации частиц в суспензиях»;
- G 01 N 17/00 «Исследование устойчивости материалов к атмосферному или световому воздействию; определение антикоррозионных свойств»;
- G 01 N 21/31 «Исследование или анализ материалов с помощью оптических средств, т.е. с использованием инфракрасных, видимых или ультрафиолетовых лучей, системы, в которых на падающий свет влияют свойства исследуемого материала, цвет, спектральные свойства, т.е. сравнение воздействия материала на свет двух или более различных длин волн или в двух или более полосах спектра, путем исследования сравнительного воздействия материала на волновые характеристики особых элементов или молекул, например абсорбционная спектрометрия»;
- G 01 N 21/67 «Исследование или анализ материалов с помощью оптических средств, т.е. с использованием инфракрасных, видимых или ультрафиолетовых лучей, системы, в которых на падающий свет влияют свойства исследуемого материала, системы, в которых исследуемый материал возбуждается, в результате чего он испускает свет или изменяет длину

волны падающего света, материал возбуждается электрическими средствами, например электролюминесценция, с использованием электрической дуги или разрядов»;

– G 01 N 21/73 «Исследование или анализ материалов с помощью оптических средств, т.е. с использованием инфракрасных, видимых или ультрафиолетовых лучей, системы, в которых на падающий свет влияют свойства исследуемого материала, системы, в которых исследуемый материал возбуждается, в результате чего он испускает свет или изменяет длину волны падающего света, материал возбуждается электрическими средствами, например электролюминесценция, материал возбуждается термическими средствами, с использованием плазменных горелок»;

– G 01 N 25/00 «Исследование или анализ материалов с помощью тепловых средств»;

– G 01 N 27/02 «Исследование или анализ материалов путём измерения их полного сопротивления»;

– G 01 N 27/27 «Исследование или анализ материалов путём соединения двух и более измерительных систем, измеряющих различные параметры»;

– G 01 N 27/74 «Исследование или анализ материалов с помощью электрических, электрохимических или магнитных средств путем исследования магнитных параметров текучих сред»;

– G 01 N 33/00 «Исследование или анализ материалов особыми способами, не отнесенными к группам»;

– G 01 N 33/30 «Исследование и анализ смазок»;

– G 01 R 27/22 «Устройства для измерения активного, реактивного и полного сопротивления или электрических характеристик, производных от них; измерение активного, реактивного и полного сопротивления или других производных от них характеристик двухполюсника, например постоянной времени; измерение сопротивления жидкостей или газов».

В качестве источников информации, по которым проводился поиск, использовались: патентные источники (авторские свидетельства, патенты и свидетельства на полезную модель); научно-техническая информация (монографии, справочники, статьи в профильных научно-технических журналах, отчеты о НИР, труды конференций, учебные пособия); нормативные источники (государственные (национальные) стандарты России и СССР по триботехническим испытаниям). Глубина поиска – 27 лет (с 1983 г. по 2010 г.).

При оформлении отчёта о патентном поиске в качестве материалов для последующего анализа отобраны: 25 описаний к охраняемым документам по 16 рубрикам МКИ и МПК, книги, статьи, доклады и отчеты. Собранные материалы позволили провести анализ в соответствии с поставленными задачами патентных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПАТЕНТНО-ЛИЦЕНЗИОННОЙ СИТУАЦИИ

Проведённый патентный поиск позволил систематизировать информацию о технических решениях и установить следующую обобщенную классификацию методов контроля, исследований и анализа смазочных материалов: методы фотометрии и спектрометрии; механические методы; тепловые методы; ультразвуковые методы; химические методы; электрические методы; электромагнитные методы.

Установлены наиболее эффективные области применения методов контроля, исследований и анализа смазочных материалов, охватывающие широкий круг задач.

Методы фотометрии и спектрометрии являются одними из наиболее широко распространенных методов анализа смазочных материалов. Они используются, в основном, для оценки свойств смазочных материалов или определения концентрации примесей в маслах. При этом в первом случае о состоянии материала судят по изменению светового потока, проходящего через пробу, а во втором – по спектру оптического или лазерного излучения. Выявленные технические решения направлены на достижение следующих целей:

– определение характеристик микропримесей металлов в смазочных маслах (патент РФ № 2182330);

– идентификация и контроль показателей качества смазочных материалов (патент РФ № 2184950);

– определение технического состояния, и, в частности, оценка степени износа, двигателей, машин и механизмов по характеристикам микропримесей металлов, обнаруженных в смазочных маслах (патент РФ № 2194973);

– оценка термостабильности смазочных масел (патент РФ № 2240558);

– определение температуры застывания масел (патент РФ № 2243514);

– определение концентрации продуктов изнашивания в отработанном смазочном масле двигателей внутреннего сгорания (патент РФ на полезную модель № 51741);

– оценка коррозионной активности масел (патент РФ № 2304764).

Механические методы включают в себя комплекс методов, направленных на измерение моментов и сил трения, методы взвешивания и определения линейных разметов отдельных деталей трибосопряжения и продуктов износа. Применительно к исследованию и анализу смазочных материалов механические методы направлены на решение следующих задач:

– количественная оценка содержания абразивных механических примесей в моторных маслах, выполняемая стандартным весовым методом (авторское свидетельство СССР № 709998);

– оценка энергии активации термомеханической деструкции смазочных материалов при трении (патент РФ № 2119165);

– оценка загрязнённости смазочного масла механическими примесями, выполняемая механическим измерением вязкости (патент РФ на полезную модель № 57007).

Тепловые методы широко применяются, так как позволяют получать информацию о температуре в зоне трения и о распределении теплового поля в изделии. Необходимо отметить, что при исследовании смазочных материалов тепловые методы используются в сочетании с методами другой природы, например, совместно с методами фотометрии и спектрометрии, механическими и ультразвуковыми методами. Посредством применения тепловых методов анализа смазочных масел решаются такие аналитические задачи, как:

– количественная оценка содержания абразивных механических примесей в моторных маслах (авторское свидетельство СССР № 709998);

– оценка термостабильности смазочных масел (патент РФ № 2240558);

– определение температуры застывания масел (патент РФ № 2243514);

– оценка загрязнённости смазочного масла механическими примесями (патент РФ на полезную модель № 57007);

– определение термоокислительной стабильности смазочных материалов, температуры и скорости окисления (патент РФ № 2318206).

Ультразвуковые методы при исследовании смазочных материалов применяются не столь интенсивно, однако совместно с тепловым и механическим методами могут использоваться для решения задачи оценки загрязнённости смазочного масла механическими примесями (патент РФ на полезную модель № 57007).

Химические методы используются, как правило, для оценки химического состава и состояния масел. Для их осуществления требуются индикаторы – вещества, изменяющие цвет, фазовое состояние или другие свойства при смешивании с объектом исследования. По результатам выполненного патентного поиска установлено, что при анализе смазочных материалов химические методы могут использоваться при решении задачи определения кондиционности смазочных материалов со щелочными присадками (патент РФ № 2212032).

Электрические методы широко применяются при исследовании смазочных материалов. Их сущность заключается в оценке состояния объекта по значениям электрических диагностических параметров, характеризующих сложные процессы, протекающие в зонах трения его деталей, а особая ценность заключается в возможности проведения оценки свойств смазочных материалов непосредственно в узле трения машины (патент РФ на полезную модель № 40469, патенты РФ № 2315975, 2322660).

В настоящее время электрические методы анализа смазочных материалов используются для решения следующих задач:

– оценка степени износа рабочих поверхностей трибосопряжения по концентрации продуктов износа в отработанном смазочном материале (авторское свидетельство СССР № 1149147, патенты РФ № 2138032, 2310187, 2315975, 2322660);

– измерение удельного электрического сопротивления или удельной электрической проводимости смазочного материала (патенты РФ № 2105317, 2105969, патент РФ на полезную модель № 35895);

– оценка степени загрязнённости моторного масла механическими примесями (патент РФ на полезную модель № 40469, патент РФ № 2301414);

– определение свойств многокомпонентных смазочных материалов (патент РФ № 2317538).

Электромагнитные методы также используются при исследовании смазочных материалов. Круг решаемых с их помощью задач включает:

– определение электрических свойств смазочных материалов с целью получения стандартных справочных данных (патент РФ № 2209421);

– оценку степени износа рабочих поверхностей трибосопряжения по концентрации продуктов износа в отработанном смазочном материале (патент РФ № 2234080).

Установлена номенклатура диагностических параметров, применяемых для получения первичной измерительной информации об эксплуатационных свойствах и состоянии смазочных материалов. Диагностические параметры классифицированы по методам.

Методы фотометрии и спектрометрии предполагают использование следующих диагностических параметров: спектральный состав плазменного излучения пробы смазочного материала, отработавшего свой ресурс (патенты РФ № 2182330, 2304764); коэффициент поглощения света (патент РФ № 2184950); флуктуации параметров лазерного излучения, прошедшего через пробу смазочного материала (патент РФ № 2194973); интенсивность светового потока, прошедшего через пробу смазочного материала, отработавшего свой ресурс (патенты РФ № 2240558, 2243514, патент РФ на полезную модель № 51741).

Механические методы основаны на применении диагностических параметров: масса сухого остатка отработанного смазочного материала (авторское свидетельство СССР № 709998); энергия активации термомеханической деструкции смазочных материалов при трении (патент РФ № 2119165); флуктуации времени падения рабочего тела в пробе смазочного материала (патент РФ на полезную модель № 57007).

Тепловые методы реализуются посредством использования следующих параметров: разность температур равных частей проб смазочного материала (патент РФ № 2240558); температура пробы смазочного материала (патент РФ № 2243514); температура окисления смазочного материала (патент РФ № 2318206).

Ультразвуковые методы позволяют проводить анализ смазочных материалов с помощью таких диагностических параметров, как амплитуда, частота и энергия ультразвуковых колебаний (патент РФ на полезную модель № 57007).

Химические методы анализа смазочных материалов реализуются посредством применения такого диагностического параметра, как цвет вещества-индикатора химического состава и кондиционности смазочного материала (патент РФ № 2212032).

Электрические методы осуществляются с использованием диагностических параметров: флуктуации параметров экзoeлектронной эмиссии (авторское свидетельство СССР № 1149147); удельное электрическое сопротивление смазочного материала (патент РФ № 2105317); удельная электрическая проводимость смазочного материала (патент РФ № 2105969); флуктуации электрохимического потенциала смазочного материала (патент РФ № 2138032, патент РФ на полезную модель № 35895); электрическая ёмкость смазочного материала (патент РФ на полезную модель № 40469, патент РФ № 2301414); диэлектрическая проницаемость смазочного материала (патенты РФ № 2310187, 2315975, 2317538, 2322660).

Электромагнитные методы анализа смазочных материалов предполагают применение следующих диагностических параметров: флуктуации параметров электромагнитного

колебательного контура (патент РФ № 2209421); ЭДС электромагнитной индукции индукционного преобразователя (патент РФ № 2234080).

Комплексные диагностические параметры. Для контроля, исследования и анализа смазочных материалов используются не только единичные, но и *комплексные диагностические параметры*, сочетающие в себе диагностические признаки различной природы (механические, тепловые, электрические и т.п.). Применение подобных параметров позволяет получать более достоверную информацию о состоянии объекта исследований. Среди известных комплексных диагностических параметров необходимо отметить следующие их виды:

- совместное использование коэффициента поглощения светового излучения, параметров вязкости и разности температур двух проб смазочного материала (патент РФ № 2240558);

- совместное использование интенсивности светового потока и температуры застывания смазочного материала (патент РФ № 2243514);

- совместное использование параметров ультразвуковых колебаний (амплитуда, частота, энергия), температуры смазочного материала и флуктуаций времени падения рабочего тела в пробе масла (патент РФ на полезную модель № 57007);

- совместное использование температуры окисления смазочного материала, скорости его окисления и интенсивности испаряемости смазочного материала (патент РФ № 2318206).

