

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:
Голеников В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц., секретарь
Астафьев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Колгунов 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.

Редколлегия

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

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Дляконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Клименко С.А. д-р техн. наук, проф. (Украина)
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН (Россия)
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Мирасалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН (Россия)
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)
Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 (4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,
 41-98-03, +7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
 E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-47351
от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс 29504
по объединенному каталогу
«Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2015

Содержание

Естественные науки

Гордон В.А., Потураева Т.В., Семенова Г.А. Собственные поперечные колебания балки, частично опертой на упругое основание.....	3
Борзенков М.И., Воробьев В.И., Копылов С.О., Измеров О.В. Исследования процесса фрикционных автоколебаний с внешним гармоническим возмущением	11
Кольцов А.Ю. Исследование вопросов применимости и вычислительной эффективности метода параметрической адаптации при построении дискретных аналогов математических моделей	17
Кошелев А.В. Об устойчивости параметрически возбуждаемой машины на изотропной упругой подвеске	24

Моделирование технологических процессов

Кравченко И.Н., Коломейченко А.А., Гречко Д.Г. Моделирование процесса формирования структуры газотермических покрытий.....	33
Серебряник И.А. Моделирование процесса струйного помола с учетом особенностей механики деформации слюды.....	39

Конструирование, расчеты, материалы

Климов В.Е., Ушаков Л.С. Разработка и прочностной расчет конструкции держателя для ударно-скользящего многоцелевого органа экскаватора-погрузчика	45
Волобуев К.А. Адаптивная система управления кривошипным прессом	51

Машиностроительные технологии и инструменты

Михеев А.В., Барсуков Г.В., Степанов Ю.С., Шоркин В.С. Разработка рекомендаций по расположению межслойных опор для реализации технологии использования остаточной энергии гидроабразивной струи при резании пакетированных материалов	56
Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Бабичев И.А. Виброволновые технологии в программе импортозамещения технологического обеспечения финишной обработки деталей научёёмких изделий	62
Соллер Я.И., Нуен Мань Тиен Оптимизация микрорельефа поверхности плоских деталей из коррозионно-стойкой стали 13Х15Н5АМ3 при шлифовании нитридборными кругами высокой пористости	65
Цеханов Ю.А., Шейкян С.Е., Карих Д.В., Сергач Д.А. Модификация накатыванием структуры поверхностного слоя заготовки перед термодиффузионным азотированием	73
Лебедев В.А., Серга Г.В., Кочубей А.А. Закономерности процесса упрочнения деталей гранулированными средами в вибродинамических технологических системах	78
Михайлова А.Н., Костенко А.В. Общие принципы повышения эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов на базе функционально-ориентированных технологий	82
Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Д.О. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской	88
Водовин С.И., Лунин К.С., Федоров Т.В. Аппроксимация перемещений в расчетах гибки труб	104
Пухальский В.А. Иерархия процессов в технологии машиностроения	108

Приборостроение и биотехнические системы

Жарких Е.В., Жеребцова А.И., Маковик И.Н., Дрёмин В.В., Жеребцов Е.А., Потапова Е.В., Дунаев А.В. Возможности исследования изменений амплитуд колебаний кожного кровотока с помощью адаптивного вейвлет-анализа при проведении окклюзионных проб	114
Шуткин А.Н. Методология синтеза нечетких гибридных решающих правил для решения задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых образовательным процессом	122

Контроль, диагностика, испытания

Коробко В.И., Калашиников М.О., Калашиникова О.В. Контроль жесткости железобетонных перемычек с использованием динамического критерия – коэффициента нелинейных искажений.....	130
[Картов И.Г.] Зырянов Ю.Т., Грибков А.Н. Модификация распределений орда для аппроксимации односторонних дискретных распределений экспериментальных данных	136
Романов Р.В., Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р., Подмастерьев К.В. Пространственно – временная обработка геоэлектрических данных геодинамического контроля	146



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

№ 6 (314) 2015

November – December

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

Editorial council

- Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof., president
Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof., vice-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.
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

- Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Member of editorial board

- Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Buchach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Klimenok S.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS (Russia)
Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Russia)
Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Azerbaijan)
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof. Academician of RAS (Russia)
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Smolenzov V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Starovoitov A.L. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Belarus)
Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

- Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,
41-98-03, +7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
E-mail: tiosu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii» 29504

© State University ESPC, 2015

Contents

Natural sciences

Gordon V.A., Poturayeva T.V., Semenova G.A. Free transverse vibrations of beam partially supported on elastic foundation	3
Borzenkov M.I., Vorobiev V.I., Kopylov S.O., Izmerov O.V. Researching of the process of self-excited frictional oscillations with external harmonious indignation	11
Koltsov A.Yu. Research of questions of applicability and computational efficiency of the statistical parametrical adaptation method in constructing the discrete analogue of mathematical models	17
Koshelev A.V. On stability parametrically excited machines on isotropic elastic suspension	24

Modelling of technological processes

Kravchenko I.N., Kolomiychenko A.I., Grechko L.G. Simulation the formation of structures thermal coatings	33
Serebryanyik I.A. Modeling of jet grinding with regard features mechanical strain mica	39

Designing, calculations, materials

Klimov V.E., Ushakov L.S. Development and construction of mount strength calculations for impact shear multi-body backhoe loader	45
Volobuev K.A. Adaptive control system of crank press	51

Machine building technology and toolware

Mikheev A.V., Barsukov G.V., Stepanov Yu.S., Shorkin V.S. Development of recommendations on the location of interlayer support for the implementation of technologies residual energy waterjet jet cutting packaged materials	56
Babichev A.P., Motrenko P.D., Babichev I.A. Vibrowave technology program of import substitution process to ensure the finish machining of high-tech products	62
Soler Ya.I., Nguyen M.T. Optimization of surface microrelief flat parts made of corrosion-resistant steel 13H15N5AM3 grinding with community nitridbormyi high porosity	65
Tsekhanov Yu.A., Sheykin S.Ye., Karikh D.V., Sergach D.A. Modification rolling surface layer structure preparations before thermodiffusion nitrided	73
Lebedev V.A., Serga G.V., Kochubey A.A. Laws of process hardening of the granular medium in vibro-technological systems	78
Mikhailov A.N., Kostenko A.V. General principles increase of operational properties details of ship unit on the basis functional-oriented technology	82
Vladetskaya Ye.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskiy D.O. Grinding process quality assurance on board of floating workshop by reducing impacts of external disturbances	88
Vdovin S.I., Lunin K.S., Fedorov D.V. Approximation of displacements in calculations of flexible pipes	104
Pukhalsky V.A. The hierarchy of processes in manufacturing engineering	108

Instrument making and biotechnological system

Zharkikh E.V., Zherebtsova A.I., Makovik I.N., Dremin V.V., Zherebtsov E.A., Potapova E.V., Dunaev A.V. The possibilities of investigating the oscillation amplitude changes in skin blood flow through adaptive wavelet analysis during occlusion test	114
Shutkin A.N. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for the solving problems of prediction and early diagnostics of diseases caused by educational process	122

Control, diagnostics, tests

Korobko V.I., Kalashnikov M.O., Kalashnikova O.V. Rigidity control of reinforced-concrete connection elements using dynamic criterion – nonlinear distortion coefficient	130
Karpov I.G., Zryyanov Yu.T., Gribkov A.N. Modification of ord distribution for the approximation of the unilateral discrete experimental data distribution	136
Romanov R.V., Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R., Podmasteryev K.V. Space – time processing of geoelectric control of geodynamic data	146

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 624.04+624.072.2

В.А. ГОРДОН, Т.В. ПОТУРАЕВА, Г.А. СЕМЕНОВА

СОБСТВЕННЫЕ ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ, ЧАСТИЧНО ОПЕРТОЙ НА УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

Разработан алгоритм определения форм и частот свободных поперечных колебаний балки, частично опертой на упругое основание Винклера. Вводятся четыре компоненты векторов состояния – прогиб, поворот поперечного сечения, изгибающий момент и перерезывающая сила. Спектр собственных частот определяется частотным уравнением полученным аналогичной процедурой метода конечных элементов при построении матрицы жесткости конечного элемента.

Ключевые слова: балка, упругое основание, частичное опирание, поперечные колебания, начальные параметры, вектор состояния, матрица влияния.

В работе авторов [1] решена задача статического изгиба балки, полностью или частично опертой на упругое основание Винклера. Алгоритм решения задачи не зависит от видов нагрузки и граничных условий. Для конкретности в работе приняты равномерно распределенная нагрузка известной интенсивности и жесткое защемление концов балки.

Частичное опирание балки на упругое основание трактуется в работе как дефект основания, приобретенный квазистатически, без учета инерционных сил. В работе получены оценки приращений прогибов и изгибающих моментов в балке к их исходным значениям при развитии размеров дефекта от цельного основания до полностью разрушенного.

В рамках решения проблемы обеспечения надежной и безопасной работы сооружений актуальной является задача исследования динамических процессов в конструктивно нелинейных объектах, изменяющих в силу различных причин свою структуру и расчетную схему под нагрузкой. Пока изучению влияния на прочность эксплуатационных повреждений конструкций в научной литературе не уделяется должного внимания. Между тем, создание методов расчета, учитывающих влияние на напряженно–деформированное состояние конструкции выключение из работы отдельных элементов, связей, закреплений и т.п. внесет существенный вклад в теоретические основы проектирования конструкций и прогнозирования их поведения при аварийных и других запроектных воздействиях.

На сегодняшний день имеется ряд работ, посвященных исследованию динамических процессов, вызванных внезапным образованием дефектов в балках и пластинках. В частности, в работах [2–4] рассматривается переходный динамический процесс, вызванный внезапным образованием поперечной трещины в нагруженной балке. Балка моделируется сопряжением двух сегментов, соединенных пружиной кручения, жесткость которой определяется глубиной трещины. Одним из начальных условий является статический прогиб неповрежденной балки. В работах [5–8] изучается динамический процесс в нагруженных составных (по А.Р. Ржаницыну) балках, возникающий при внезапном продольном расслоении, обусловленном обрывом связей сдвига в шве. В работах [9–11] рассматриваются колебания пластинок при внезапном изменении условий опирания, вызванном частичным обрывом опорных связей. В работах [12–14] решены задачи о колебаниях балки при ее внезапном частичном разрушении. В работах [4, 6, 11, 16] изучаются переходные процессы при внезапных преобразованиях внутренней структуры стержневых систем: условий сопряжения и опирания их элементов. В работе [17] моделируется внезапное повреждение арматурного стержня и продольные колебания, вызванные этим дефектом. Заметим, что во

всех указанных работах вынужденные движения балки (пластиинки), под нагрузкой получены путем разложения начального состояния и внешней нагрузки по модам собственных колебаний поврежденной балки (пластиинки) и применением интеграла Дюамеля.