Выявлены *тенденции развития* методов и средств контроля, исследования и анализа смазочных материалов. Данные *тенденции* состоят в следующем:

- *анализ пробы смазочного материала* (проба смазочного материала, либо нового, либо отработавшего свой ресурс, анализируется выбранными методами оценки технического состояния; по результатам анализа пробы оцениваются параметры, характеризующие состояние объекта исследований, проводится идентификация смазочного материала);

- *анализ свойств смазочных материалов непосредственно в объекте* (контроль степени загрязнения смазочного материала ёмкостным методом по шкале порядка (25%, 50%, 75%, 100%); устройство размещается на борту автомобиля, в масляном резервуаре);

- *разработка стационарных средств контроля качества смазочных материалов* (оценка загрязнённости потока смазочного материала; первичный преобразователь средства контроля размещают в трубе для циркуляции смазочного материала);

- *совместное использование диагностических параметров различной природы* (проводят совместные измерения параметров: коэффициента поглощения светового излучения, параметров вязкости и разности температур двух проб смазочного материала (СМ); интенсивности светового потока и температуры застывания СМ; параметров ультразвуковых колебаний, температуры СМ и флуктуаций времени падения рабочего тела в пробе СМ; температуры окисления СМ, скорости окисления и интенсивности испаряемости СМ);

- *совершенствование методов исследований смазочных материалов* (о кондиционности моторного масла судят по окраске смеси исследуемого масла и химического соединения-индикатора (различные оттенки зеленого цвета); проба смазочного материала размещается в ячейке, нагревается ультразвуком, измеряется время падения рабочего тела);

- *новые диагностические параметры* (способ определения технического состояния двигателей и других машин и механизмов по характеристикам микропримесей металлов, обнаруженных в смазочных маслах, топливах и специальных жидкостях; диагностический параметр – флуктуации параметров лазерного излучения).

Анализ динамики патентования с 1983 по 2010 гг. (рис. 1 и 2) показывает, что за рассматриваемый период:

- наблюдается устойчивая тенденция роста изобретательской активности в анализируемой области (с одного охранного документа в 1983 году до семи – в 2004 году и трёх – в 2008 году);

- активность деятельности по разработке и совершенствованию различных методов различна, при этом наиболее интенсивно развивающимися методами являются электрические методы (35,7 % технических решений), методы фотометрии и спектрометрии

(25 % технических решений) и тепловые методы исследований (14,3 % технических решений);

– принимая во внимание, что тепловые методы (14,3 % технических решений), как правило, реализуются путём оценки температуры электрическим методом, весомость электрических методов триботехнических исследований и анализа смазочных материалов существенно возрастает.

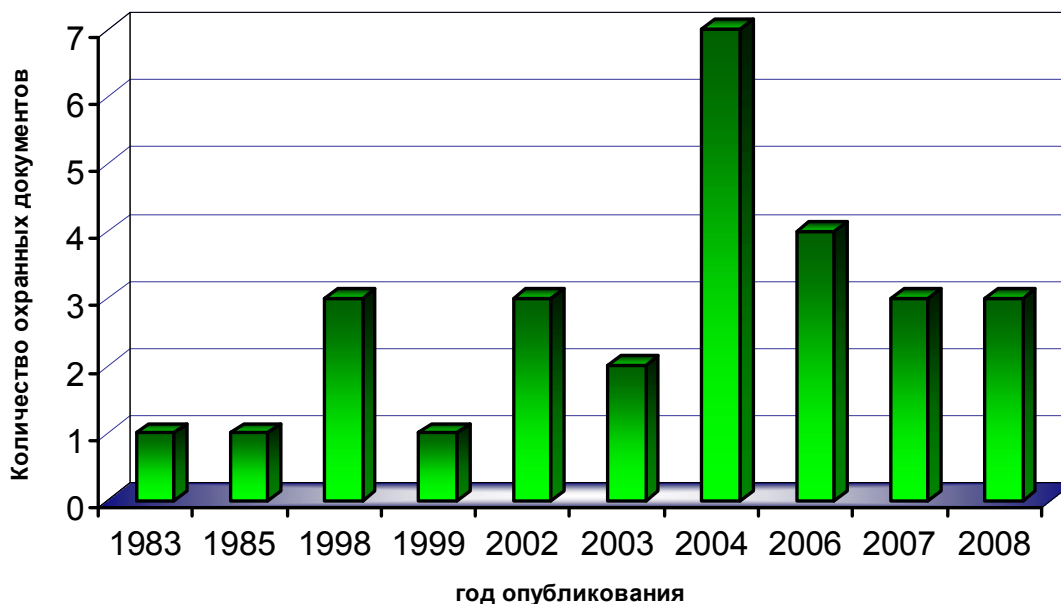


Рисунок 1 – Динамика патентования по проблеме методов и средств контроля, исследований и анализа смазочных материалов

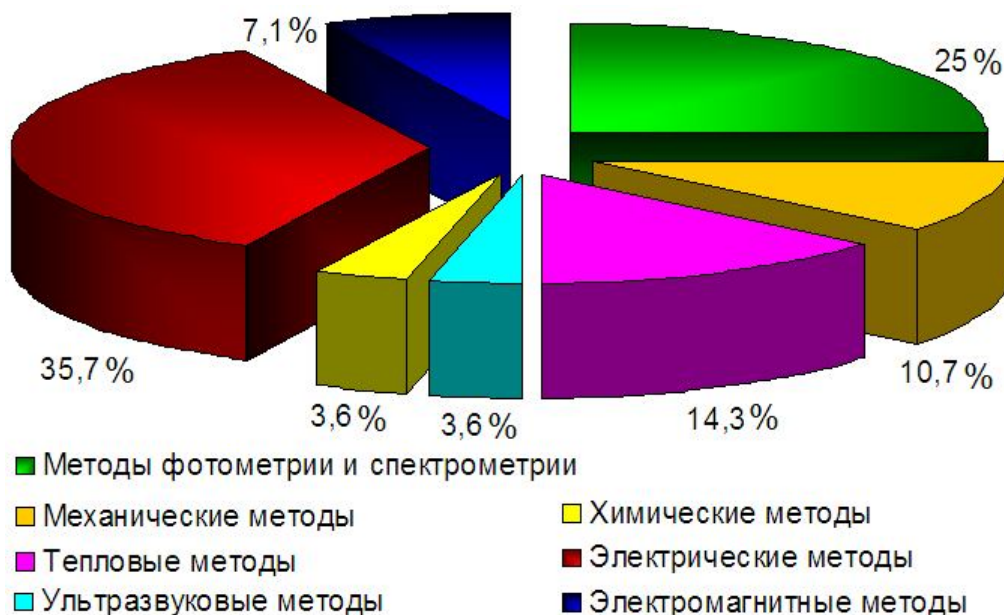


Рисунок 2 – Процентное соотношение технических решений по методам и средствам контроля, исследований и анализа смазочных материалов

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований определена классификация методов контроля, исследования и анализа смазочных материалов: методы фотометрии и спектрометрии; химические методы; электрические методы; электромагнитные методы.

Установлены эффективные области применения методов исследования и анализа смазочных материалов, охватывающие широкий круг задач:

1) методы фотометрии и спектрометрии: определение характеристик микропримесей металлов в смазочных маслах; идентификация и контроль показателей качества смазочных материалов; определение технического состояния, и, в частности, оценка степени износа, двигателей, машин и механизмов по характеристикам микропримесей металлов, обнаруженных в смазочных маслах; оценка термостабильности смазочных материалов; определение температуры застывания масел; определение концентрации продуктов изнашивания в отработанном смазочном масле двигателей внутреннего сгорания; оценка коррозионной активности масел;

2) механические методы: количественная оценка содержания абразивных механических примесей в моторных маслах, выполняемая стандартным весовым методом; оценка энергии активации термомеханической деструкции смазочных материалов при трении; оценка загрязнённости смазочного масла механическими примесями, выполняемая механическим измерением вязкости;

3) тепловые методы: количественная оценка содержания абразивных механических примесей в моторных маслах; оценка термостабильности смазочных масел; определение температуры застывания масел; оценка загрязнённости смазочного масла механическими примесями; определение термоокислительной стабильности смазочных материалов, температуры и скорости окисления;

4) ультразвуковые методы: оценка загрязнённости смазочного масла механическими примесями;

5) химические методы: определение кондиционности смазочных материалов со щелочными присадками;

6) электрические методы: оценка степени износа рабочих поверхностей трибосопряжения по концентрации продуктов износа в отработанном смазочном материале; измерение удельного электрического сопротивления или удельной электрической проводимости смазочного материала; оценка степени загрязнённости моторного масла механическими примесями; определение свойств многокомпонентных смазочных материалов;

7) электромагнитные методы: определение электрических свойств смазочных материалов с целью получения стандартных справочных данных; оценка степени износа рабочих поверхностей трибосопряжения по концентрации продуктов износа в отработанном смазочном материале.

Установлена номенклатура диагностических параметров, используемых при исследованиях свойств смазочных материалов, включающая комплекс единичных и комплексных параметров различной природы.

На основании патентных исследований установлено, что основные тенденции развития методов контроля, исследования и анализа смазочных материалов состоят в следующем: анализ проб смазочного материала; анализ свойств смазочных материалов непосредственно в исследуемом объекте; разработка стационарных средств контроля качества смазочных материалов; совместное использование нескольких диагностических параметров; совершенствование методов исследований смазочных материалов; применение новых параметров.

На основании анализа патентно-лицензионной ситуации установлено, что электрические методы обладают рядом преимуществ и являются одними из наиболее интенсивно развивающихся методов. При этом изобретательская активность имеет циклический характер, поэтому уменьшение количества опубликованных охранных документов в 2007, 2008-й и последующие годы не указывает на фактическое снижение изобретательской активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 15.011-96 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 37 с.
2. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / Под ред. В.А. Белого. – Минск: Наука и техника, 1987. – 265 с.

Марков Владимир Владимирович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл, Россия

Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н., доцент

Тел. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

V.V. MARKOV

The results of patent search behind period with 1983 and 2010 years by problem methods and means of check, researches and analyses the lubricant material is produced. Is conducted the analysis of patent and license situation in the limits of this problem. Is settled the classification of methods the check of lubricant materials, is define of list the diagnostically parameters, is reveal the tendency of development and directions of the same effective application various methods and means the check of lubricant materials.

Keywords: *methods of the friction monitoring; lubricant material; check; the search of patent; patent and licenses situation; diagnostically parameters; classification of methods the check.*

BIBLIOGRAPHY

1. GOST 15.011-96 «Patentnye issledovaniya. Soderzhanie i porjadok provedeniya» [Tekst]. – M.: Izda-tel'stvo standartov, 1996. – 37 s.
2. Akusticheskie i jelektricheskie metody v tribotekhnike [Tekst] / Pod red. V.A. Belogo. – Minsk: Nauka i tehnika, 1987. – 265 s.

Markov Vladimir Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel, Russia

Associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”, candidate of technical science, associate professor

Tel. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

И.О. КОБЗЕВ, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ

С помощью разработанного ранее расчетно-экспериментального метода получены теоретические зависимости скорости термической деструкции двух дисперсионных сред пластичных смазочных материалов в подшипнике качения от электрических параметров микроконтактирования. Проведен сравнительный анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: скорость термической деструкции; моделирование; смазочный материал.

ВВЕДЕНИЕ

Ресурс работы узлов трения с ресурсным режимом смазывания связан со скоростью протекания реакций трибохимических превращений смазочного материала (СМ) в зоне трения. Реакции трибохимических превращений включают в себя ряд последовательных и параллельных реакций, в числе которых окисление, испарение, механокрекинг, крекинг, полимеризация, выброс из зоны трения и др.

Значительную роль в этой совокупности явлений играет температура, действию которой подвергается СМ, причем главным источником температурного воздействия является нагретая металлическая поверхность. Каждая из приведенных реакций характеризуется своей энергией активации и температурным диапазоном протекания. Рассматривая процесс трибохимических превращений как совокупность перечисленных реакций, имеет смысл говорить лишь о суммарной энергии активации [1].

В работе [2] был предложен расчетно-экспериментальный метод контроля степени термической деструкции СМ в подшипнике качения. Метод предполагает использование тепловой модели, предложенной А.В. Чичинадзе, а также электрических диагностических параметров:

- нормированного интегрального времени электрического контактирования (НИВ);
- средней частоты микроконтактирования (СЧМ).

Согласно [2] скорость термической деструкции пластичного смазочного материала может быть оценена с помощью выражения:

$$v(\text{НИВ, СЧМ}) = \frac{\text{НИВ} \cdot A_r}{t_0 \cdot S_{\text{ср}} \cdot N_{\Sigma}} e^{\frac{\Delta E_p}{R \cdot T(\text{НИВ, СЧМ})}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где A_r – фактическая площадь пятна контакта;

ΔE_p – суммарная энергия активации реакций трибохимического превращения СМ приводящих к необратимой термической деструкции;

R – универсальная газовая постоянная;

$T(\text{НИВ, СЧМ})$ – максимальная температура узла трения, зависящая от параметров НИВ и СЧМ;

t_0 – период колебания молекулы около положения равновесия;

$S_{\text{ср}}$ – средняя площадь проекции молекулы округлой формы на плоскую поверхность;

N_{Σ} – суммарное количество молекул жидкой фракции смазочного материала в трибоузле.

Выражение (1) характеризует относительное число молекул жидкой фракции пластичного смазочного материала, подвергающихся необратимой термической деструкции в единицу времени.

Способы оценки параметров, входящих в выражение (1), представлены в работах [2, 3]. Фактическая площадь пятна контакта определялась исходя из среднего значения силы трения ювенильно чистых металлических поверхностей микронеровностей, которая в свою очередь оценивалась на основании среднего диаметра фактического пятна касания и среднего значения работы цикла трения.

Параметры НИВ и СЧМ рассматриваются отнесенными к одному интервалу времени, в течение которого они (их статистические оценки) не изменяются в силу стационарности процесса трения. Скорость термической деструкции СМ, рассчитываемая на основании данных параметров, является усредненной для данного периода времени. В последующие периоды времени значения скорости будут различными. При стационарных значениях параметров НИВ и СЧМ, а также при прочих неизменных условиях значение скорости термодеструкции СМ будет также иметь стационарное значение. В последнем случае представляется возможность прогнозирования срока службы СМ по результатам измерения параметров НИВ и СЧМ, а применительно к узлам трения с ресурсным смазыванием – возможность прогнозирования срока службы всего трибоузла.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе ставится задача апробации расчетно-экспериментального метода, предложенного в (1) применительно к двум дисперсионным средам пластичных смазочных материалов, имеющих различную степень термоустойчивости, с целью подтверждения работоспособности предложенного метода. В работе рассматриваются дисперсионные среды пластичных смазочных материалов, поскольку согласно [4] именно дисперсионная среда определяет срок службы пластичного смазочного материала. Рассматриваемые дисперсионные среды не содержат присадок.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

В качестве испытуемых дисперсионных сред пластичных смазочных материалов в данной работе были использованы авиационное масло МС-20, обладающее относительно высокой термической стабильностью и менее термоустойчивое приборное масло МВП. Принималось, что данные масла являются дисперсионными средами пластичного смазочного материала, работающего в шарикоподшипнике типа 7000101 при следующих условиях:

- наружное кольцо неподвижно, внутреннее – подвижно;
- вид нагружения – местное радиальное;
- величина радиальной нагрузки 2 500 Н;
- частота вращения внутреннего кольца 1000 мин⁻¹;
- температура окружающей среды 20 °С;
- условия охлаждения подшипника – охлаждение на открытом воздухе без дополнительного обдува;
- степень герметичности узла – средняя.

Параметры испытуемых смазочных масел приведены в таблице 1.

Плотность, коэффициент теплоемкости, а также коэффициент теплопроводности дисперсионной среды СМ зависит от его температуры. Причем значения данных коэффициентов для широкого диапазона температур могут быть определены согласно выражениям, приведенным в [5]. Ввиду отсутствия сведений о средней температуре смазочного материала в работающем трибоузле при расчете скорости термической деструкции данные коэффициенты принимались соответствующими температуре 20 °С. Также необходимо отметить, что, согласно [1], суммарная энергия активации трибохимического превращения СМ зависит от степени герметичности узла трения с ресурсным режимом смазывания, так как имеет несколько различные значения для условий работы на открытом воздухе и в вакууме. В данной работе были использованы значения энергии активации, полученные в результате усреднения значений данной энергии для воздуха и вакуума.

Таблица 1 – Используемые параметры смазочных масел

Наименование дисперсионной среды	Масса среды, кг	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплоемкости, Дж/кг·К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Индекс вязкости	Энергия активации трибохимического превращения
МС-20 (минеральное)	$5 \cdot 10^{-3}$	893,2	$1,912 \cdot 10^3$	0,1339	80	76,1
МВП (минеральное)	$5 \cdot 10^{-3}$	895	$1,885 \cdot 10^3$	0,1300	97,4	67

Зависимости скорости термической деструкции смазочных материалов от электрических диагностических параметров НИВ и СЧМ, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке 1.

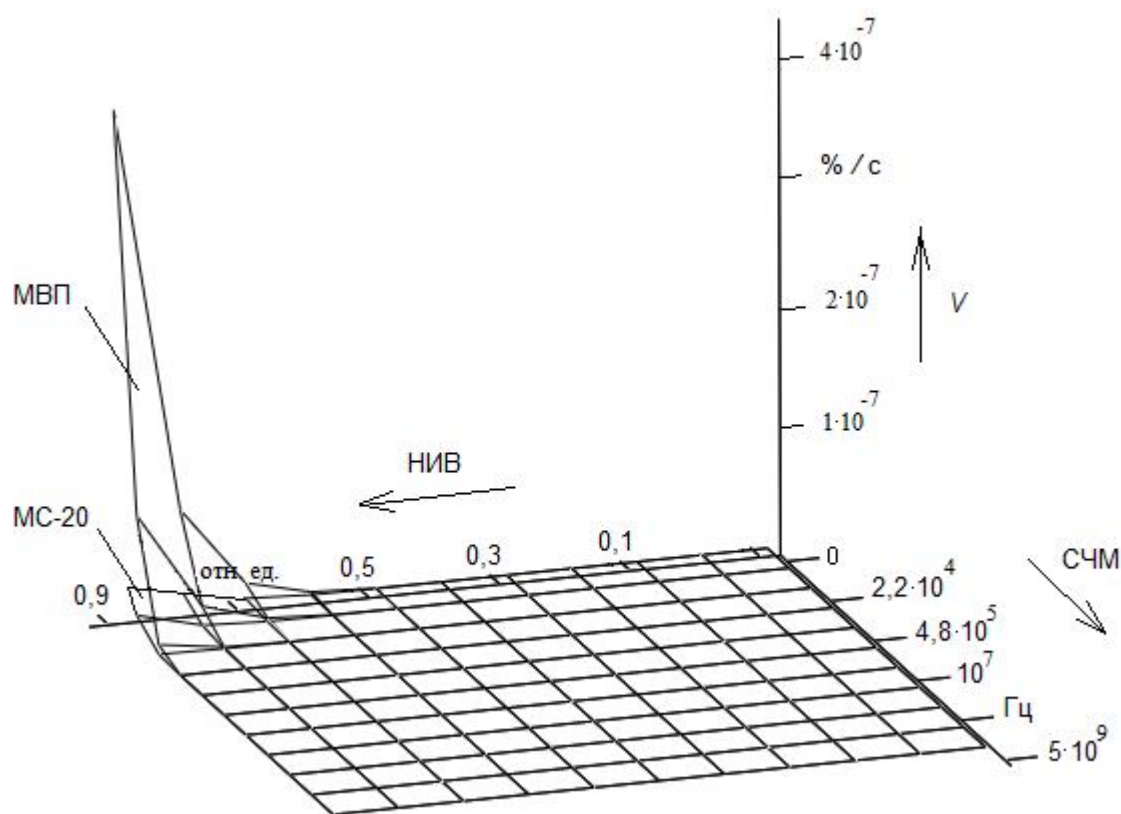


Рисунок 1 – Зависимости скорости термической деструкции смазочных масел МС-20 и МВП от параметров НИВ и СЧМ

График подтверждает тот факт, что масло МС-20 является более термически устойчивым, так как скорость его термодеструкции не превышает скорость термодеструкции масла МВП во всем диапазоне изменения значений НИВ и СЧМ. Минимальное значение скорости термодеструкции для испытуемых масел оказалось менее 10^{-25} % / с, максимальные же значения скоростей составили $1,4 \cdot 10^{-8}$ % / с – для масла МС-20, и $4,1 \cdot 10^{-7}$ % / с – для масла МВП. Максимум значений скорости термической деструкции наблюдается при наибольших значениях НИВ и наименьших значениях СЧМ, то есть при режиме сухого трения. Это можно объяснить значительным повышением максимальной температуры трибоузла в области значений этих параметров. Подтверждающая данный факт зависимость максимальной тем-

пературы, существующей внутри работающего подшипника качения, от параметров НИВ и СЧМ представлена в работе [6]. Минимум значений скорости термической деструкции соответствует наименьшим значениям НИВ и наибольшим значениям СЧМ, что также соответствует температурной зависимости, приведенной в [6]. Так же, как и в [6], если НИВ равен нулю, и СЧМ равна нулю, скорость термодеструкции и температура также равны нулю.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исходя из результатов моделирования, можно утверждать, что предложенный в работе [2] расчетно-экспериментальный метод контроля степени термической деструкции достаточно хорошо согласуется с методом контроля максимальной температуры, предложенным в работах [3, 6].

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)", код проекта 10423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников, В.Г. Влияние параметров трения на энергию активации трибохимического разложения смазочных материалов в зоне трения – качения [Текст] / В.Г. Мельников // Трение и износ – 2001. – № 5 (22). – С.567–574.
2. Кобзев И.О. О возможности исследования электрическим методом скорости термодеструкции смазочных материалов, определяемой максимальной температурой в зоне трения [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2011. – № 2 (286) – С. 152-159.
3. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. – № 6 – С. 143-150.
4. Мельников, В.Г. Работоспособность и кинетические закономерности трибохимических превращений пластичных смазок в зоне трения-качения [Текст] / В.Г. Мельников // Трение и износ – 2004. – Т.26, №1 – С. 58-73.
5. Фройштетер, Г.Б. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок [Текст] / Г.Б. Фройштетер, К.К. Трильский, Ю.Л. Ишук, П.М. Ступак. – М.: Химия, 1980. – 175 с. : граф., рис., табл., фото.
6. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы [Текст] / Е.В. Пахолкин, И.О. Кобзев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. – № 6.2 – С. 34-40.

Подмастерьев Константин Валентинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс", г. Орел
Зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация», д.т.н., профессор
Тел. (84862) 419803
E-mail PMS35@ostu.ru

Кобзев Илья Олегович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс", г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. 89208085387
E-mail: K87-107019@yandex.ru

I.O. KOBZEV, K.V. PODMASTERYEV

SIMULATION SPEED THERMAL DEGRADATION OF LUBRICANTS AT THE BEARINGS

Using a previously developed computational-experimental method obtained the theoretical dependence of the thermal degradation of two dispersion media of plastic lubricants in the bearings of the electrical parameters mikrokontaktirovaniya. A comparative analysis of the dependencies.

Keywords: rate of thermal decomposition; modeling; grease.

BIBLIOGRAPHY

1. Mel'nikov, V.G. Vlijanie parametrov trenija na jenergiju aktivacii tribohimicheskogo razlozhenija smazochnyh materialov v zone trenija – kachenija [Tekst] / V.G. Mel'nikov // Trenie i iznos – 2001. – № 5 (22). – S.567–574.
2. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod kontrolja stepeni termicheskoj destrukcii smazoch-nogo materiala v podshipnike kachenija [Tekst] / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2011. (stat'ja prinjata v pechat')
3. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temeperatury v sharikopodshipnike. Chast' 1. Matematicheskaja model' maksimal'noj temperatury [Tekst] / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6 – S. 143-150.
4. Mel'nikov, V.G. Rabotosposobnost' i kineticheskie zakonomernosti tribohimicheskikh prevrascenij plastichnyh smazok v zone trenija-kachenija [Tekst] / V.G. Mel'nikov // Trenie i iznos – 2004. – T.26, №1 – S. 58-73.
5. Frojshteter, G.B. Reologicheskie i teplofizicheskie svojstva plastichnyh smazok [Tekst] / G.B. Frojshteter, K.K. Triliskij, Ju.L. Iwuk, P.M. Stupak. – M.: Himija, 1980. – 175 s. : graf., ris., tabl., foto.
6. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temperatury v sharikopodshipnike. Chast' 2. Primenenie diagnosticheskikh parametrov jelektricheskoj grupy [Tekst] / E.V. Paholkin, I.O. Kobzev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6.2 – S. 34-40.

Podmasteryev Konstantin Valentinovich

State University – Education Science Production Complex, Orel, Russia

Head of department “Instrument engineering, metrology and certification”, Doctor of Engineering, professor

Tel. (84862) 419803

E-mail asms-orel@mail.ru

Kobzev Iliya Olegovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. 89208085387

E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАШИННОГО МАСЛА

В статье показана возможность исследования нелинейной зависимости между поляризованностью диэлектрика и напряженностью приложенного к нему электрического поля на примере машинного масла.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; гистерезис; поляризация диэлектрика; диэлектрические потери.

Для снижения трения и изнашивания разнообразных узлов трения в технике широко используют смазочные материалы. Они служат для отвода тепла из зоны трения, для защиты рабочих поверхностей деталей от коррозии, кроме того, они обеспечивают герметизацию узлов трения, очищают детали от загрязняющих отложений, нагара, продуктов износа и т. д. От правильного подбора смазочного материала и его качества во многом зависит долговечность машины [1].