Представляется практически важной разработка методики анализа переходных динамических процессов в балках на упругом основании, инициируемых внезапными эксплуатационными повреждениями основания, в простейшем случае полным или частичным его разрушением.

Подавляющее большинство работ по динамике взаимодействия балки и основания посвящено анализу собственных колебаний. Причем рассматриваются в этих работах собственные или вынужденные колебания балок на полных или частичных основаниях лишь для случаев, когда расчетная схема системы «балка – основание» в нагруженном состоянии не изменяется. Проявления конструктивной нелинейности, т.е. изменения расчетной схемы нагруженной балки на упругом основании, и последствия их – в известной литературе не описаны.

В настоящей работе представлен алгоритм определения форм и частот свободных изгибных колебаний балки, полностью или частично опертой на упругое основание Винклера. При его построении использовались подходы, эффективность которых показана в цитируемых выше работах: метод начальных параметров, векторы состояния и начальных параметров, матрицы влияния начальных параметров и др. Собственные формы и частоты свободных колебаний являются важнейшей динамической характеристикой системы «балка – основание», а также используются для решения неоднородных дифференциальных равнений, описывающих вынужденные колебания. Краткий обзор основных научных работ, посвященных собственным колебаниям балок, частично опертых на упругое основание и полностью опертых на основание с кусочно–постоянными жесткостными характеристиками, приводится в первой части настоящего исследования [1].

Рассматриваются собственные поперечные колебания сплошной балки (рисунок 1) длиной L , одна часть которой оперта на упругое винклеровское основание с жесткостью k , другая – свободна. Модуль Юнга и плотность материала балки соответственно E и ρ . Момент инерции прямоугольного поперечного сечения с размерами $b \times h$ (ширина и высота) обозначен I . На каждом участке вводится осевая координата x_i ($i=1,2$)

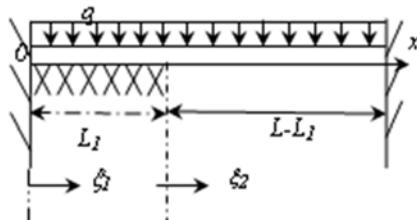


Рисунок 1 – Балка, состоящая из двух участков 1 и 2

Прогибы балок в сечениях x_1 и x_2 обозначены соответственно v_1 и v_2 . Все линейные размеры отнесены к общей длине балки. Прогибы предполагаются малыми. Осевые перемещения сечений балки пренебрежимо малы. Без снижения общности построений предполагается для конкретности жесткое защемление концов балки. Дифференциальные уравнения собственных колебаний участков балки интегрируются отдельно, а постоянные интегрирования определяются из граничных условий и условий сопряжения участков.

Собственные поперечные колебания 1-го участка.

Собственные колебания балки на участке $0 \leq \xi_1 \leq v$ описываются дифференциальными уравнениями вида [18]:

$$\frac{\partial^4 w_1}{\partial \xi_1^4} + 4\alpha^4 w_1 + \frac{\partial^2 w_1}{\partial \tau^2} = 0. \quad (1)$$

где введены безразмерные переменные и параметры:

$$\xi_1 = \frac{x_1}{L}; w_1 = \frac{v_1}{L}; \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}; A = bh; \alpha = \sqrt[4]{\frac{kL^4}{4EI}}; v = \frac{L_1}{L}.$$

Полагая собственные колебания гармоническими, разделим переменные в уравнении (1) представлением:

$$w_1(\xi_1, \tau) = W_1(\xi_1) \sin \bar{\omega} \tau, \quad (2)$$

где $\bar{\omega} = \omega L^2 \sqrt{\frac{\rho A}{EI}}$ – безразмерная собственная частота поперечных колебаний (параметр собственной частоты);

$$\omega = \frac{\bar{\omega}}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ – размерная частота.}$$

Подстановка (2) в (1) дает уравнение форм собственных колебаний участка:

$$W_1^{1V} + 4\alpha^4 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) W_1 = 0, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{\rho A}}$ – параметр, имеющий размерность частоты $\left[\frac{1}{c}\right]$ и названный «условной» частотой, с которой сравнивается частота колебаний ω исследуемой балки.

Решение уравнения (3) ищем подстановкой Эйлера:

$$W_1 = C e^{n\xi_1}, \quad (4)$$

где C и n – константы, подлежащие определению. Подставляя (4) в (3), получим характеристическое уравнение для дифференциального уравнения (3):

$$n^4 + 4\alpha^4 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) = 0, \quad (5)$$

Множитель в скобках в зависимости от величины $\frac{\omega}{\omega_0}$ может быть положительным ($\frac{\omega}{\omega_0} > 1$), отрицательным ($\frac{\omega}{\omega_0} < 1$) и равным нулю ($\frac{\omega}{\omega_0} = 1$).

Пусть $\frac{\omega}{\omega_0} > 1$. Тогда корни уравнения (5) представим в форме:

$$n_j = (\pm i \pm 1)\beta_1, \quad (j=1,2,3,4)$$

где

$$\beta_1 = \alpha \sqrt[4]{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}.$$

В этом случае формы собственных колебаний определяются функцией [18]:

$$W_1(\xi_1) = w_{10}S_4(\xi_1) + w'_{10}S_3(\xi_1) + w''_{10}S_2(\xi_1) + w'''_{10}S_1(\xi_1), \quad (6)$$

где $w_{10} = w_1(0)$, $w'_{10} = w'_1(0)$, $w''_{10} = w''_1(0)$, $w'''_{10} = w'''_1(0)$ – начальные параметры 1-го участка;

$$S_1(\xi_1) = \frac{ch\beta_1\xi_1 \sin \beta_1\xi_1 - sh\beta_1\xi_1 \cos \beta_1\xi_1}{4\beta_1^3}; \quad S_2(\xi_1) = \frac{sh\beta_1\xi_1 \sin \beta_1\xi_1}{2\beta_1^2};$$

$$S_3(\xi_1) = \frac{ch\beta_1\xi_1 \sin \beta_1\xi_1 + sh\beta_1\xi_1 \cos \beta_1\xi_1}{2\beta_1}; \quad S_4(\xi_1) = ch\beta_1\xi_1 \cos \beta_1\xi_1 \text{ – функции Крылова.}$$

Заметим, что:

$$S'_1 = S_2, S'_2 = S_3, S'_3 = S_4, S'_4 = -4\beta_1^4 S_1 \text{ и } S_1(0) = S_2(0) = S_3(0) = 0, S_4(0) = 1.$$

Пусть $\frac{\omega}{\omega_0} \neq 1$. Тогда уравнение (5) представим в виде:

$$W_1^{1V} - 4\alpha^4 \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1\right) W_1 = 0. \quad (7)$$

В этом случае корни характеристического уравнения:

$$n^4 - 4\alpha^4 \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1\right) = 0, \quad (8)$$

принимают вид:

$$n_{1,2} = \pm \lambda_1; \quad n_{3,4} = \pm i \lambda_1; \quad \lambda_1 = \lambda_1 = \sqrt{2} \alpha \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

и формы собственных колебаний определяются функцией:

$$W_1(\xi_1) = w_{10}K_4(\lambda_1\xi_1) + w'_{10}K_3(\lambda_1\xi_1) + w''_{10}K_2(\lambda_1\xi_1) + w'''_{10}K_1(\lambda_1\xi_1), \quad (10)$$

где

$$K_1(\lambda_1\xi_1) = \frac{sh\lambda_1\xi_1 - \sin\lambda_1\xi_1}{2\lambda_1^3}; \quad K_2(\lambda_1\xi_1) = \frac{ch\lambda_1\xi_1 - \cos\lambda_1\xi_1}{2\lambda_1^2}; \quad K_3(\lambda_1\xi_1) = \frac{sh\lambda_1\xi_1 + \sin\lambda_1\xi_1}{2\lambda_1};$$

$$K_4(\lambda_1\xi_1) = \frac{ch\lambda_1\xi_1 + \cos\lambda_1\xi_1}{2} - \text{другая разновидность функций Крылова.}$$

Их свойства:

$$K'_1 = K_2, \quad K'_2 = K_3, \quad K'_3 = K_4, \quad K'_4 = \lambda_1^4 K_1 \quad \text{и} \quad K_1(0) = K_2(0) = K_3(0) = 0, \quad K_4(0) = 1.$$

Пусть, наконец, $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$. Тогда уравнение (3) принимает вид:

$$W_1^{1V} = 0 \quad (11)$$

и функцию прогибов $W_1(\xi_1)$ получаем последовательным интегрированием уравнения (11) с применением начальных параметров:

$$W_1(\xi_1) = w_{10} + w'_{10}\xi_1 + w''_{10}\frac{\xi_1^2}{2} + w'''_{10}\frac{\xi_1^3}{6}. \quad (12)$$

Дальнейшие действия на 1-ом участке рассмотрим для случая $\frac{\omega}{\omega_0} > 1$.

Введем:

– вектор состояния первого участка $\bar{W}_1(\xi_1)$:

$$\bar{W}_1(\xi_1) = \{W_1(\xi_1) \quad W'_1(\xi_1) \quad W''_1(\xi_1) \quad W'''_1(\xi_1)\},$$

где $W_1(\xi_1)$ – безразмерный прогиб балки; $W'_1(\xi_1), W''_1(\xi_1), W'''_1(\xi_1)$ – безразмерные угол поворота поперечного сечения, изгибающий момент и поперечная сила соответственно;

– вектор начальных параметров \bar{W}_{10} :

$$\bar{W}_{10} = \{w_{10} \quad w'_{10} \quad w''_{10} \quad w'''_{10}\}$$

– функциональную матрицу влияния $V(\xi_1)$:

$$V_1(\xi_1) = \begin{pmatrix} K_4(\lambda_1\xi_1) & K_3(\lambda_1\xi_1) & K_2(\lambda_1\xi_1) & K_1(\lambda_1\xi_1) \\ \lambda_1^4 K_1(\lambda_1\xi_1) & K_4(\lambda_1\xi_1) & K_3(\lambda_1\xi_1) & K_2(\lambda_1\xi_1) \\ \lambda_1^4 K_2(\lambda_1\xi_1) & \lambda_1^4 K_1(\lambda_1\xi_1) & K_4(\lambda_1\xi_1) & K_3(\lambda_1\xi_1) \\ \lambda_1^4 K_3(\lambda_1\xi_1) & K_2(\lambda_1\xi_1) & \lambda_1^4 K_1(\lambda_1\xi_1) & K_4(\lambda_1\xi_1) \end{pmatrix}_{4 \times 4}.$$

Тогда состояние первого участка описывается матричным уравнением:

$$\bar{W}_1(\xi_1) = V(\xi_1) \bar{W}_{10}. \quad (13)$$

Вектор состояния $\bar{W}_1(\xi_1)$ в конце первого участка:

$$\bar{W}_1(v) = V(v) \bar{W}_{10}. \quad (14)$$

Собственные поперечные колебания 2-го участка

Собственные поперечные колебания этого участка описываются уравнением [18]:

$$\frac{\partial^4 w_2}{\partial \xi_2^4} + \frac{\partial^2 w_2}{\partial \tau^2} = 0. \quad (15)$$

Разделяя переменные, получим:

$$w_2(\xi_2, \tau) = W_2(\xi_2) \sin \bar{\omega} \tau, \quad (16)$$

$$W_2^{IV}(\xi_2) - \bar{\omega}^2 W_2(\xi_2) = 0, \quad W_2 = A e^{r_2 \xi_2}, \quad (17)$$

где $r_2^4 = \bar{\omega}^2$; $r_{21} = \lambda_2$; $r_{22} = -\lambda_2$; $r_{23} = i\lambda_2$; $r_{24} = -\lambda_2$; $\lambda_2 = \sqrt{\bar{\omega}}$.