Смазочные масла классифицируют по назначению и области применения:

- моторные, применяемые для двигателей внутреннего сгорания;
- трансмиссионные, применяемые для смазки элементов трансмиссий транспортных средств;
- индустриальные, применяемые для смазки промышленного оборудования, а также в качестве рабочих жидкостей гидросистем.

В настоящее время для определения качества нефтяных масел обычно требуется целый комплекс лабораторного оборудования: для измерения вязкости, показателя преломления, плотности, щелочного числа, кислотного числа, содержания воды, металлов и др. Диэлектрическая проницаемость является еще одним важным комплексным показателем качества масла, с помощью которого можно оценивать его характеристики и принимать решение о его замене или дальнейшей эксплуатации. Изменение значения диэлектрической проницаемости в процессе эксплуатации машинного масла может указывать на наличие вредных веществ, таких как вода или на изменение его структуры, например, в результате окисления [2].

Чаще всего характеристики исследуемой среды оценивают по величине поглощённой энергии. Диэлектрическими потерями называют ту часть энергии приложенного электрического поля, которая рассеивается в диэлектрике за единицу времени. Эта энергия переходит в тепло и диэлектрик нагревается. Для количественного анализа диэлектрических потерь используют значение комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ [3].

Эквивалентная схема диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, представлена на рисунке 1. Емкость C соответствует собственному полю электродов, если в пространстве между ними нет диэлектрика. Все остальные значения емкости соответствуют различным механизмам поляризации: электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной, резонансной и спонтанной. Сопротивления, включенные последовательно с конденсаторами, эквивалентны потерям при этих механизмах поляризации [3].

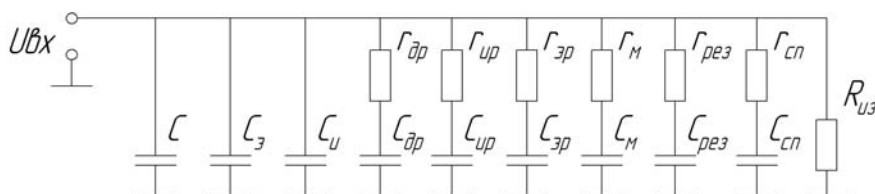


Рисунок 1 – Эквивалентная схема диэлектриков сложного состава с различными механизмами поляризации

Вся емкость конденсаторов эквивалентной схемы шунтирована сопротивлением изоляции $R_{из}$, представляющим собой сопротивление диэлектрика току сквозной электропроводности.

Поляризационные процессы смещения любых зарядов в веществе, протекая во времени до момента установления и получения равновесного состояния, обуславливают появление поляризационных токов или токов смещения в диэлектриках.

Зависимость между поляризованностью P и напряженностью поля E может иметь как линейный, так и нелинейный характер. В большинстве случаев нелинейностью пренебрегают, считая что соотношение между поляризованностью P и напряженностью поля E можно описать соотношением [3]:

$$P = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E, \quad (1)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика;

ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Характер изменения поляризованности от напряженности поля для линейных диэлектриков, показан на рисунке 2.

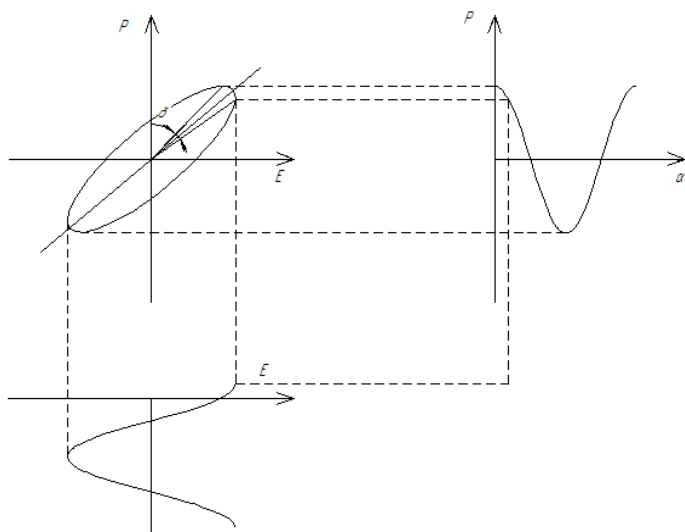


Рисунок 2 – Зависимость между поляризованностью и напряженностью поля для линейных диэлектриков

При отсутствии потерь, вызванных явлениями поляризации, поляризованность линейно зависит от напряжения. Если же в диэлектрике наблюдается замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая принимает вид эллипса.

Пропорциональность между векторами P и E отсутствует у нелинейных диэлектриков, к которым относятся, в частности, сегнетоэлектрики. Зависимость имеет вид характерной замкнутой кривой, которая называется петлей гистерезиса. На рисунке 3 показано изменение поляризованности от напряженности поля для нелинейных диэлектриков [4].

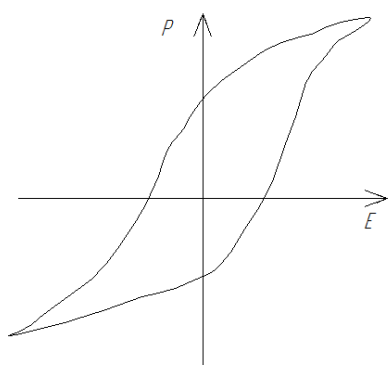


Рисунок 3 – Зависимость поляризованности от напряженности электрического поля у нелинейных диэлектриков

Нелинейную зависимость между поляризацией и напряженностью можно объяснить наличием спонтанной поляризации у диэлектрика, которая возникает в нем под влиянием внутренних процессов, без внешних воздействий. Диэлектрик разделен на домены, которые представляют собой макроскопические области с различным направлением векторов спонтанной поляризованности P_c . В отсутствии внешнего электрического поля суммарная поляризованность образца в целом равна нулю. При приложении внешнего электрического поля против вектора поляризации домена, его переполяризация происходит только тогда, когда напряженность поля достигнет определенного значения. Такую напряженность поля называют также коэрцитивной силой.

Современные масла являются многокомпонентными жидкостями и представляют собой смесь различных веществ, каждая из которых выполняет определенные функции. Обычно 90% объема приходится на долю базового масла, оставшиеся 10% – различные наполни-

тели и присадки. Компоненты, находящиеся в маслах могут привести к нелинейной зависимости между напряженностью и поляризованностью [1].

В маслах при их работе в двигателях происходят сложные процессы, протекание которых зависит от многих факторов и в том числе от качества масла, типа двигателя, его технического состояния, режима и условий работы, качества и рода топлива, надежности работы масляных, топливных фильтров и воздухоочистителей, климатических условий и других факторов.

Поскольку соотношение факторов, влияющих на протекающие в масле процессы, в каждом конкретном случае может быть индивидуальным, то могут изменяться и причины, по которым масло становится непригодным для дальнейшего использования. В одних случаях это будет недопустимо из-за большого содержания механических примесей, в других – топливных фракций, в третьих – воды, в четвертых – кислот и т. д. Таким образом, в процессе эксплуатации масла происходит модификация как его структуры, так и состава, что вызывает изменение его электрических характеристик, в частности вида зависимости между поляризованностью и напряженностью. Поэтому, данные о величине нелинейных искажений могут содержать информацию о характеристиках масла.

Для исследования величины нелинейных искажений предлагается использовать схему, представленную на рисунке 4.

С генератора Γ на схему подается синусоидальное напряжение. Емкостная ячейка, представленная на схеме параллельно включенной емкостью C и сопротивлением r , является источником нелинейных искажений. Таким образом, ток, протекающий в цепи, не будет синусоидальным и, протекая через активные сопротивления, будет формировать несинусоидальное напряжение. При помощи АЦП1 и АЦП2 осуществляется измерение мгновенных значений падения напряжения на всей измерительной схеме и на ячейке соответственно. Полученные данные передаются в персональный компьютер ПК для дальнейшей обработки. С помощью ключа K осуществляется изменение общего сопротивления схемы, что позволяет получать различные значения напряжений необходимые для расчета C и r .

Наличие и величину нелинейных искажений для диэлектрика можно оценить, исследуя спектры полученных напряжений. Для этого воспользуемся дискретным преобразованием Фурье [5]:

$$S(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot m}, \quad m = 0, \dots, N-1, \quad (2)$$

где N – количество полученных значений сигнала;

$s(n)$ – измеренные значения сигнала (в дискретных временных точках с номерами $n = 0, \dots, N-1$).

В качестве исследуемого диэлектрика использовалось полусинтетическое моторное масло Esso Uniflo Multigrade 10W-40 API SL.

Полученные спектры напряжений представлены на рисунке 5.

Очевидно, что потери в диэлектрике за первый и второй полупериоды изменения электрического поля должны быть равны. Таким образом, нелинейные искажения, вносимые исследуемым диэлектриком, вызывают в спектре сигнала появление только нечетных гармоник. Наличие в спектре четных гармоник можно объяснить не идеальностью генератора.

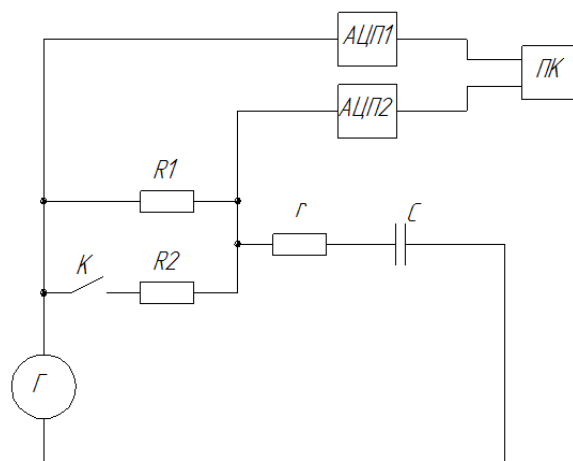


Рисунок 4 – Схема, предназначенная для исследования нелинейных искажений диэлектриков

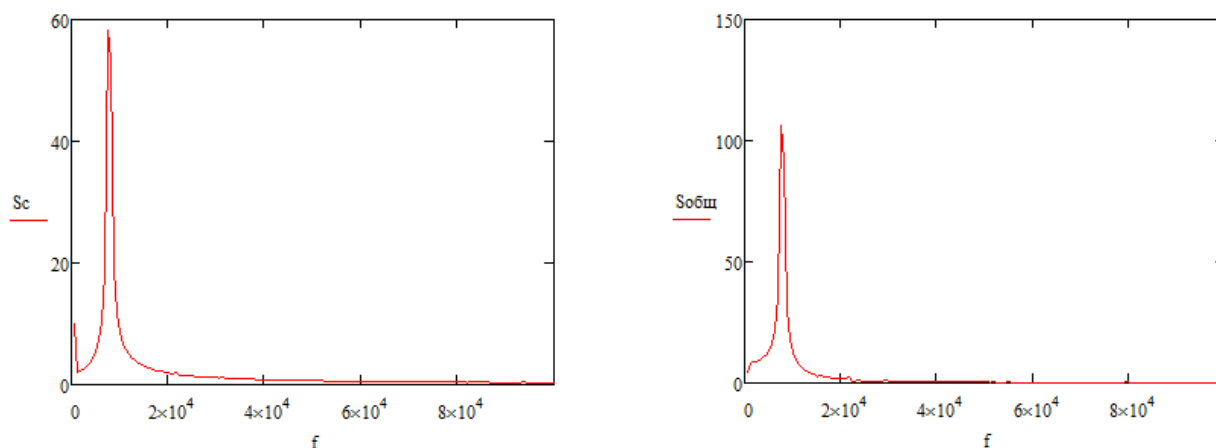


Рисунок 5 – Спектр полученных напряжений
 $S_c(f)$ – спектр напряжения полученного с АЦП1
 $S_{общ}(f)$ – спектр напряжения полученного с АЦП2

Для нахождения параметров емкостной ячейки составим систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{об} = \frac{U_я}{\sqrt{r^2 + X_C^2}} \cdot \sqrt{(R1+r)^2 + X_C^2} \\ U_{об}^K = \frac{U_я^K}{\sqrt{r^2 + X_C^2}} \cdot \sqrt{\left(\frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} + r\right)^2 + X_C^2} \end{cases}, \quad (3)$$

где $U_{об}$ и $U_{об}^K$ – напряжение первой гармоники, измеренное АЦП1 с разомкнутым и замкнутым ключом K соответственно;

$U_я$ и $U_я^K$ – напряжение первой гармоники, измеренное АЦП2 с разомкнутым и замкнутым ключом K соответственно;

X_C^2 – емкостная составляющая сопротивления ячейки.

Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

$R1$, кОм	$R2$, кОм	$U_{об}$, В	$U_я$, В	$U_{об}^K$, В	$U_я^K$, В
100,4	199,2	3,5	1,969	3,5	2,469

Решая систему (3), с полученными данными, находим, что:

$$X_C = 72287,27 \text{ Ом},$$

$$r = 6944,34 \text{ Ом}.$$

Найдем коэффициент третьей гармоники по напряжению с помощью выражения:

$$k_3 = \frac{|S(f_3)|}{|S(f_1)|} \quad (4)$$

где $S(f_1)$ и $S(f_3)$ – амплитуда напряжения, полученного по формуле (2), на первой и третьей гармониках соответственно.

Коэффициенты третьих гармоник по напряжению, при разомкнутом ключе K , снимаемых с АЦП 1 $k_{3_{общ}}$ и с АЦП2 k_{3_C} равны:

$$k_{3_{общ}} = 0,026,$$

$$k_{3_C} = 0,034.$$

Полученные значения показывают, что коэффициент третьей гармоники напряжения, снимаемого с емкостной ячейки, увеличивается на 30 % по сравнению с коэффициентом третьей гармоники напряжения на всей схеме.

Поскольку емкостное реактивное сопротивление обратно пропорционально частоте, то на третьей гармонике напряжения оно уменьшится в 3 раза:

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi f_3 C}, \quad (5)$$
$$X_{C_3} = 24095,76 \text{ Ом.}$$

Зная полное сопротивление участка цепи, можно найти коэффициент третьей гармоники по току k_{3I} :

$$k_{3I} = \frac{k_3}{Z_3} \cdot Z_1, \quad (6)$$

где Z_1 – сопротивление участка цепи на первой гармонике;

Z_3 – сопротивление участка цепи на третьей гармонике.

Коэффициенты третьих гармоник по току всей цепи $k_{I3_{\text{общ}}}$ и участка цепи с емкостной ячейкой k_{I3_c} равны:

$$k_{I3_{\text{общ}}} = 0,031,$$
$$k_{I3_c} = 0,099.$$

Так как коэффициенты третьей гармоники по току на всей цепи, и на емкостной ячейке неравны, то исследуемое масло следует относить к нелинейным диэлектрикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная трибология. Итоги и перспективы [Текст] / Под ред. Фролова К.В. – М.: ЛКИ, 2008. – 480 с. – ISBN 978-5-382-00518-8.
2. Волчков, А.Н. Экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости моторных масел в процессе их эксплуатации [Текст] / А.Н. Волчков, Е.В. Пахолкин, С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина // Известия Орел-ГТУ. - Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. - №1. – С. 43-46.
3. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с., ил.
4. Поплавко, Ю. М. Физика диэлектриков: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Поплавко. – Киев: Вища школа, 1980. – 400 с.
5. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с. – ISBN 5-256-01701-2.

Корндорф Сергей Фердинандович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл

Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: pms@ostu.ru

Костин Максим Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: smarchoc@gmail.com

S.F. KORNDORF, M.S. KOSTIN

INVESTIGATION OF NONLINEAR PROPERTIES LUBE

The article shows the possibility of studying non-linear relationship between the polarization of the dielectric and the applied electric field to it by the example of engine oil.

Keywords: *permittivity; hysteresis; polarization of the dielectric; dielectric loss.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sovremennaja tribologija. Itogi i perspektivy [Tekst] / Pod red. Frolova K.V. – M.: LKI, 2008. – 480 s. – ISBN 978-5-382-00518-8.
2. Volchkov, A.N. Jeksperimental'nye issledovanija dijelektricheskoj pronicaemosti motornyh masel v processe ih jekspluatcii [Tekst] / A.N. Volochkov, E.V. Paholkin, S.N. Sychev, V.A. Gavrilina // Izvestija Orel-GTU. - Ser. Mashinostroenie. Priborostroenie. – 2005. - №1. – S. 43-46.
3. Bogorodickij, N.P. Jelektrotehničeskie materialy : ucheb. dlja vuzov / N.P. Bogorodickij, V.V. Pa-synkov, B.M. Tareev – 7-e izd., pererab. i dop. – L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1985. – 304 s., il.
4. Poplavko, Ju. M. Fizika dijelektrikov: ucheb. posobie dlja vuzov / Ju.M. Poplavko. – Kiev: Viwa shkola, 1980. – 400 s.
5. Tihonov, V.I. Statisticheskij analiz i sintez radiotehničeskikh ustrojstv i sistem / V.I. Tihonov, V.N. Harisov. – M.: Radio i svjaz', 2004. – 608 s. – ISBN 5-256-01701-2.

Korndorf Sergey Ferdinandovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, professor, professor of department „Instrument engineering, metrology and certification”

Tel.: (4862) 41-98-76

E-mail: pms@ostu.ru

Kostin Maksim Sergeevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department „Instrument engineering, metrology and certification”

Tel.: (4862) 41-98-76

E-mail: smarchoc@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПАР ТРЕНИЯ

Работа содержит описание мониторинга процессов ремонтного восстановления рабочих поверхностей узлов трения качения и скольжения. Мониторинг осуществлялся с использованием электрического метода трибодиагностики. Выявлена высокая чувствительность электрических диагностических параметров к изменению качества поверхностей трения.

Ключевые слова: трибомониторинг; электрический метод; ремонтно-восстановительный состав; модифицированный слой.

В публикациях [1-3] дано обоснование применения электрического метода трибодиагностики для мониторинга процессов действия ремонтно-восстановительных составов (РВС). При наличии в смазочном материале узла трения РВС происходит модифицирование поверхностей трения и улучшение их качества. Электрический метод трибодиагностики обладает рядом преимуществ перед другими методами при изучении процессов, связанных с действием РВС, и может широко использоваться в промышленности [1,2]. Таким образом, цель проведенных экспериментальных исследований – изучение характера изменения электрических диагностических параметров в процессе модифицирования РВС рабочих поверхностей подшипника качения и узла трения скольжения.

Мониторинг процессов ремонтного восстановления подшипника качения осуществлялся с использованием диагностического параметра – нормированное интегральное время электрического контактирования (НИВ) [4].

Использованное оборудование: универсальный стенд для диагностирования подшипников [5], обеспечивающий вращение внутреннего кольца подшипника с частотой 500 мин⁻¹, радиальное нагружение 100 Н; измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 (ТУ 4276-195-02069036-2005) [6]; персональный компьютер.

Объект исследования: подшипник 208 с естественным износом рабочих поверхностей деталей (бывший в эксплуатации) и с искусственно ухудшенным состоянием рабочей поверхности внутреннего кольца (метод травления, обеспечивающий имитацию следов коррозии).

Используемые смазочные материалы: пластичный смазочный материал (литол); смазочная ремонтно-восстановительная композиция «Супротек».

Алгоритм экспериментов включает следующие процедуры: промывка подшипника; внесение пластичного смазочного материала без РВС; предварительная обкатка подшипника с мониторингом его начального состояния; промывка подшипника; внесение смазочного материала с 10 % смазочной ремонтно-восстановительной композиции; обкатка подшипника с мониторингом изменения качества рабочих поверхностей; обработка результатов измерения диагностического параметра НИВ с целью определения изменений качества рабочих поверхностей подшипника.

На рисунке 1а представлен график изменения во времени диагностического параметра НИВ (K), измеренного в процессе предварительной обкатки подшипника. Время измерения диагностического параметра $T_{\text{и}}=10$ с. Обкатка проводилась в течение двух дней: 6 часов в первый день и 5 часов во второй. Суммарное время обкатки составило 11 часов.

В течение 20-30 мин после запуска происходят переходные процессы, связанные с приработкой и нагревом подшипника. Этим объясняется высокий уровень диагностического параметра ($0,1 \div 0,01$) в самом начале эксперимента и, наоборот, низкий уровень НИВ во временном интервале 360÷390 мин. При анализе данных во внимания принимались значения диагностического параметра, полученные после окончания переходных процессов.

Существенный разброс результатов измерения относительно среднего значения говорит о неоднородном качестве рабочей поверхности внутреннего кольца. В установившемся режиме в начале эксперимента средние значения НИВ составляют от $3,9 \cdot 10^{-3}$ до $4,6 \cdot 10^{-3}$. После окончания предварительной обкатки средние значения НИВ составили от $4,2 \cdot 10^{-5}$ до $5,9 \cdot 10^{-5}$.

На рисунке 1б представлен график изменения диагностического параметра, измеренного в процессе обкатки подшипника с РВС. Суммарное время работы подшипника с РВС составило также 11 часов (2,5 ч в первый день, 6 ч во второй день и 2,5 ч в третий день). Поэтому низкие значения диагностического параметра во временных интервалах 150...180 мин и 510...540 мин также объясняются процессами приработки.

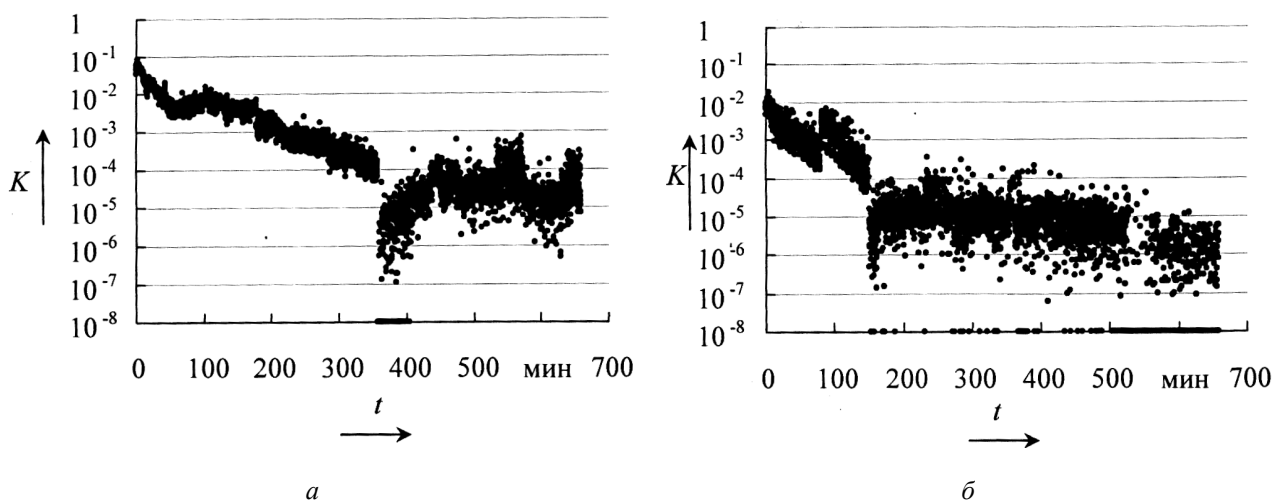


Рисунок 1 – Изменение диагностического параметра во время обкатки подшипника
 а – предварительная обкатка подшипника, смазочный материал – Литол-24,
 б – обкатка подшипника с РВС

Как видно из рисунка, в начальные часы работы с РВС диагностический параметр держится на довольно высоком уровне (от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $4,2 \cdot 10^{-4}$), это объясняется принципом действия РВС на начальной стадии. Дальнейшая обкатка сопровождается монотонным снижением значений диагностического параметра. На момент окончания эксперимента среднее значение НИВ составило от $1,1 \cdot 10^{-6}$ до $7,6 \cdot 10^{-7}$, т.е. НИВ снизился почти на три порядка, по сравнению с начальным уровнем.

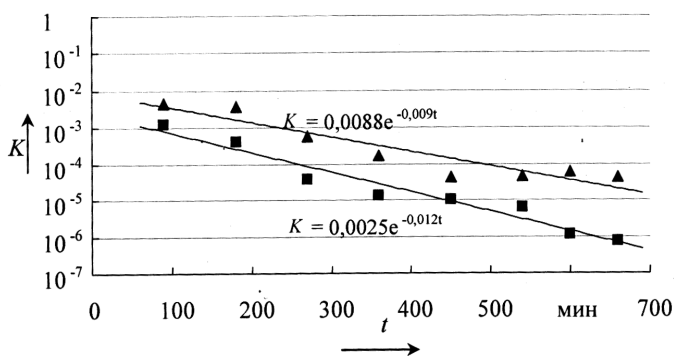


Рисунок 2 – Изменение уровня параметра НИВ в процессе эксперимента и уравнения регрессии
 ▲ – средние значения НИВ со смазкой Литол-24;
 ■ – средние значения НИВ с РВС

экспоненциальной зависимостью:

$$K = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-1,2 \cdot 10^{-2} \cdot t} \quad (1)$$

Аналогичное уравнение регрессии было найдено для экспериментов с Литол-24:

$$K = 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,9 \cdot 10^{-2} \cdot t} \quad (2)$$

Кривые регрессии также изображены на рисунке 2. Как видно, кривая регрессии в экспериментах с РВС имеет более сильный наклон. В последние часы эксперимента с Литол-24 средние значения НИВ практически не меняются, а в эксперименте с РВС они продолжали уменьшаться. Это позволяет выдвинуть предположение, что более длительная приработка с РВС приведет к еще большему снижению значений диагностического параметра.