Общее решение уравнения (17) имеет вид:

$$W_2(\xi_2) = w_{20}K_4(\lambda_2\xi_2) + w'_{20}K_3(\lambda_2\xi_2) + w''_{20}K_2(\lambda_2\xi_2) + w'''_{20}K_1(\lambda_2\xi_2),$$

где $w_{20}, w'_{20}, w''_{20}, w'''_{20}$ – начальные параметры второго участка.

Введем:

– вектор состояния второго участка $\bar{W}_2(\xi_2)$:

$$\bar{W}_2(\xi_2) = \{W_2(\xi_2) \ W'_2(\xi_2) \ W''_2(\xi_2) \ W'''_2(\xi_2)\};$$

– вектор начальных параметров \bar{W}_{20} :

$$\bar{W}_{20} = \{w_{20} \ w'_{20} \ w''_{20} \ w'''_{20}\};$$

– функциональную матрицу влияния $V_2(\xi_2)$

$$V_2(\xi_2) = \begin{pmatrix} K_4(\lambda_2 \xi_2) & K_3(\lambda_2 \xi_2) & K_2(\lambda_2 \xi_2) & K_1(\lambda_2 \xi_2) \\ \lambda_2^4 K_1(\lambda_2 \xi_2) & K_4(\lambda_2 \xi_2) & K_3(\lambda_2 \xi_2) & K_2(\lambda_2 \xi_2) \\ \lambda_2^4 K_2(\lambda_2 \xi_2) & \lambda_2^4 K_1(\lambda_2 \xi_2) & K_4(\lambda_2 \xi_2) & K_3(\lambda_2 \xi_2) \\ \lambda_2^4 K_3(\lambda_2 \xi_2) & K_2(\lambda_2 \xi_2) & \lambda_2^4 K_1(\lambda_2 \xi_2) & K_4(\lambda_2 \xi_2) \end{pmatrix}_{4 \times 4}.$$

Тогда состояние второго участка описывается матричным уравнением:

$$\bar{W}_2(\xi_2) = V_2(\xi_2) \bar{W}_{20}. \quad (18)$$

Из условий сопряжения участков имеем:

$$\bar{W}_1(v) = \bar{W}_2(0) \text{ или } V_1(v) \bar{W}_{10} = V_2(0) \bar{W}_{20}.$$

Учитывая, что $V_2(0)$ – матрица единичная, получим:

$$\bar{W}_{20} = V_1(v) \bar{W}_{10},$$

и, следовательно, из (18) имеем:

$$\bar{W}_2(\xi_2) = V_2(\xi_2) V_1(v) \bar{W}_{10},$$

т.е. состояние на обоих участках определяется через параметры первого участка.

Состояние на конце второго участка при $\xi_2 = 1 - v$ определяется вектором $\bar{W}_2(1-v)$.

$$\bar{W}_2(1-v) = V_2(1-v) V_1(v) \bar{W}_{10} = V_{21}(1-v, v) \bar{W}_{10}, \quad (19)$$

матрица влияния:

$$V_{21}(1-v, v) = V_2(1-v) V_1(v).$$

Два начальных параметра известны $w_{10} = w'_{10} = 0$.

Известны также две координаты вектора состояния в конце второго участка:

$$W(1-v) = W'_2(1-v) = 0.$$

Подставляя эти значения в матричное уравнение (19), записанное в блочной форме, получим:

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} W_2''(1-v) \\ W_2'''(1-v) \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c_{13} & c_{14} \\ c_{23} & c_{24} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} c_{31} & c_{32} \\ c_{41} & c_{42} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c_{33} & c_{34} \\ c_{43} & c_{44} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} w_{10}'' \\ w_{10}''' \end{pmatrix} \end{pmatrix},$$

откуда следует:

$$\begin{pmatrix} c_{13} & c_{14} \\ c_{23} & c_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{10}'' \\ w_{10}''' \end{pmatrix} = 0. \quad (20)$$

Частотное уравнение получим, приравнивая нулю определитель:

$$\begin{vmatrix} c_{13} & c_{14} \\ c_{23} & c_{24} \end{vmatrix} = 0. \quad (21)$$

где

$$C_{13} = K_4(\lambda_2(1-v))K_2(\lambda_1 v) + K_3(\lambda_2(1-v))K_3(\lambda_1 v) + K_2(\lambda_2(1-v))K_4(\lambda_1 v) + \lambda_1^4 K_1(\lambda_2(1-v))K_1(\lambda_1 v).$$

$$C_{14} = K_4(\lambda_2(1-v))K_1(\lambda_1 v) + K_3(\lambda_2(1-v))K_2(\lambda_1 v) + K_2(\lambda_2(1-v))K_3(\lambda_1 v) + K_1(\lambda_2(1-v))K_4(\lambda_1 v).$$

$$C_{23} = \lambda_2^4 K_1(\lambda_2(1-v))K_2(\lambda_1 v) + K_4(\lambda_2(1-v))K_3(\lambda_1 v) + K_3(\lambda_2(1-v))K_4(\lambda_1 v) + \lambda_1^4 K_2(\lambda_2(1-v))K_1(\lambda_1 v).$$

$$C_{24} = \lambda_2^4 K_1(\lambda_2(1-v))K_1(\lambda_1 v) + K_4(\lambda_2(1-v))K_2(\lambda_1 v) + K_3(\lambda_2(1-v))K_3(\lambda_1 v) + K_2(\lambda_2(1-v))K_4(\lambda_1 v).$$

На рисунке 2 приведены зависимости основной частоты собственных изгибных колебаний балки от относительной жесткости основания при различных размерах поврежденного участка основания.

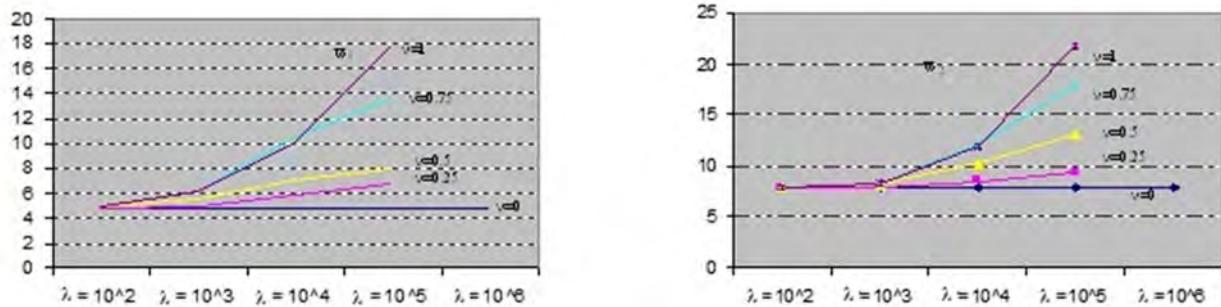


Рисунок 2 – Собственные частоты изгибных колебаний поврежденной балки

Построена математическая модель собственных поперечных колебаний балки частично опертой на упругое основание Винклера. Балка представляется сопряжением двух участков, один из которых полностью поддерживается основанием, другой – свободен. Спектр собственных частот балки на частично поврежденном основании определяется частотным уравнением, полученным процедурой, аналогичной применяемой в методе конечных элементов (МКЭ) при построении матрицы жесткости конечного элемента. Вводятся четырехкомпонентные векторы состояния – безразмерные прогиб, поворот поперечного сечения, изгибающий момент и перерезывающая сила. В матричной форме получены зависимости векторов состояния в произвольном сечении от вектора начальных параметров. Векторы состояния представлены совокупностью блоков, включающих кинематические и силовые параметры. Благодаря этому матрица влияния начального сечения на конечное становится клеточной, всегда размером 4×4 . Частотное уравнение получается приравниванием определителя этой матрицы нулю. Использование векторов состояния и начальных параметров снижает порядок матрицы влияния до четвертого при любом количестве сопрягаемых частей балки, что существенно снижает трудоемкость вычислений.

В результате получены зависимости между собственными частотами, механическими характеристиками балки и основания и параметрами повреждений: протяженностью поврежденного участка основания и его локализацией в общей длине балки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордон, В.А. Напряженно-деформированное состояние балки, частично опертой на упругое основание / В.А. Гордон, Т.В. Потураева, Г.А. Семенова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5–2. – С. 191–198.
- Гордон, В.А. Частоты собственных изгибных колебаний свободно опертой балки с трещиной / В.А. Гордон, Т.В. Потураева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 3. – С. 19–23.
- Потураева, Т.В. Динамическое догружение свободно опертой нагруженной балки, инициированное образованием трещины / Т.В. Потураева, В.А. Гордон // Строительство и реконструкция. – 2009. – № 4/24. – С. 28–33.
- Гордон, В.А. Математическое моделирование динамических процессов в стержневых системах при внезапных изменениях их структуры / В.А. Гордон, В.И. Брусова, Э.А. Кравцова, Т.В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5. – С. 3–8.
- Гордон, В.А. Влияние продольного расслоения составного стержня на частоты собственных изгибных колебаний / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 1. – С. 19–24.
- Гордон, В.А. Динамические догружения в балке с разноуровневыми продольными расслоениями / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 6 (44). – С. 17–27.
- Гордон, В.А. Методика определения спектра частот изгибных колебаний балки с разноуровневыми продольными расслоениями / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2–5 (292). – С. 87–95.

8. Гордон, В.А. Собственные частоты и формы изгибных колебаний балки с трещиной / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 50–58.
9. Гордон, В.А. Динамические процессы в составной пластине при внезапном продольном расслоении / В.А. Гордон, Т.А. Павлова // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – 2006. – С. 40–49.
10. Gordon, V. Transitional processes in the constructions with the sudden structural reconstructions / V. Gordon, Y. Stepanov, P. Anokhin // Proc. XV Intern. congress on sound and vibration. – Daejeon, Korea. – 2008. – pp. 1544–1556.
11. Гордон, В.А. Осесимметричные колебания кольцевой пластинки при внезапном изменении условий опирания / В.А. Гордон, Н.В. Клюева, В.И. Брусова // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУ НИЦ «Строительство». – 2009. – № 1. – С. 41–43.
12. Gordon, V. Concepts for estimating of structural safety of bar system / V. Gordon, Y. Stepanov, V. Shorkin // Proc. XII Intern. congress on sound and vibration. – Lisbon, Portugal. – 2005. – pp. 2023–2035.
13. Клюева, Н.В. Расчет динамических догружений в стержневой пространственной системе с внезапно выключающимися элементами / Н.В. Клюева, В.А. Гордон // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – М.: РУДН. – 2008. – № 6. – С. 72–79.
14. Гордон В.А. Переходный процесс в нагруженной балке при отсоединении части продольного слоя / В.А. Гордон, В.И. Брусова // Строительство и реконструкция. – 2009. – № 4/24. – С. 8–10.
15. Потураева, Т.В. Переходный динамический процесс в стержневой конструкции при внезапном изменении условий опирания / Т.В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4 (272). – С. 27–31.
16. Гордон, В.А. Оценка динамического эффекта при внезапной структурной перестройке конструкции / В.А. Гордон, Т.В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 1. – С. 3–8.
17. Гордон, В.А. Динамические напряжения в арматурном стержне при внезапном образовании трещин / В.А. Гордон, А.Г. Тамразян, Т.В. Савостикова // Вестник НИЦ «Строительство». – 2010. – № 2. – С. 167–176.
18. Гордон, В.А. Динамические догружения балки при повреждении упругого основания / В.А. Гордон, Т.В. Потураева, Е.В. Брума // Строительство и восстановление искусственных сооружений: Материалы IV Междунар. НПК. В 2 ч. – Ч. 1. – Гомель: БелГУТ. – 2015. – С. 9–20.

Гордон Владимир Александрович
Приокский государственный
университет
Доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Высшая
математика»
E-mail: gordon1312@mail.ru

Потураева Татьяна Вячеславовна
Приокский государственный
университет
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Высшая
математика»
E-mail: tanpo77@mail.ru

Семенова Галина Александровна
Приокский государственный
университет
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Высшая
математика»
E-mail: gordon1312@mail.ru

V.A. GORDON, T.V. POTURAYEVA, G.A. SEMENOVA

FREE TRANSVERSE VIBRATIONS OF BEAM PARTIALLY SUPPORTED ON ELASTIC FOUNDATION

An algorithm for determining the form and frequency of free transverse vibrations of beams on partially supported on an elastic Winkler foundation was developed. The four components of the vectors of state – deflection, slope cross section, bending moment and shear force – is introduce. The spectrum of natural frequencies determined by the frequency equation obtained in a similar procedure of the finite element method in the construction of the finite element stiffness matrix.

Keywords: beam, elastic foundation, partial support, transverse vibrations, initial parameters, vector of state, matrix of influence.

BIBLIOGRAPHY

1. Gordon, V.A. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye balki, chastichno opertoy na uprugoye osnovaniye / V.A. Gordon, T.V. Poturayeva, G.A. Semenova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 5–2. – S. 191–198.

2. Gordon, V.A. Chastoty sobstvennykh izgibnykh kolebaniy svobodno opertoy balki s treshchinoy / V.A. Gordon, T.V. Poturayeva // Stroitelnaya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2009. – № 3. – S. 19–23.
3. Poturayeva, T.V. Dinamicheskoye dogruzheniye svobodno opertoy nagruzennoy balki, initsirovannoye obrazovaniyem treshchiny / T.V. Poturayeva, V.A. Gordon // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2009. – № 4/24. – S. 28–33.
4. Gordon, V.A. Matematicheskoye modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v sterzhnevyykh sistemakh pri vnezapnykh izmeneniyakh ikh struktury / V.A. Gordon, V.I. Brusova, E.A. Kravtsova, T.V. Poturayeva // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 5. – S. 3–8.
5. Gordon, V.A. Vliyaniye prodlonogo rassloeniya sostavnogo sterzhnya na chastoty sobstvennykh izgibnykh kolebaniy / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Stroitelnaya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2011. – № 1. – S. 19–24.
6. Gordon, V.A. Dinamicheskiye dogruzheniya v balke s raznourovnevymi prodlonymi rassloeniyami / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2012. – № 6 (44). – S. 17–27.
7. Gordon, V.A. Metodika opredeleniya spektra chastei izgibnykh kolebaniy balki s raznourovnevymi prodlonymi rassloeniyami / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 2–5 (292). – S. 87–95.
8. Gordon, V.A. Sobstvennyye chastei i formy izgibnykh kolebaniy balki s treshchinoy / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Vestnik MGSU. – 2014. – № 3. – S. 50–58.
9. Gordon, V.A. Dinamicheskiye protsessy v sostavnoy plastine pri vnezapnom prodlonom rassloeniye / V.A. Gordon, T.A. Pavlova // Izvestiya TulGU. Seriya: Stroitelnyye materialy, konstruktsii i sooruzheniya. – 2006. – S. 40–49.
10. Gordon, V. Transitional processes in the constructions with the sudden structural reconstructions / V. Gordon, Y. Stepanov, P. Anokhin // Proc. XV Intern. congress on sound and vibration. – Daejeon, Korea. – 2008. – pp. 1544–1556.
11. Gordon, V.A. Osesimmetrichnyye kolebaniya koltsevoy plastinki pri vnezapnom izmenenii uslovii opiraniya / V.A. Gordon, N.V. Klyuyeva, V.I. Brusova // Stroitelnaya mekhanika i raschet sooruzheniy. –M.:FGU NITS «Stroitelstvo». – 2009. – № 1. – S. 41–43.
12. Gordon, V. Concepts for estimating of structural safety of bar system / V. Gordon, Y. Stepanov, V. Shorkin // Proc. XII Intern. congress on sound and vibration. – Lisbon, Portugal. – 2005. – pp. 2023–2035.
13. Klyuyeva, N.V. Raschet dinamicheskikh dogruzheniy v sterzhnevoy prostranstvennoy sisteme s vnezapno vyklyuchayushchimisya elementami / N.V. Klyuyeva, V.A. Gordon // Stroitelnaya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. – M.: RUDN. – 2008. – № 6. – S. 72–79.
14. Gordon V.A. Perekhodnyy protsess v nagruzennoy balke pri otsoyedinenii chasti prodlonogo sloya / V.A. Gordon, V.I. Brusova // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2009. – № 4/24. – S. 8–10.
15. Poturayeva, T.V. Perekhodnyy dinamicheskiy protsess v sterzhnevoy konstruktsii pri vnezapnom izmenenii uslovii opiraniya / T.V. Poturayeva // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2008. – № 4 (272). – S. 27–31.
16. Gordon, V.A. Otsenka dinamicheskogo effekta pri vnezapnoy strukturnoy perestroyke konstruktsii / V.A. Gordon, T.V. Poturayeva // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2008. – № 1. – S. 3–8.
17. Gordon, V.A. Dinamicheskiye napryazheniya v armaturnom sterzhne pri vnezapnom obrazovanii treshchiny / V.A. Gordon, A.G. Tamrazyan, T.V. Savostikova // Vestnik NITS «Stroitelstvo». – 2010. – № 2. – S. 167–176.
18. Gordon, V.A. Dinamicheskiye dogruzheniya balki pri povrezhdennii uprugogo osnovaniya / V.A. Gordon, T.V. Poturayeva, Ye.V. Bruma // Stroitelstvo i vosstanovleniye iskusstvennykh sooruzheniy: Materialy IV Mezhdunar. NPK. V 2 ch. – CH. 1. – Gomel: BelGUT. – 2015. – S. 9–20.

Gordon Vladimir Alexandrovich
Prioksky State University, Oryol
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head Department of
Mathematics
Ph.: +7(4862)41 98 48
E-mail: gordon1312@mail.ru

Poturaeva Tatiana Vyacheslavovna
Prioksky State University, Oryol
Candidate of Technical Science,
assistant professor of Higher
Mathematics
Ph.: +7(4862)41 98 48
E-mail: tanpo77@mail.ru

Semenova Galina Alexandrovna
Prioksky State University, Oryol
Candidate of Technical Science,
assistant professor of Higher
Mathematics
Ph.: +7(4862)41 98 48
E-mail: gordon1312@mail.ru

М.И. БОРЗЕНКОВ, В.И. ВОРОБЬЕВ, С.О. КОПЫЛОВ, О.В. ИЗМЕРОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ С ВНЕШНИМ ГАРМОНИЧЕСКИМ ВОЗМУЩЕНИЕМ

Рассмотрена математическая модель двухмассовой колебательной системы. Предложена методика определения режима захватывания и бигармонического режима и нахождения параметров движения при этих режимах. Исследование проводилось методом медленно меняющихся коэффициентов.

Ключевые слова: двухмассовая система, колебательная система, фрикционные автоколебания, синхронизация автоколебаний.

Большое количество теоретических и экспериментальных работ [1–4] посвящено исследованию фрикционных автоколебательных процессов в приводах транспортных машин. Большинство теоретических работ выполнялись для двухмассовых систем. На основании этих работ представляется невозможным дать точную количественную оценку характеристикам сложных (многомассовых систем), но с их помощью становится возможной оценка влияния ряда конструктивных характеристик на автоколебательные процессы.

В этой статье рассмотрение влияния гармонического возмущения на фрикционные автоколебательные процессы в тяговом приводе локомотива также производилось на двухмассовой системе.

Рассмотрим двухмассовую систему, для которой J_1 – приведенный момент инерции ведущих частей тягового привода; J_2 – приведенный момент инерции ведомых масс привода; C_{12} – приведенная жесткость общего валопровода. Моменты $M_{\text{дв}}$ и $M_{\text{тр}}$ представляют собой движущий момент тягового электродвигателя и момент сил сопротивления (сцепления) между колесной парой и рельсом.

Зависимость $M_{\text{дв}}$ от скорости вращения вала обычно принимают линейной [1] и аналитически записывают в виде:

$$M_{\text{дв}} = M_0 - k\phi_1 \quad (1)$$

где k – тангенс угла наклона механической характеристики.