На рисунке 3 приведены изменения значений среднеквадратического отклонения (СКО) НИВ (S_K) в процессе эксперимента для Литол-24 и РВС. Как видно из рисунка, в начале эксперимента СКО НИВ в экспериментах с Литол-24 и РВС практически не различаются. А в конце эксперимента СКО в случае с РВС, также как и средние значения, на 1-2 порядка ниже.

Таким образом, в результате проведения экспериментальных исследований было установлено, что при наличии в смазочном материале РВС средние значения диагностического параметра на полтора порядка ниже, значений, полученных при использовании стандартного смазочного материала. Кроме того, разброс значений диагностического параметра в экспериментах с РВС также существенно меньше. Это говорит об улучшении качества поверхностей трения подшипника при использовании РВС.

Улучшение состояния поверхностей трения также было подтверждено дополнительными исследованиями шероховатости поверхности подшипника качения.

Для возможности измерения шероховатости был изготовлен специальный разборный сепаратор, позволивший при необходимости разбирать и собирать подшипник.

Измерялся параметр Ra шероховатости поверхности внутреннего кольца после приработки с Литол-24, и после приработки с РВС. Качество поверхности внутреннего кольца подшипника предварительно было искусственно ухудшено методом травления. В результате этого на поверхности качения образовались участки (раковины), качество которых было значительно хуже качества остальной поверхности (что было заметно даже при визуальном осмотре). Измерения показали, что параметр шероховатости Ra_1 чистой поверхности в два с половиной раза меньше значения Ra_2 для искусственно ухудшенной поверхности: $Ra_2 \approx 2,5 \cdot Ra_1$. Такое состояние практически не изменилось после предварительной обкатки подшипника.

После добавления в смазочный материал РВС и последующей обкатки подшипника он был вновь разобран. Повторные измерения параметров шероховатости показали, что шероховатость поверхности со следами травления, улучшилась и стала почти такой же, что и шероховатость чистой поверхности: $Ra_1 \approx 0,18$ мкм, $Ra_2 \approx 0,21$ мкм, т.е. $Ra_2 \approx 1,1 \cdot Ra_1$. Данный факт в совокупности с результатами измерения диагностического параметра подтверждает гипотезу о модифицировании и улучшении качества поверхностей трения при наличии в смазочном материале РВС.

Мониторинг процессов ремонтного восстановления узла трения скольжения осуществлялся с использованием двух диагностических параметров: НИВ и среднее сопротивление [7].

Использованное оборудование: установка, реализующая схему трения скольжения «вращающийся вал – неподвижное кольцо», измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1, измеритель электрических параметров трибосопряжений ИЭПТ, АЦП ADC16USB, ПК.

Схема трения, реализуемая в экспериментальной установке, изображена на рисунке 4.

Узел трения представляет собой вращающийся вал, который скользит по внутренней поверхности неподвижного кольца. Вал закрепляли в трехлапчатом самоцентрирующем патроне, устанавливаемом на шпинделе установки, т.е. была обеспечена возможность использовать сменные валы из различных материа-

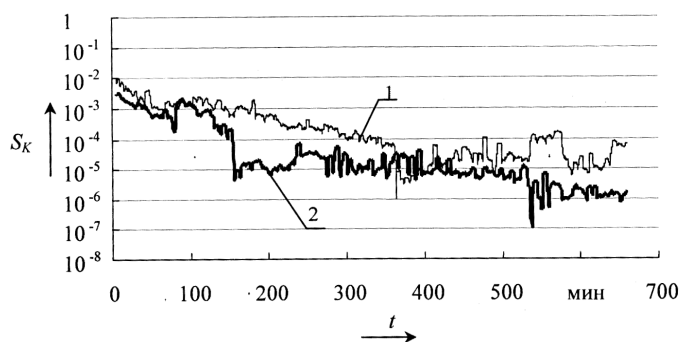


Рисунок 3 – Изменение значений СКО НИВ во время обкатки подшипника
1 – СКО НИВ со смазкой Литол-24;
2 – СКО НИВ с РВС

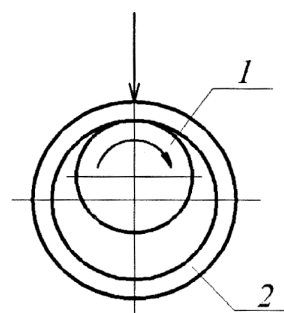


Рисунок 4 – Схема трения скольжения

лов. Кольца также являются сменными. Частота вращения вала $f_b = 160 \text{ мин}^{-1}$; площадь трения 10 мм^2 ; нагрузка на узел – 20 Н. Время измерения диагностического параметра НИВ $T_n=1 \text{ с}$.

Используемые смазочные материалы: пластичный смазочный материал (литол); смазочная ремонтно-восстановительная композиция «Супротек».

Алгоритм экспериментов включает следующие процедуры: промывка поверхностей трения; внесение пластичного смазочного материала без РВС; предварительная обкатка узла с мониторингом его начального состояния; промывка поверхностей трения; внесение смазочного материала с 10 % смазочной ремонтно-восстановительной композиции; обкатка узла с мониторингом изменения качества рабочих поверхностей; обработка результатов.

Было проведено два эксперимента продолжительностью по 6 ч каждый. Первые 3 ч в каждом эксперименте проводились с использованием пластичного смазочного материала Литол-24. Последние 3 ч в каждом эксперименте проводились с использованием восстановительной смазочной композиции (Литол-24 и РВС). В первом эксперименте основную часть времени измерялись значения диагностического параметра НИВ. Во втором эксперименте основную часть времени измерялись значения диагностического параметра среднее сопротивление. Условия проведения экспериментов были одинаковыми.

На рисунке 5а приведены средние значения диагностического параметра НИВ (K) в процессе эксперимента для Литол-24 и РВС.

Данные значения НИВ получены усреднением за 5 мин (по 300 точек) измеренных значений диагностического параметра. Остальные 20 % времени шло измерение значений диагностического параметра среднее сопротивление для возможности совместной оценки результатов двух экспериментов.

Как видно из рисунка 5а, в первые шестьдесят минут значения диагностических параметров практически совпадают. И в эксперименте с Литол-24, и в эксперименте с РВС значения диагностического параметра снизились на два порядка. Однако в дальнейшем при смазке материалом Литол-24 наблюдаются скачки значений НИВ от 0,02 до 0,55. В экспериментах с РВС таких резких скачков не наблюдается, установившиеся низкие значения диагностического параметра изменяются менее чем на половину порядка (от 0,013 до 0,049).

На момент окончания экспериментов средние значения НИВ в экспериментах с РВС на порядок ниже средних значений в экспериментах с Литол-24, что говорит о более стабильном режиме трения и лучших условиях смазки.

На рисунке 5б приведены изменения значений среднеквадратического отклонения (СКО) НИВ (S_K) в процессе эксперимента для Литол-24 и РВС.

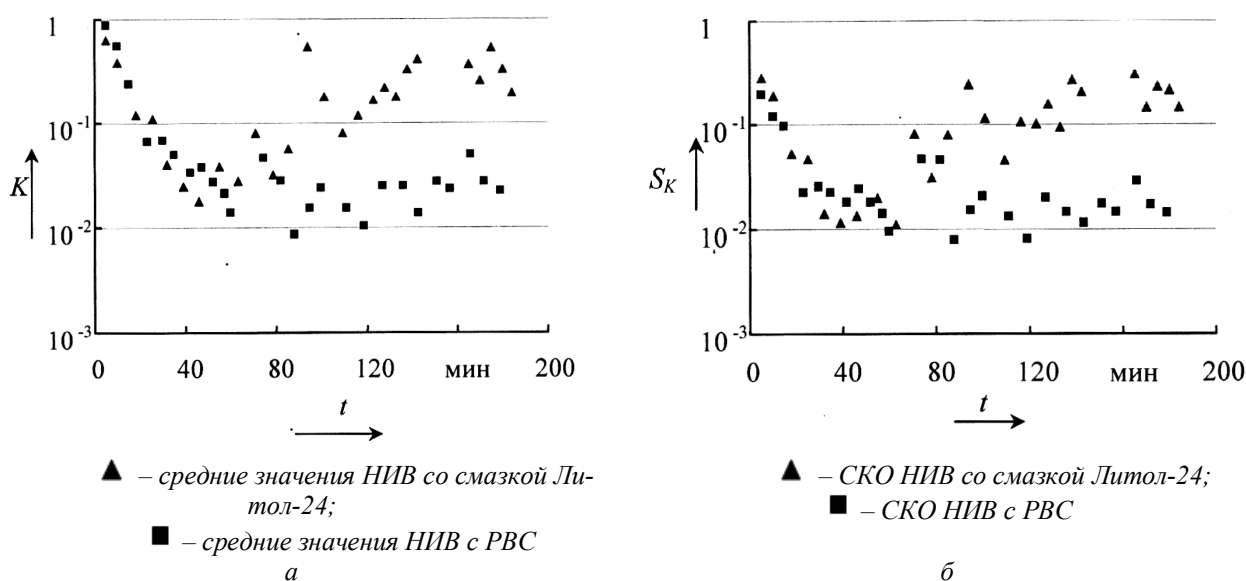


Рисунок 5 – Изменение уровня диагностического параметра и значений СКО НИВ в процессе эксперимента

Если сравнивать рисунки 5а и 5б, видно, что с увеличением значений НИВ в эксперименте с Литол-24 также увеличиваются и значения СКО. В экспериментах с РВС установившиеся низкие значения СКО остаются такими на протяжении всего эксперимента. Причем и в эксперименте с Литол-24, и в эксперименте с РВС средние значения диагностического параметра и значения СКО имеют один порядок. Более низкий разброс значений относительно среднего при скольжении с РВС говорит об улучшении качества поверхностей трения.

Во втором эксперименте в течение 80 % времени выполнилось измерение значений диагностического параметра среднее сопротивление. Первые 3 ч – трение с использованием Литол-24, последующие 3 ч – трение с использованием Литол-24 и РВС.

На рисунке 6а приведены значения среднего сопротивления R (усредненные за 1 с) в процессе эксперимента с Литол-24, а на рисунке 6б приведены значения сопротивления трибосопряжения при его смазке восстановительной композицией. Промежутки в значениях на графике объясняются тем, что в это время шло измерение значений диагностического параметра НИВ для возможности совместной оценки результатов двух экспериментов.

Как видно из рисунка 6а, в экспериментах с Литол-24 наблюдается большой разброс значений сопротивления, благоприятные режимы трения с высокими значениями сопротивления (от 1 кОм до 1,6 кОм) сменяются режимами со значениями сопротивления ниже 100 Ом, при этом происходит большое число контактирований между поверхностями трения. Из рисунка 6б видно, что в экспериментах с РВС сопротивление ведет себя гораздо более стабильно. После начальной приработки в течение всего эксперимента уровень сопротивления составляет от 200 Ом до 800 Ом. Несмотря на то, что уровень сопротивления ниже, чем в первом эксперименте, следует отметить отсутствие микроконтактирований, свидетельствующих о разрушении смазочного слоя и интенсификации изнашивания.

В результате экспериментальных исследований было выявлено, что наблюдаемым высоким значениям НИВ (от 0,1 до 0,9) в экспериментах с Литол-24 соответствуют низкие значения сопротивления (от 200 Ом до 0 Ом). При низких значениях НИВ (от 0,1 до 0,01) в экспериментах с Литол-24 сопротивление возрастает от 1 кОм до 1,6 кОм.