Помимо этого, на валу асинхронного двигателя имеет место пульсирующая составляющая момента, которая представляется в виде:

$$M_{\text{п}} = M_1 \sin pt \quad (2)$$

где M_1 – амплитудное значение пульсирующей составляющей момента;

$p = 6f_1$ – частота возмущающего (пульсирующего) момента;

f_1 – частота питающего АД напряжения.

Таким образом, окончательно выражение для вращающего момента может быть записано:

$$M_{\text{дв}} = M_0 - k\phi_1 + M \sin pt \quad (3)$$

Зависимость $M_{\text{тр}}$ от скорости скольжения колеса по рельсу принимается криволинейной [1] и записывается в виде:

$$M_{\text{тр}} = A\dot{\phi}_2^3 - B\dot{\phi}_2 + C \operatorname{sign}\phi_2 \quad (4)$$

где A, B, C – коэффициенты, учитывающие форму кривой сил сопротивления.

С учетом выражений (1–4) уравнения движения для двухмассовой системы могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} J_1\ddot{\phi}_1 + C_{12}(\phi_1 - \phi_2) = M_0 - k\phi_1 + M \sin pt \\ J_2\ddot{\phi}_2 + C_{12}(\phi_2 - \phi_1) = B\dot{\phi}_2 - A\dot{\phi}_2^3 - C \operatorname{sign}\phi_2 \end{cases} \quad (5)$$

Если частота возмущений силы p близка к частоте автоколебаний $\omega = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1} + \frac{C_{12}}{J_2}}$, в системе возможны два режима движения: периодический режим захватывания, когда автоколебания системы полностью синхронизированы (захвачены) частотой внешнего воздействия и так называемый «бигармонический» режим, при котором в системе наряду с вынужденными колебаниями частоты возмущающей силы существуют еще и отличные от них по частоте автоколебания. В работах [5–7] показано, что эффект захватывания возможен при произвольно малой амплитуде возмущающей силы.

Для систем с одной степенью свободы иногда удается явно находить интервал частот $p_1 < p < p_2$, в котором наблюдается периодический режим захватывания. Для систем с двумя и более степенями свободы такой интервал, как правило, можно найти лишь приближенно с использованием вычислительной техники.

В работе [1] показано, что автоколебательная система «колесо–рельс» может быть принята слаболинейной. При таком допущении для решения системы дифференциальных уравнений могут применяться асимптотические методы.

Исследования процесса синхронизации фрикционных автоколебаний с частотой внешней возмущающей силы проводилось методом медленно меняющихся коэффициентов [8, 9].

В основе этого метода лежит гипотеза о наличии порождающего решения, за которое берется решение системы при равенстве нулю коэффициента при нелинейной функции. Впервые для исследования нелинейных уравнений этот метод применил Ван–дер–Поль [5]. Также этот метод получил развитие в работах [9–11].

При исследовании процесса методом медленно меняющихся коэффициентов система (5) была приведена к виду:

$$\begin{cases} \Psi'_{10} = \alpha_{10} - \varepsilon_{11}\Psi_{10} - \alpha_{11}\Psi_{10}^3 - \beta_{11}\Psi_{10}(a_2^2 + b^2) - \omega A_0; \\ a' = \varepsilon_{22}a - \xi_1b - \alpha_{21}\Psi_{10}^2a - \alpha_{22}a(a^2 + b^2) + \omega B_1; \\ b' = -\alpha_{30} + \varepsilon_{22}b + \xi_1a - \alpha_{21}\Psi_{10}^2b - \alpha_{22}b(a^2 + b^2) - \omega A_1. \end{cases} \quad (6)$$

Данную систему можно использовать для определения автоколебаний и проверки их устойчивости. Для этого достаточно положить в системе (6) $a = 0, \xi_1 = 0, \alpha_{30} = 0, b > 0$.

В итоге получим систему:

$$\begin{cases} \Psi'_{10} = \alpha_{10} - \varepsilon_{11}\Psi_{10} - \alpha_{11}\Psi_{10}^3 - \beta_{11}\Psi_{10}b^2 - \omega A_0; \\ b' = \varepsilon_{22}b - \alpha_{21}\Psi_{10}^2b - \alpha_{22}b^3 - \omega A_1. \end{cases} \quad (7)$$

В ходе дальнейшего исследования было выяснено, что для определения зоны захватывания фрикционных автоколебаний частотой возмущающей силы необходимо решить систему (7) и определить устойчивость автоколебаний. Затем решать систему (6) и выяснить устойчиво ли решение. Если решение устойчиво, то имеет место захватывание, если нет – то имеется бигармонический режим (режим биений).

Для исследования бигармонического режима (процесса биений) в автоколебательной системе в качестве исходных данных принимается общее решение системы:

$$\begin{cases} \varphi_1'' + m_1(\varphi_1 - \varphi_2) = \bar{M} \sin \tau; \\ \varphi_2'' + m_2(\varphi_2 - \varphi_1) = 0, \end{cases}$$

которое имеет вид:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_{10} + \Psi_{10}\tau + A_1 \sin \tau + a \sin(v\tau + \Theta); \\ \varphi_2 = \varphi_{10} + \Psi_{10}\tau + A_2 \sin \tau - \frac{J_1}{I_2}a \sin(v\tau + \Theta). \end{cases} \quad (8)$$

где $v = \sqrt{m_1 + m_2} = \frac{\omega}{p}$;

$$A_1 = \frac{(1-m_2)\bar{M}}{m_1+m_2-1};$$

$$A_2 = \frac{m_2\bar{M}}{m_1+m_2-1};$$

$\varphi_{10}, \Psi_{10}, a, \Theta$ – произвольные постоянные.

Будем искать приближенное решение системы (6) в виде:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_{10} + \Psi_{10}\tau + A_1 \sin \tau + a \sin(v\tau + \Theta); \\ \varphi_2 = \varphi_{10} + \alpha + \Psi_{10}\tau + A_2 \sin \tau + \left(b + \frac{\pi}{I_2}a\right) \sin(v\tau + \Theta + \beta), \end{cases} \quad (9)$$

где φ_{10} – произвольная постоянная;

Ψ_{10}, a, θ – медленно меняющиеся функции времени, производные которых по времени первого порядка малости, а вторые производные – второго порядка малости; поправки на амплитуду – b и частоту – β медленно меняющиеся функции времени первого порядка малости, а производные от поправок по времени – второго порядка малости.

Вычисляем, сохраняя лишь члены первого порядка малости и, упрощая, получим следующие выражения для нахождения стационарных решений системы:

$$(\alpha^\circ)^2 = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{23}} - \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{23}} (\Psi_{10}^\circ)^2$$

$$(\Psi_{10}^\circ)^3 + d_1 \Psi_{10}^\circ - d_0 = 0$$

Далее исследуем устойчивость бигармонического режима стандартным методом.

Для определения режимов стационарных колебаний необходимо решить систему уравнений (6) относительно Ψ_{10} , a , b .

Представим первое уравнение системы (6) в виде двух функций:

$$D = \alpha_{10} - \varepsilon_{11} \Psi_{10} - \alpha_{11} \Psi_{10}^3,$$

$$F(T) = \beta_{11} \Psi_{10} T^2 + \omega A_0.$$

где $T = a^2 + b^2$

$$\begin{cases} 1, \text{ если } 0 \leq T < \frac{J_2}{J_1} \Psi_{10}; \\ \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{J_2 \Psi_{10}}{J_1 T} \right), \text{ если } T > \frac{J_2}{J_1} \Psi_{10}. \end{cases}$$

При фиксированном Ψ_{10} , функция D будет постоянной величиной и функция $F(T)$ будет функцией одной переменной T . Анализируя эти зависимости, рассматриваем два случая: 1. $F(T_{kp}) > \omega$, 2. $F(T_{kp}) < \omega$

В первом случае график функции $F(T)$ имеет вид, представленный на рисунке 1, во втором случае – на рисунке 2.

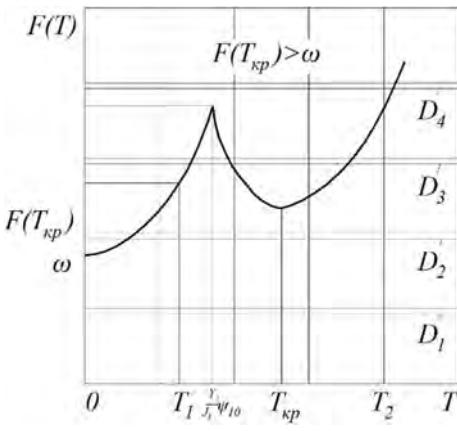


Рисунок 1 – График функции $F(T)$

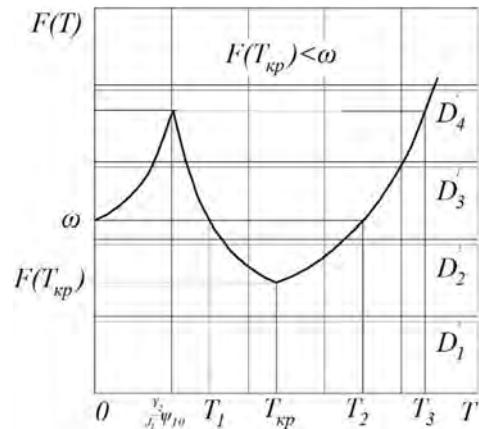


Рисунок 2 – График функции $F(T)$

Решаем первое уравнение системы (6) при фиксированном Ψ_{10} относительно $T = a^2 + b^2$. Подставляя найденное значение T в оставшиеся два уравнения системы (6) определяем значения a и b , а затем и величину $\Delta = T - (a^2 + b^2)$.

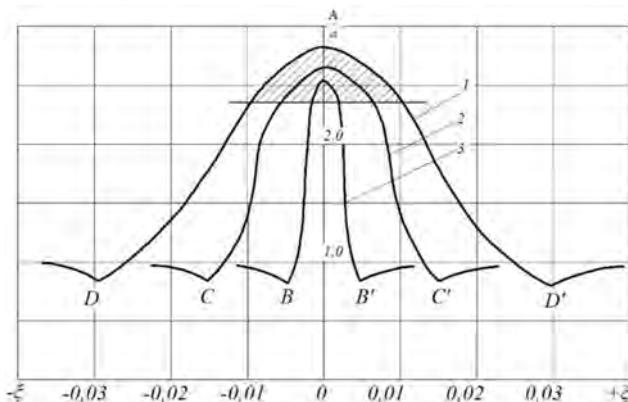
Если для двух близких значений Ψ_{10} величина Δ меняет знак, то значит в этом случае мы имеем решение всей системы (6).