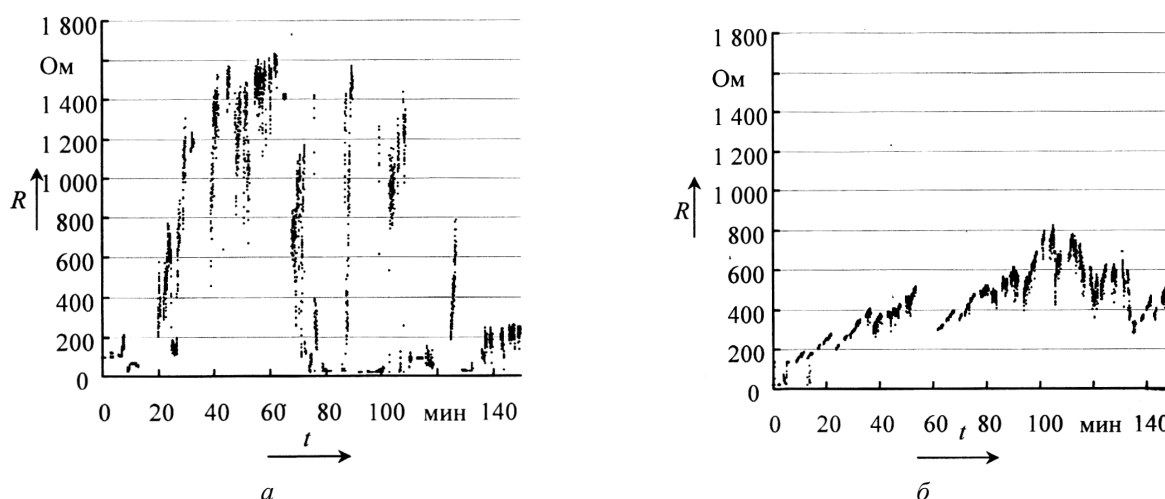


Рисунок 6 – Изменение уровня диагностического параметра R в процессе экспериментов с Литол-24 (а) и с РВС (б)

В эксперименте с РВС установившимся низким значениям НИВ (от 0,1 до 0,01) соответствует сопротивление от 400 Ом до 800 Ом. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что более низкий уровень сопротивления в экспериментах объясняется изменением химического состава смазочной композиции, а не ухудшением состояния смазки или уменьшением толщины смазочного слоя. В тоже время тот факт, что сопротивление не снижается ниже 200 Ом, говорит о благоприятном режиме трения и об улучшении качества поверхностей трения.

На рисунках 7а и 7б приведены изменения значений среднеквадратического отклонения (СКО) среднего сопротивления (S) в процессе эксперимента для Литол-24 и РВС.

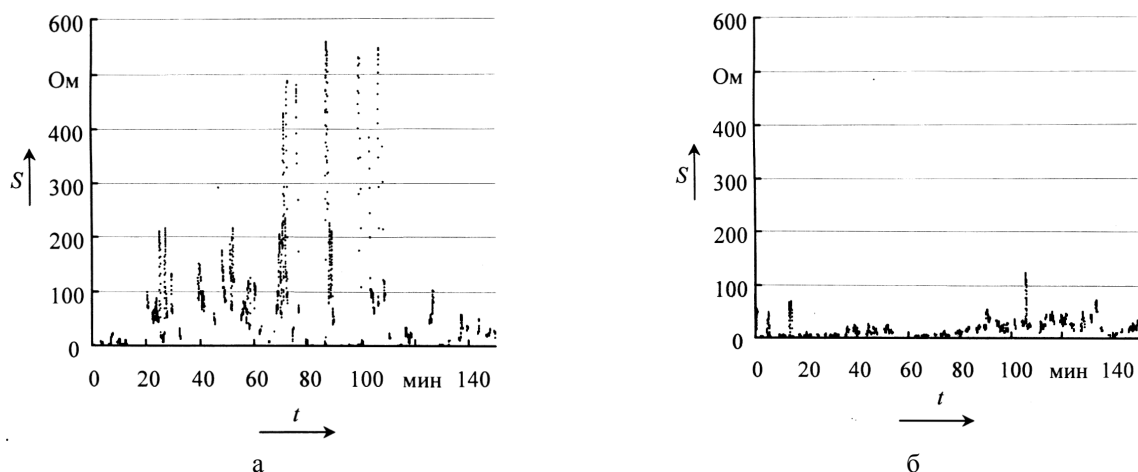


Рисунок 7 – Изменение значений СКО сопротивления в процессе эксперимента с Литол-24 (а) и с РВС (б)

Как видно из рисунков, в эксперименте с РВС значения диагностического параметра также, как и в случае с трением качения, имеют существенно меньший разброс относительно среднего значения, что тоже подтверждает улучшение качества трущихся поверхностей и условий смазки.

В целом, по результатам экспериментов, можно сделать вывод, что электрический метод трибодиагностики является эффективным при изучении процессов ремонтного восстановления, как в узлах трения качения, так и в узлах трения скольжения. Электрические диагностические параметры обладают высокой чувствительностью к изменениям качества поверхностей трения.

Работа выполняется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, шифр проекта П289.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахолкин, Е.В. Мониторинг восстановительных свойств смазочных материалов с ремонтно-восстановительными составами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Известия ОрелГТУ. - Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4. – С. 69-74.
2. Анцифорова, Е.В. Трибомониторинг процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами: аналитический обзор [Текст] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Известия ОрелГТУ. – 2010. – № 5-2(283). – С. 95-101.
3. Пахолкин, Е.В. Применение электропараметрических методов трибомониторинга при исследовании процессов изнашивания и ремонтного восстановления рабочих поверхностей подшипников [Электронный ресурс] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов : девятая сессия международной научной школы, 26 октября – 30 октября 2009 года; материалы школы; документы, программа, сборник докладов, презентация СПб и другие. – Текстовое (символьное) электрон. изд. – СПб. : ИПМаш РАН, 2009. – CD-R (1 ед.). - Систем. требования: Pentium 4; 128 Mb ; Windows 9x/2000/XP ; 300 Mb на жестком диске; CD-ROM; разрешение экрана 1028x728. - № гос. регистрации 0320902657.
4. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст]. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
5. Подмастерьев, К.В. Исследование эксплуатационных свойств смазочных материалов электрическими методами [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, Н.А. Сотникова // Славянтрибо-6. Интегрированное научно-техническое обеспечение качества трибообъектов, их производства и эксплуатации: Материалы международного научно-практического симпозиума: В 2 т. – Рыбинск: РГАТА, 2004. – Т. 2.
6. Подмастерьев, К.В. Измеритель параметров электрического контактирования ИПЭК-1 [Текст] / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 11. – С. 7-8.
7. Пахолкин, Е.В. О комплексном исследовании адгезионной способности смазочных материалов электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 1. – С. 114-118.

Анцифорова Елена Владимировна

ФГБОУ ВПО "Госунiversитет - УНПК", г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876
E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

Пахолкин Евгений Васильевич

ФГБОУ ВПО "Госунiversитет - УНПК", г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"
Тел. (4862) 419876
E-mail: Eugene_P@bk.ru

E.V. ANTSIFOROVA, E.V. PAKHOLKIN

THE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE BEHAVIOR OF TESTING PARAMETERS IN THE PROCESS OF THE GENERATION OF MODIFIED LAYERS ON THE WORKING SURFACES OF FRICTION UNITS

The article contains a description of the monitoring of recovery processes the working surfaces of rolling friction unit and sliding friction units. The monitoring was performed by use of electrical method of tribodiagnostic. The high sensitivity of electrical testing parameters for change of quality of friction face was detected.

Keywords: tribological monitoring; electrical method; repair-and-renewal composition; modified layer.

BIBLIOGRAPHY

1. Paholkin, E.V. Monitoring vosstanovitel'nyh svojstv smazochnyh materialov s remontno-vosstanovitel'nymi sostavami [Tekst] / E.V. Paholkin, E.V. Anciforova // Izvestija OrelGTU. - Ser. Funda-mental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2008. – № 4. – S. 69-74.
2. Anciforova, E.V. Tribomonitoring processov modifitsirovaniya rabochih poverhnostej uzlov tre-nija remontno-vosstanovitel'nymi sostavami: analiticheskij obzor [Tekst] / E.V. Anciforova, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. Izvestija OrelGTU. – 2010. – № 5-2(283). – S. 95-101.
3. Paholkin, E.V. Primenenie jelektrparametricheskikh metodov tribomonitoringa pri issledovanii processov iznashivaniya i remontnogo vosstanovleniya rabochih poverhnostej podshipnikov [Jelektronnyj re-surs] / E.V. Paholkin, E.V. Anciforova // Fundamental'nye i prikladnye problemy nadezhnosti i diagnosti-ki mashin i mehanizmov : devjataja sessija mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly, 26 oktjabrja – 30 oktjabrja 2009 goda; materialy shkoly; dokumenty, programma, sbornik dokladov, prezentacija SPb i drugie. – Tekstovoe (sim-vol'noe) jelektron. izd. – SPb. : IPMash RAN, 2009. – CD-R (1 ed.). - Sistem. trebovaniya: Pentium 4; 128 Mb ; Windows 9x/2000/XP ; 300 Mb na zhestkom diske; CD-ROM; razreshenie jekrana 1028h728. - № gos. registracii 0320902657.
4. Podmaster'ev, K.V. Jelektrparametricheskie metody kompleksnogo diagnostirovaniya opor kachenija [Tekst]. – M.: Mashinostroenie-1, 2001. – 376 s.
5. Podmaster'ev, K.V. Issledovanie jekspluacionnyh svojstv smazochnyh materialov jelektricheskimi metodami [Tekst] / K.V. Podmaster'ev, E.V. Paholkin, N.A. Sotnikova // Slavjantribo-6. Integrirovannoe nauchno-tehnicheskoe obespechenie kachestva triboob#ektov, ih proizvodstva i jekspluacii: Materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma: V 2 t. – Rybinsk: RGATA, 2004. – T. 2.
6. Podmaster'ev, K.V. Izmeritel' parametrov jelektricheskogo kontaktirovaniya IPJeK-1 [Tekst] / K.V. Podmaster'ev, E.V. Paholkin, V.V. Mishin // Kontrol'. Diagnostika. – 2005. – № 11. – S. 7-8.
7. Paholkin, E.V. O kompleksnom issledovanii adgezionnoj sposobnosti smazochnyh materialov jelektricheskim metodom [Tekst] / E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 1. – S. 114-118.

Antsiforova Elena Vladimirovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 419876
E-mail: ele-anciforova@yandex.ru

Pakholkin Evgeniy Vasilyevich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel. (4862) 419876
E-mail: Eugene_P@bk.ru

С.Г. ПУЗЫРЕВ, С.Н. СЫЧЕВ

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВЭЖХ

В предлагаемой работе рассмотрены два способа определения адгезии. В первом случае, когда происходит удовлетворительное разделение компонентов смеси, в качестве показателя адгезии выбирается время удерживания данного компонента; во втором случае, когда разделение происходит неудовлетворительно, разработан метод получения показателя адгезии с помощью метода главных компонент.

Ключевые слова: адгезия; хроматографическая колонка; метод главных компонент.

ВВЕДЕНИЕ

Определение адгезии методом ВЭЖХ является оригинальным, поэтому перед нами стояла задача разработки метода определения адгезии с помощью метода ВЭЖХ на поверхностях металлов с самого нуля. Нам представляется, что такой метод обладает экспрессностью и точностью, многократно превышающей существующие методы. В предыдущих работах [1, 2] были описаны: метод набивки хроматографических колонок металлическими опилками, выбраны вещества необходимые для тестирования колонок, и проведены опыты по модифицированию поверхностей. Основываясь на полученных ранее результатах [1, 2], было решено приступить к разработке метода определения адгезии.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИИ

В ходе проведенных испытаний нами было выделено два способа определения адгезии. В первом случае, когда происходило удовлетворительное разделение компонентов моторного масла, в качестве показателя адгезии брали время удерживания отдельного компонента смеси (в качестве сорбента выступал металл гильзы цилиндра). Это наиболее простой способ. Однако при невозможности удовлетворительного разделения смеси возникает необходимость в разработке метода определения адгезии.

Рассмотрим более подробно каждый из методов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИИ ПРИ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОМ РАЗДЕЛЕНИИ КОМПОНЕНТОВ

При проведении эксперимента с использованием в качестве сорбента металлических опилок гильзы цилиндра (чугун) нами была получена хроматограмма разделенных веществ, приведенная на рисунке 1.