В качестве примеров на рисунках 3–6 приведены графики относительной амплитуды колебаний $\frac{A}{a}$ в зависимости от величины расстройки $-\xi$ (A – амплитуда колебаний при действии гармонического возмущения, a – амплитуда фрикционных автоколебаний, ξ – величина, определяющая близость частоты фрикционных автоколебаний к частоте гармонического возмущения). На графиках точкиами $B-B$, $C-C$, $D-D$ обозначены переходы из области синхронизации автоколебаний в область бигармонического режима (режима биений).

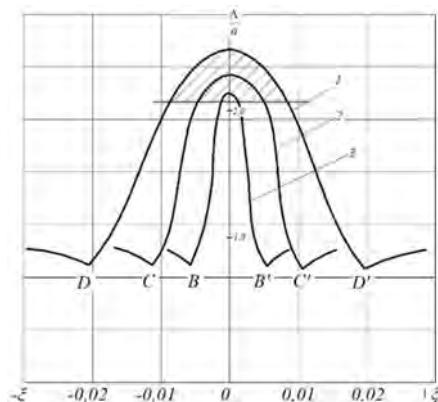
Заштрихованные области на графиках показывают зоны, где амплитуда скорости скольжения превосходит среднюю скорость скольжения Ψ_2 и может переходить в область отрицательных значений.

В реальной системе индивидуального тягового привода современного локомотива возможно преимущественно возникновение двух форм автоколебаний: автоколебания колесной пары локомотива, при которых колеса движутся в противофазе, и так называемые автоколебания тягового привода, под которыми подразумеваются автоколебания колесной пары, как единого целого, на упругой связи колесной пары и ротора тягового электродвигателя (ТЭД) [12]. Вероятность обнаружения других форм автоколебаний

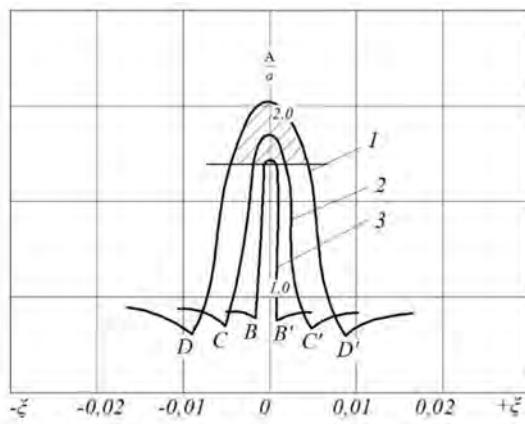
зависит от конструктивных особенностей конкретного привода и экипажной части. Так, колебания ТЭД на траверсной подвеске возможны в случае отсутствия упругих звеньев между ротором ТЭД и колесной парой и наличие упругой связи между ТЭД и рамой тележки, колебания надрессорного строения – в случае значительного перераспределения нагрузки по осям локомотива при реализации силы тяги, продольные автоколебания тележки – при существенной податливости продольной связи между кузовом и тележкой.



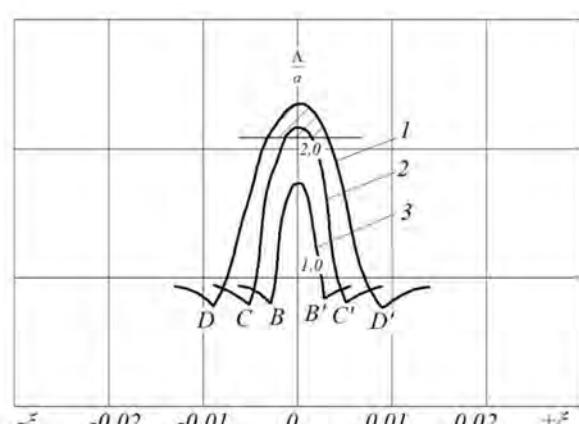
*Рисунок 3 – Графики зависимости относительной амплитуды колебаний A/a в зависимости от рассстройки ξ : 1– $M=0,28M_0$, 2– $M=0,16M_0$, 3– $M=0,05M_0$, $K=58*10^3$ Нм/рад, $J_1/J_2=1,8$; $C_{12}=0,25*10^7$ Нм/рад*



*Рисунок 4 – Графики зависимости относительной амплитуды колебаний A/a в зависимости от рассстройки ξ : 1– $M=0,28M_0$, 2– $M=0,16M_0$, 3– $M=0,05M_0$, $K=68*10^3$ Нм/рад, $J_1/J_2=1,8$; $C_{12}=0,25*10^7$ Нм/рад*



*Рисунок 5 – Графики зависимости относительной амплитуды колебаний A/a в зависимости от рассстройки ξ : 1– $M=0,28M_0$, 2– $M=0,16M_0$, 3– $M=0,05M_0$, $K=68*10^3$ Нм/рад, $J_1/J_2=2,1$; $C_{12}=0,25*10^7$ Нм/рад*



*Рисунок 6 – Графики зависимости относительной амплитуды колебаний A/a в зависимости от рассстройки ξ : 1– $M=0,28M_0$, 2– $M=0,16M_0$, 3– $M=0,05M_0$, $K=68*10^3$ Нм/рад, $J_1/J_2=1,8$; $C_{12}=0,5*10^7$ Нм/рад*

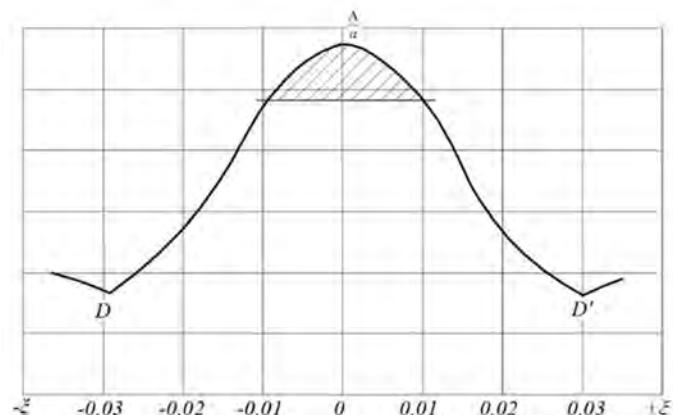


Рисунок 7 – График зависимости $A/a=f(\xi)$, рассчитанный с использованием аналитического метода

Рассматривая эти две типичные формы колебаний, отметим, что для автоколебаний колесной пары исследование влияние возмущающей силы, то есть пульсации тягового момента будет представлять интерес лишь в том случае, если частота этих пульсаций будет сопоставима с частотой автоколебаний, в противном случае мгновенное значение тягового момента можно просто рассматривать, как квазистатическое по отношению к процессу автоколебаний. Однако, если крутильная жесткость связи ротора ТЭД и колесной пары, приведенная к оси колесной пары, сопоставима с жесткостью самой оси колесной пары, то развитию процесса автоколебаний колесной пары препятствуют удары зубьев в тяговой передаче. Отсюда следует, что практический интерес для исследований влияния возмущающего момента в тяговом приводе на процесс автоколебаний представляют, прежде всего, автоколебания тягового привода.

Как показывают экспериментальные исследования тяговых приводов различных конструкций, с диаметром колеса от 510 до 1250 мм, частота автоколебаний привода в наибольшем числе случаев приходится на диапазон 12...14 Гц, что обусловлено конструктивными особенностями привода и экипажной части локомотива. Например, на основе данных отчетов ВНИКТИ, частота автоколебаний тягового привода локомотивов 2ТЭ10Л – 8,2...13 Гц, 2ТЭ121 – 12,5...13 Гц, ЧС200 – 13 Гц.

Частота динамического момента, возникающего в тяговом приводе от колебаний надрессорного строения и периодических ударов при проезде неровностей, обычно находится в диапазоне 4...8 Гц, что указывает на принципиальную возможность синхронизации автоколебаний привода со второй – третьей гармоникой динамического момента в приводе. В частности, известно, что при исследовании электровоза с мономоторным приводом с полым валом типа Жакмен в кривых на уклонах возникали крутильные колебания с частотой 10...15 Гц и динамическим моментом, в несколько раз превышавшим расчетный тяговый момент по условиям сцепления [13].

Исследования автоколебательных режимов при внешнем гармоническом возмущении показали, что синхронизация частоты автоколебаний наступает даже при малой амплитуде возмущающей силы; в режиме синхронизации амплитуда колебаний значительно больше по сравнению с амплитудой в режиме автоколебаний.

Границы области синхронизации зависят как от амплитуды возмущающей силы, так и от параметров системы: моментов инерции ведомого $-J_2$ ведущего $-J_1$ валов, жесткости валопровода $-C_{12}$, коэффициента наклона механической характеристики двигателя $-k$.

Увеличение k приводит к уменьшению области синхронизации и увеличению амплитуды колебаний. Увеличение C_{12} приводит к снижению амплитуды колебаний и к сужению области синхронизации. Увеличение отношения J_1/J_2 приводит к сужению области синхронизации.

В режиме биений амплитуда комбинационных колебаний не превышает амплитуды автоколебаний системы и с увеличением расстройки (разности между частотой возмущающей силы и частотой автоколебаний) стремится к амплитуде автоколебаний.

В тяговом приводе локомотива явление синхронизации автоколебаний с внешним полигармоническим возмущением, предположительно, возможно при возникновении фрикционных автоколебаний привода, которые могут синхронизироваться с одной из гармоник динамического момента в приводе. Для изучения данного явления предложена и запатентована конструкция стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин, А.А. Исследование фрикционных автоколебаний тяговых приводов локомотивов / А.А. Качурин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Брянск, 1975. – 21 с.
2. Лысак, В.А. Динамика карданных приводов движущих осей тепловозов с гидропередачами / В.А. Лысак // Транспортное машиностроение. – 1966. – Вып. 1. – С. 4–6.
3. Лысак, В.А. Динамика трансмиссии тепловоза ТУ6 / В.А. Лысак // Транспортное машиностроение. – 1966. – Вып. 7. – С. 8–10.
4. Суздалецев, М.Я. Исследование автоколебаний колесной пары локомотива при боксованиях. / М.Я. Суздалецев, А.А. Воробьев. // Труды МИИТ. – 1962. – Вып. 150. – С. 23–30.
5. Ван-дер-Поль, Б. Нелинейная теория электрических колебаний / Б. Ван-дер-Поль. Пер. с англ. – М.: Связтехиздат, 1935. – 42 с.
6. Теодорчик, К.Ф. Автоколебательные системы. / К.Ф. Теодорчик. – М.: Гостехиздат, 1952. – 252 с.
7. Хохлов, Р.В. К теории захватывания при малой амплитуде внешней силы. / Р.В. Хохлов. – ДАН СССР. – 1954. – 97. – № 3(1954). – С. 411–414.
8. Бутенин, Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний. / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1963. – 384 с.
9. Бутенин, Н.В. Теория колебаний / Н.В. Бутенин. – М.: Высшая школа, 1963. – 282 с.

10. Боголюбов, Н.Н Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Изд. 4-е, исп. и доп. / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 503 с.
11. Митропольский, Ю.А. Метод усреднения в нелинейной механике / Ю.А. Митропольский. – Киев: Наукова думка, 1971. – 440 с.
12. Беляев, А.И. Повышение надежности экипажной части тепловозов: монография / А.И. Беляев, Б.Б. Бунин, С.М. Голубятников и др.; под ред. Л.К. Добрынина. – М.: Транспорт, 1984. – 248 с.
13. Вир, Р.К. Конструкция и опыт эксплуатации мономоторных тележек электровозов железных дорог Индии / Р.К. Вир // «Железные дороги мира». – 1981. – № 11. – С. 41–46.

Борзенков Михаил Иванович

ФГБОУ ВО Приокский государственный университет,
г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bim@ostu.ru

Измеров Олег Васильевич

Брянский государственный технический университет,
Соискатель по кафедре «Подвижной состав железных
дорог»
E-mail: izmerov@yandex.ru

Копылов Степан Олегович

Брянский государственный технический университет,
Аспирант
E-mail: kopylov.stepan@gmail.com

Воробьев Владимир Иванович

Брянский государственный технический университет,
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

M.I. BORZENKOV, V.I. VOROBIEV, S.O. KOPYLOV, O.V. IZMEROV

RESEARCHING OF THE PROCESS OF SELF-EXCITED FRICTIONAL OSCILLATIONS WITH EXTERNAL HARMONIOUS INDIGNATION

Considered the mathematical model of two-mass oscillatory system. The technique of definition of the mode of grasping and biharmonic modes and finding motion parameters for these modes. The study was conducted by the method of slowly varying coefficients.

Keywords: two-mass system, the oscillation system self-excited frictional oscillations, synchronization of self-oscillations.

BIBLIOGRAPHY

1. Kachurin, A.A. Issledovaniye friktsionnykh avtokolebaniy tyagovykh privodov lokomotivov / A.A. Kachurin // Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – Bryansk, 1975. – 21 s.
2. Lysak, V.A. Dinamika kardannykh privodov dvizhushchikh osey teplovozov s gidroperedachami / V.A. Lysak // Transportnoye mashinostroyeniye. – 1966. – Vyp. 1. – S. 4–6.
3. Lysak, V.A. Dinamika transmissii teplovoza TU6 / V.A. Lysak // Transportnoye mashinostroyeniye. – 1966. – Vyp. 7. – S. 8–10.
4. Suzdal'tsev, M.YA. Issledovaniye avtokolebaniy kolesnoy pary lokomotiva pri boksovani. / M.YA. Suzdal'tsev, A.A. Vorobyeva. // Trudy MIIT. – 1962. – Vyp. 150. – S. 23–30.
5. Van-der-Pol. B. Nelineynaya teoriya elektricheskikh kolebaniy / B. Van-der-Pol. Per. s angl. – M.: Svyaztekhizdat, 1935. – 42 s.
6. Teodorchik, K.F. Avtokolebatelnyye sistemy. / K.F. Teodorchik. – M.: Gostekhizdat, 1952. – 252 s.
7. Khokhlov, R.V. K teorii zakhvatyvaniya pri maloy amplitude vneshney sily. / R.V. Khokhlov. – DAN SSSR. – 1954. – 97. – № 3(1954). – S. 411–414.
8. Butenin, N.V. Vvedeniye v teoriyu nelineynykh kolebaniy. / N.V. Butenin, YU.I. Neymark, N.A. Fufayev. – M.: Nauka, 1963. – 384 s.
9. Butenin, N.V. Teoriya kolebaniy / N.V. Butenin. – M.: Vysshaya shkola, 1963. – 282 s.
10. Bogolyubov, N.N Asimptoticheskiye metody v teorii nelineynykh kolebaniy. Izd. 4-ye, isp. i dop. / N.N. Bogolyubov, YU.A. Mitropolskiy. – M.: Nauka, 1974. – 503 s.
11. Mitropolskiy, YU.A. Metod usredneniya v nelineynoy mekhanike / YU.A. Mitropolskiy. – Kiyev: Naukova dumka, 1971. – 440 s.
12. Belyayev, A.I. Povysheniye nadezhnosti ekipazhnay chasti teplovozov: monografiya / A.I. Belyayev, B.B. Bunin, S.M. Golubyatnikov i dr.; pod red. L.K. Dobrynina. – M.: Transport, 1984. – 248 s.
13. Vir, R.K. Konstruktsiya i opyt ekspluatatsii monomotornykh telezhek elektrovozov zheleznykh dorog Indii / R.K. Vir // «Zheleznyye dorogi mira». – 1981. – № 11. – S. 41–46.

Borzenkov Mikhail Ivanovich

Prioksky State University
Ph.D., Associate Professor
E-mail: bim@ostu.ru

Vorobiev Vladimir Ivanovich

Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk
Ph.D., Associate Professor
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Kopylov Stepan Olegovich

Bryansk State Technical University, Bryansk
Postgraduate student
E-mail: kopylov.stepan@gmail.com

Izmerov Oleg Vasilevich

Bryansk State Technical University, Bryansk
Competitor of the Department «Railroad rolling stock»
E-mail: izmerov@yandex.ru

А.Ю. КОЛЬЦОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПРИМЕНИМОСТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ДИСКРЕТНЫХ АНАЛОГОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Исследуются вопросы применимости метода статистической параметрической адаптации к реально возникающим при исследовании технических систем и физических явлений вычислительным задачам. Рассмотрено применение данного метода для уточнения дискретной модели многоклиневой опоры скольжения, на примере которой показана способность метода адаптироваться к особенностям решаемой вычислительной задачи, восстанавливать и уточнять известные эмпирические способы повышения точности. Показана алгоритмическая эффективность метода параметрической адаптации.

Ключевые слова: параметрическая адаптация, математическое моделирование, вычислительная математика, метод конечных разностей, аддитивные расчетные сетки.

Принципы и методы математического моделирования в последнее время стали играть центральную роль в технических науках, во многих отношениях заменив собой натурный эксперимент. При этом следует отметить, что актуальные для технических приложений математические задачи, поставленные относительно систем уравнений математических моделей сложных систем, находятся либо на переднем крае, либо за пределами возможностей современной математической науки. В этой связи практически безальтернативным средством получения качественных и количественных результатов, необходимых для исследования и проектирования технических систем с заданными характеристиками, оказывается замена исходной математической модели близкой к ней (в указываемом смысле) дискретной моделью и постановка относительно нее аналогичной задачи вычислительной математики. Вопрос об адекватности вычислительной модели, то есть о правомерности переноса сделанных относительно нее выводов на систему, описываемую исходной, подвергающейся дискретизации непрерывной моделью, оказывается центральным вопросом численного моделирования. Обычно данный вопрос рассматривается с позиции чисто аналитической, в рамках которой необходимо доказать, что при указанном способе дискретизации последовательность приближений при увеличении размерности модели сходится к непрерывной модели в указанной топологии. Однако с практической точки зрения одной сходимости не достаточно для оценки адекватности модели при заданной степени дискретизации, необходимо иметь также представление о скорости сходимости данного процесса. При этом теоретические оценки скорости сходимости, полученные для ряда численных методов, обычно оказываются достаточно грубыми и их непосредственное использование оказывается затруднительно ввиду того, что определяемая в соответствии с ними достаточная (но не необходимая!) размерность дискретной модели оказывается настолько большой, что решение поставленной относительно такой модели вычислительной задачи не может быть получено даже на сверхпроизводительных вычислительных машинах, не говоря уже о существенном влиянии при таких размерностях вычислительных погрешностей на качество получаемого решения. В этой связи в реальной практике обычно ограничиваются некоторыми эмпирическими или экспериментальными оценками качества получаемого приближения, постулируя достаточную скорость сходимости. Актуальным в таком случае оказывается следующий вопрос: возможно ли в рассматриваемом классе дискретных моделей при условии, что для некоторой модели из данного класса выполнены требуемые условия адекватности, найти модель той же размерности, сохраняющую адекватность при лучших показателях точности?

В работах [1, 2] был описан способ конструктивного разрешения данного вопроса путем анализа распределения обобщенной ошибки аппроксимации. Было показано, что в № 6 (314) 2015

случае равномерного распределения обобщенной ошибки на исследуемой области определения Ω аппроксиматоров существенно улучшить точность приближения без получения дополнительной информации об исходной модели и сужения таким образом класса допустимых дискретных моделей статистически невозможно. В случае же неравномерности обобщенной ошибки оказывается возможным сведение задачи оптимального выбора свободных параметров дискретной модели к задаче об оптимальном кодировании обобщенной ошибки. В частности, для сеточных методов построения дискретных моделей свободными параметрами является расположение узлов расчетной сетки при сохранении выбранной топологии. В работе [2] данный метод (параметрической адаптации) был применен для построения неравномерной ортогональной расчетной сетки при решении краевой задачи относительно уравнения Рейнольдса методом конечных разностей, а также приведены сравнительные графики оценки ошибки приближения в случае равномерного и неравномерного расположения узлов расчетной сетки, которые целесообразно продублировать в данной работе (рисунок 1).

На данных графиках можно видеть, что адаптация расчетной сетки по распределению обобщенной ошибки приводит к стабильному улучшению точности в широком диапазоне значений параметра дискретизации, однако при приближении к величине размерности т.н. эталонной аппроксимации, то есть численного решения на равномерной сетке максимального размера (в данном случае 150×150 узлов) утверждение о повышении точности на адаптивной сетке оказывается сомнительным. Действительно, наличие заметной осцилляции ошибки и превышение ее величины того значения ошибки, которое достигается на равномерной сетке, можно было бы объяснить увеличением сложности решения задачи об оптимальном кодировании при увеличении количества свободных параметров. Однако возможно и другое объяснение: при приближении к размерности эталона точность приближений, полученных на адаптивных сетках, становится *выше*, чем та, которую дает приближение, взятое за образец. В этом случае вполне естественным оказывается наличие отклонения нормы ошибки от нулевого значения и ее последующее увеличение. Необходимо, таким образом, выяснить, какое из двух возможных объяснений оказывается истинным.