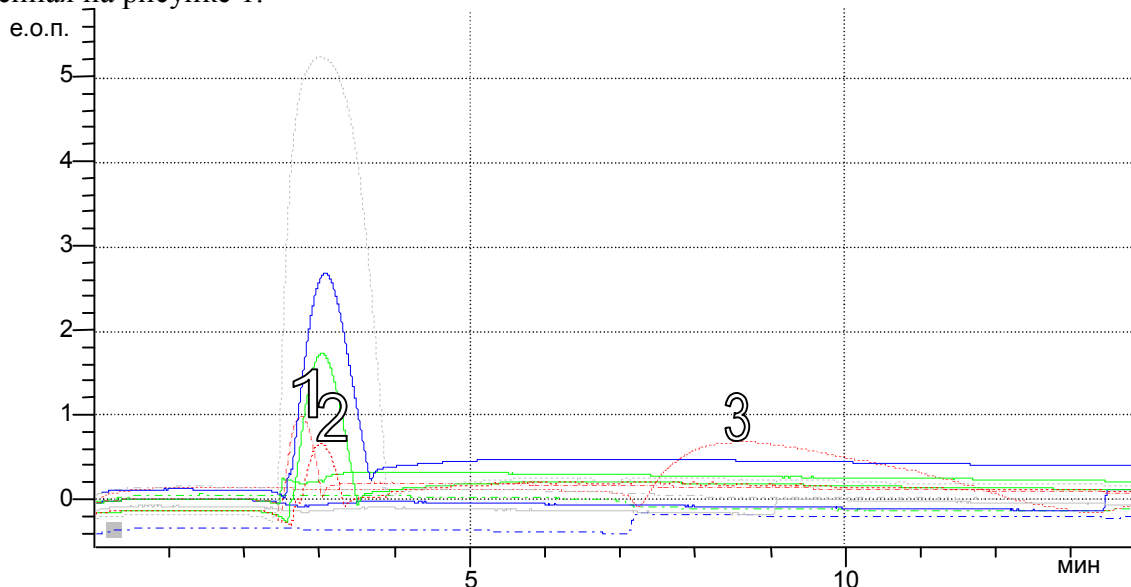


Рисунок 1 – Хроматограмма смеси 1 – бензола, 2 – нафталина, 3 – антрацена
Колонка 80x2 заполнена опилками чугуна (50 мкм), элюент – декан. Многоволновой режим детекции

Исходя из данных, представленных на рисунке 1, видно, что произошло удовлетворительное разделение веществ, таким образом, в качестве показателя адгезии мы берем время удерживания конкретного вещества.

Таблица 1 – Хроматографические параметры бензола, нафталина и антрацена

Материал	Вещество	Элюент	Время удерживания, мин
Металл гильзы цилиндра (чугун)	Бензол	Декан	2,06
	Нафталин	Декан	2,19
	Антрацен	Декан	4,37

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что для определения показателя адгезии в случае удовлетворительного разделения мы можем брать за показатель адгезии время удерживания конкретного вещества.

Однако, учитывая тот факт, что механизмы двигателя состоят не только из материалов, на которых происходит удовлетворительное разделение компонентов, мы столкнулись с проблемой выделения конкретного вещества из смеси. Для решения этой проблемы мы прибегли к методу главных компонентов, подробнее этот подход будет рассмотрен далее.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИИ ПРИ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОМ РАЗДЕЛЕНИИ КОМПОНЕНТОВ

При проведении предварительных испытаний мы столкнулись с проблемой надежного определения времен удерживания компонентов при их неудовлетворительном разделении.

Сущность проведения данного эксперимента заключается в использовании метода главных компонент для определения времен удерживания при (в обязательном порядке) многоволновой детекции компонентов моторных масел. В качестве пробников веществ были выбраны: бензол, хлорбензол, бромбензол, нитробензол, бензойная кислота. Выбор указанных соединений в основном обусловлен значимыми различиями в УФ-спектрах указанных соединений. Были получены хроматограммы данных веществ и их смеси в многоволновом режиме (230, 256, 262, 280, 330 нм). После получения хроматограмм для смеси и отдельных веществ, были сняты значения оптической плотности веществ в детектируемых областях с интервалом 0,015 с. (интерполяционные величины). Полученные матрицы, представляющие полученную хроматограмму в числовом виде, были в дальнейшем использованы для анализа методом главных компонентов по ранее разработанному методу [3]. В ходе анализа получали линейно-независимые значимые факторы и вектора для смеси и отдельных веществ. Проводили попарный корреляционный анализ полученных значимых факторов и анализ изменения векторов, с помощью которых определяли расчетное время удерживания вещества и компонентов смеси. Выделяли наиболее значимые факторы для каждого вещества, тем самым, получая, наиболее приближенные к реальности данные. Далее проводили сравнение времен удерживания, полученных разными способами.

Например, результаты времен удерживания веществ определенных по вершинам отдельных пиков приведены в таблице 2. В данном эксперименте использовались хроматографические колонки, заполненные опилками алюминия (70 мкм), длина колонки 63мм, в качестве элюента использовали декан.

Таблица 2 – Хроматографические параметры бензола, хлорбензола, бромбензола, нитробензола, бензойной кислоты

Наименование компонента	Элюент	Времена удерживания
Бензол	Декан	1,75
Хлорбензол		1,79
Бромбензол		1,81
Нитробензол		1,82
Бензойная кислота		2,01

АНАЛИЗ ДАННЫХ

В результате хроматографического эксперимента были получены хроматограммы смеси и отдельных веществ на разных длинах волн (230, 256, 262, 280, 330 нм) (рис. 2 и 3).

Как было сказано выше, для каждого вещества были сняты значения оптической плотности веществ. Данные были проанализированы в программе STATISTICA 6.0 с использованием метода главных компонент, где были выделены влияющие факторы, как для отдельного вещества, так и для смеси веществ, данные сведены в таблицы 3-4.

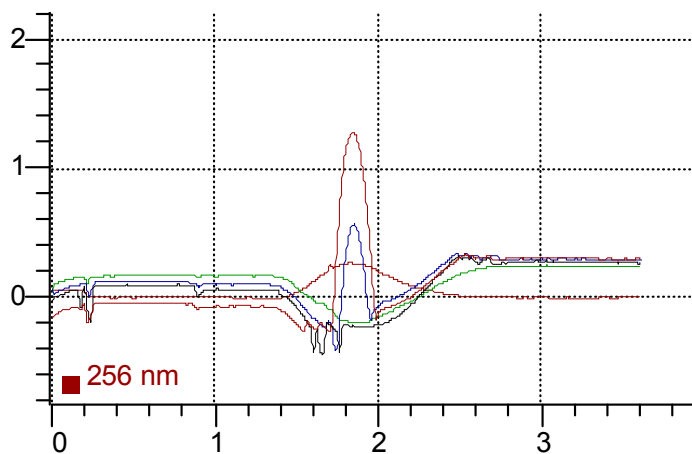


Рисунок 2 – Хроматограмма нитробензола

Колонка 63x2 заполнена опилками алюминия (70 мкм), элюент – декан. Многоволновой режим детекции

Таблица 3 – Значимые факторы, нитробензол

Наименование показателя	F1	F2
230	2.19601	-0.351013
256	-6.87186	-0.281401
262	0.28382	1.334439
280	2.19601	-0.351013
330	2.19601	-0.351013
процент от общей дисперсии	96,5	3,5
расчетное время	1,79;1,83;1,89	1,83

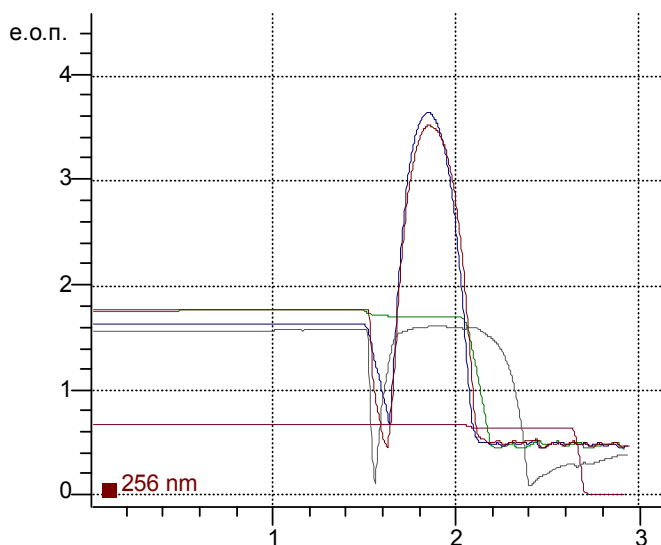


Рисунок 3 – Хроматограмма смеси бензола, хлорбензола, бромбензола, нитробензола, бензойной кислоты

Колонка 63x2 заполнена опилками алюминия (70 мкм), элюент – декан. Многоволновой режим детекции.

Таблица 4 – Значимые факторы, смесь

Наименование показателя	F1	F2
230	4.24858	0.06721
256	-6.90776	1.90113
262	-5.83798	-2.10277
280	4.24858	0.06721
330	4.24858	0.06721
процент от общей дисперсии	94,41	5,59
вектор	1,864;1,999	1,654;1,849;2,074

Проведем анализ полученных факторов: проанализируем проценты от общей дисперсии каждого вещества. Как можно видеть из таблицы 3, первый фактор F1 описывает 96,5 процента общей дисперсии, F2 – 3,5 процента.

Отбросим малозначимые факторы, в нашем случае это фактор F2. Проведем аналогичную операцию для всех веществ. Далее проведем статистическую обработку и корреляционный анализ влияющих факторов, обобщенные результаты сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Обобщенные результаты факторной выборки

Наименование компонента	t _R время удерживания опытное	t _R время удерживания отдельного компонента, полученное методом главных компонентов	t _R время удерживания, выделенное из смеси методом главных компонентов
Бензол	1,75	1,77	1,65
Бромбензол	1,81	1,83	1,85
Нитробензол	1,82	1,83	1,86
Бензойная кислота	2,01	2,02	1,99

Анализируя полученные данные, мы видим, что с помощью метода главных компонентов можно выделить отдельные компоненты из смеси. Сравнивая расчетные данные с данными, полученными в ходе эксперимента, мы пришли к выводу, что в нашем случае из смеси компонентов, состоящей из 5 соединений, нам удалось выделить по отдельности 4 вещества. Таким образом, при получении неудовлетворительного разделения смеси веществ, мы можем прибегнуть к методу главных компонентов.

ВЫВОДЫ

1. В ходе проделанной работы были выделены два способа определения адгезии в зависимости от возможности разделения смеси компонентов. Первый способ основан на получении времени удерживания отдельных компонентов, в условиях их удовлетворительного разделения. Второй способ основан на применении метода главных компонент при многоволновой детекции смеси и отдельных ее компонентов.

2. Созданы предпосылки для определения адгезии присадок к моторным маслам на поверхностях металла с использованием метода ВЭЖХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев, С. Н. Критерии образования устойчивых адсорбционных слоев на полярных и неполярных поверхностях [Текст] / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, С.А. Пузырев // Известия ОрелГТУ. - Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 6. - С. 103-106.

2. Сычев, С.Н. Описание эксперимента по определению адгезии компонентов моторных масел методом жидкостной хроматографии [Текст] / С.Г. Пузырев, К.В.Подмастерьев, Е.В.Пахолкин.

3. Сычев, С.Н. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин [Текст] / В.А.Гаврилина, О.И.Мальцева, Д.С.Булгаков, С.Н.Сычев // Виноделие и виноградарство. - 2007.- № 3.- С. 30-32.

Сычев Сергей Николаевич

Госуниверситет УНПК, г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия»

Тел. (8486) 419892

E-mail chemistry@ostu.ru

Пузырев Станислав Григорьевич

Госуниверситет УНПК, г. Орел

Аспирант

Тел. (8486) 419892

E-mail chemistry@ostu.ru

S.G. PUZYREV, S.N. SYCHEV

WAYS OF DEFINITION OF ADHESION ON SURFACES OF METALS THE METHOD OF THE HIGHLY EFFECTIVE LIQUID CHROMATOGRAPHY

In this paper, two ways of definition of adhesion are considered. In the first case when there is a satisfactory division of components of a mix, as an adhesion indicator time of keeping of the given component and in the second case when division occurs gets out, the method of reception of an indicator of adhesion by means of a method of the main components isn't well developed.

Keywords: adhesion; chromatographic columns; a method of the main components.

BIBLIOGRAPHY

1. Sychev, S. N. Kriterii obrazovaniya ustojchivyh adsorbcionnyh sloev na poljarnyh i nepoljarnyh poverhnostjakh [Текст] / S.N. Sychev, V.A. Gavrilina, K.V. Podmaster'ev, E.V. Paholkin, S.A. Puzyrev // Izvestija OrelGTU. - Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2009. – № 6. - S. 103-106.

2. Sychev, S.N. Opisaniye jeksperimenta po opredeleniyu adgezii komponentov motornyh masel metodom zhidkostnoj hromatografii [Текст] / S.G. Puzyrev, K.V. Podmaster'ev, E.V.Paholkin.

3. Sychev, S.N. Primeneniye metoda glavnyh komponent dlja identifikacii i sravneniya natural'nyh vin [Текст] / V.A.Gavrilina, O.I.Mal'ceva, D.S.Bulgakov, S.N.Sychev // Vinodeliye i vinogradarstvo. - 2007.- № 3.- S. 30-32.

Sychev Sergey Nikolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, professor, professor of department „ Chemistry”

Tel. (8486) 419892

E-mail: chemistry@ostu.ru

Puzyrev Stanislav Grigorevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

The post-graduate student

Tel. (8486) 419892

E-mail: chemistry@ostu.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 и вверху – 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) выравниваются 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.gu-unprk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 06.09.2011 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,6.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.