Для проведения эксперимента рассмотрим конечно-разностную модель многоклиневой опоры скольжения (рисунок 2), представляющую собой краевую задачу относительно уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_{(t)} \cdot h) - 12 \rho V_{(t)} + 12h \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (1)$$

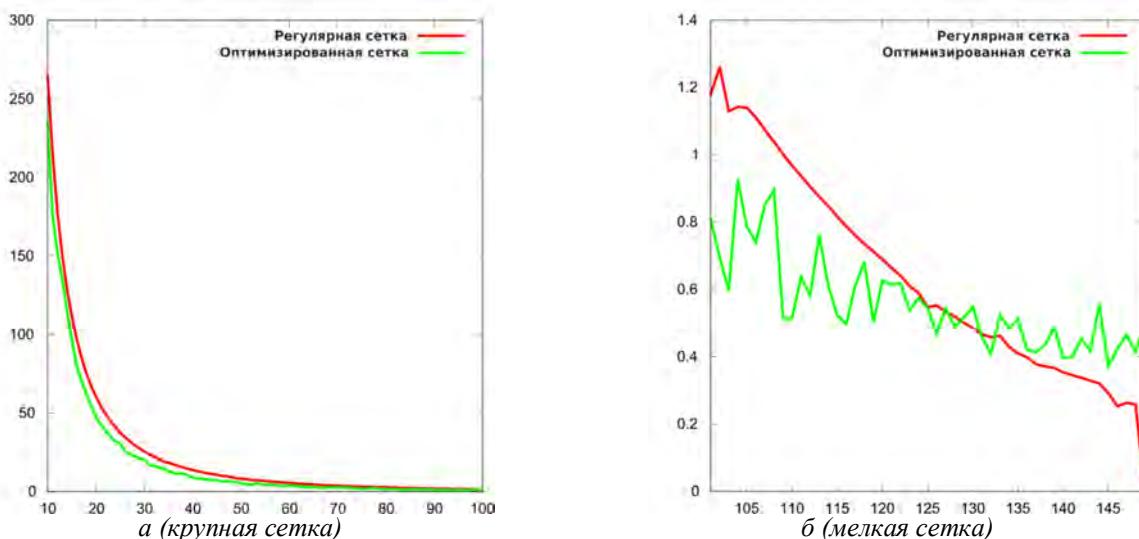


Рисунок 1 – Ошибка аппроксимации по норме пространства L_2
относительно эталонной аппроксимации размерности 150×150 узлов

Здесь h – функция зазора, определяемая исходя из формы и количества клиньев опоры. В рассматриваемой модели форма клина описывается как кубический сплайн дефекта 1 h_s , определенный и означенный на промежутке $[0, 1]$. Функция зазора, таким образом, при условии отсутствия перекоса ротора описывается как:

$$h(\varphi, z) = h_r(\varphi, z) + A \cdot h_a \left(\Psi(\varphi, z) \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \right), \quad h_a(t) = 1 - h_s(N \cdot t - \text{int}(N \cdot t)), \quad (2)$$

где A – глубина клина,

N – количество клиньев,

Ψ – функция деформации, которая может быть определена исходя из формы макронеровности поверхности опоры [3], $\Psi \equiv 1$ для поверхности, дающей окружность в любом сечении,

h_r – функция зазора в опоре без учета клиньев.

Введя на развертке опоры Ω неравномерную сетку S_N размера $N \times N$ узлов и локальную аппроксимацию дифференциального оператора в каждой точке сетки разделенными разностями первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(x,z)=(x_i,z_j)} &\simeq \frac{f(x_i, z_j) - f(x_{i-1}, z_j)}{x_i - x_{i-1}} + \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \cdot \Delta_x^2 f(x_i, z_j) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{(x,z)=(x_i,z_j)} &\simeq \Delta_x^2 f(x_i, z_j) = 2 \cdot \left(\frac{f(x_{i+1}, z_j) - f(x_i, z_j)}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} - \frac{f(x_i, z_j) - f(x_{i-1}, z_j)}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \right) \\ \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_{(x,z)=(x_i,z_j)} &\simeq \Delta_z f(x_i, z_j) = \frac{f(x_i, z_j) - f(x_i, z_{j-1})}{z_j - z_{j-1}} + \frac{z_j - z_{j-1}}{2} \cdot \Delta_z^2 f(x_i, z_j) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Big|_{(x,z)=(x_i,z_j)} &\simeq \Delta_z^2 f(x_i, z_j) = 2 \cdot \left(\frac{f(x_i, z_{j+1}) - f(x_i, z_j)}{(z_{j+1} - z_j)(z_{j+1} - z_{j-1})} - \frac{f(x_i, z_j) - f(x_i, z_{j-1})}{(z_j - z_{j-1})(z_{j+1} - z_{j-1})} \right) \end{aligned}$$

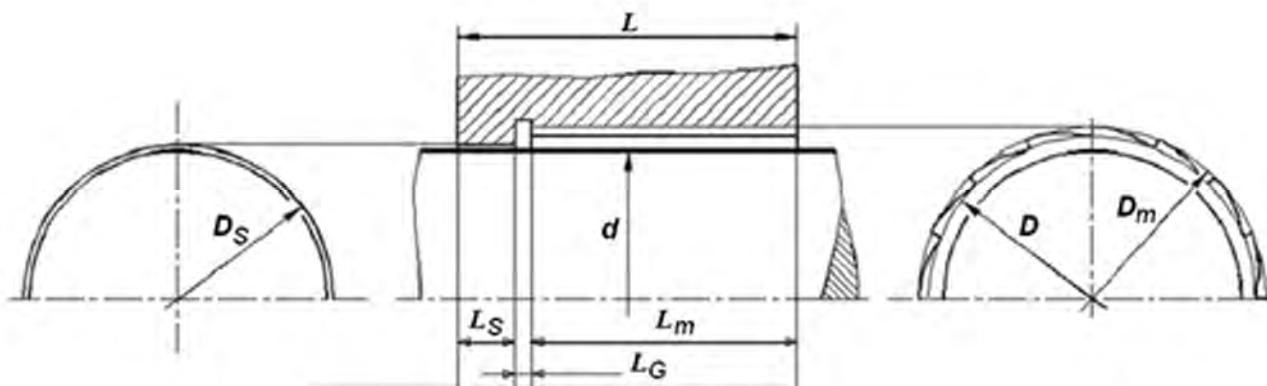


Рисунок 2 – Расчетная схема многоклинового гибридного подшипника

получим систему алгебраических уравнений, линейных для изотермической постановки задачи для вязкой несжимаемой жидкости:

$$\begin{aligned} p_{i,j} \left[-Q \left(\frac{1}{(x_{i+1} - x_i)(x_i - x_{i-1})} + \frac{1}{(z_{j+1} - z_j)(z_j - z_{j-1})} \right) + \right. \\ \left. + R \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} + \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{z_{j+1} - 2z_j + z_{j-1}}{(z_j - z_{j-1})(z_{j+1} - z_j)} \right) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + p_{i+1,j} \left[Q \frac{1}{(x_{i+1} - x_i)} + R \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{x_i - x_{i-1}}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \right] + \\
& + p_{i-1,j} \left[Q \frac{1}{(x_i - x_{i-1})} - R \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{x_{i+1} - x_i}{(x_{i+1} - x_{i-1})(x_i - x_{i-1})} \right] + \\
& + p_{i,j+1} \left[Q \frac{1}{(z_{j+1} - z_j)} + R \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{z_j - z_{j-1}}{(z_{j+1} - z_i)(z_{j+1} - z_{j-1})} \right] + \\
& + p_{i,j-1} \left[Q \frac{1}{(z_j - z_{j-1})} - R \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{(x_i, z_j)} \frac{z_{j+1} - z_i}{(z_{j+1} - z_{j-1})(z_j - z_{j-1})} \right] = \\
& = 6\mu \left[h(x_i, z_j) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{(x_i, z_j)} + U(x_i, z_j) \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{(x_i, z_j)} \right] - 12\mu V(x_i, z_j). \quad Q = 2h^3, \quad R = 3h^2.
\end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, каждой заданной на Ω неравномерной ортогональной сетке ставится в соответствие сеточная функция, определяемая из уравнения (3). Значением данной функции в каждой ячейке сетки будем считать билинейную интерполяцию по ограничивающим ее узлам. Пример поля давления, полученного решением данной системы, показан на рисунок 3.

Используя данное определение сеточной функции \tilde{p}_N , построим в соответствии с [1] обучающую выборку обобщенной ошибки аппроксимации (рисунок 3). Можно видеть, что точки распределения группируются вблизи раздела клиньев опоры. Теперь, имея обучающую выборку, можно решить задачу оптимального кодирования обобщенной ошибки, которая при ограничении на ортогональность сетки сводится [2] к получению прямого произведения точек оптимального кодера для проекций точек выборки на каждую из координатных осей, получив, таким образом, неравномерную расчетную сетку.

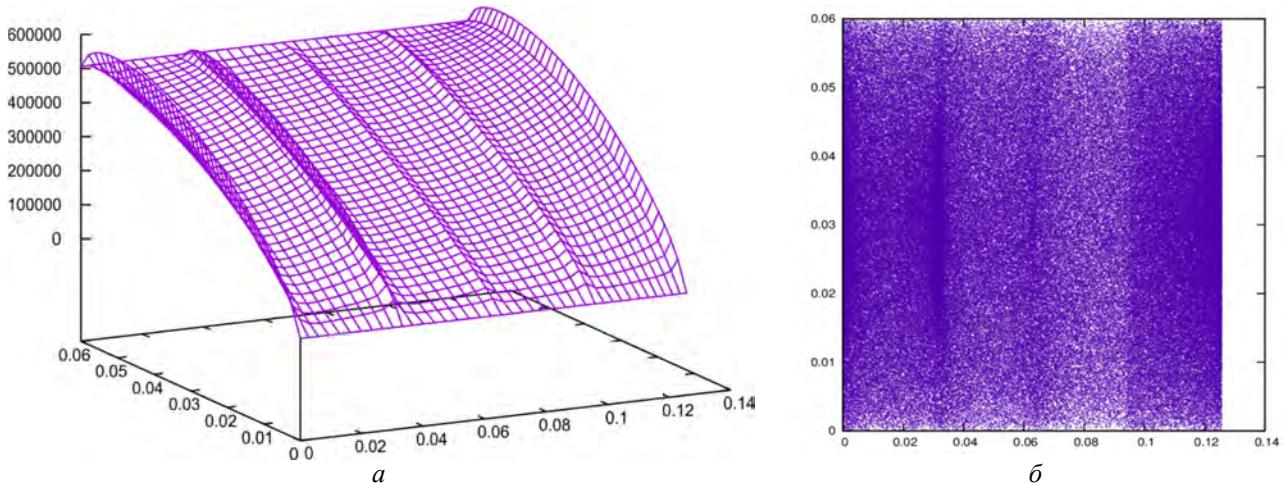


Рисунок 3 – К вопросу о построении дискретной модели многоклиневой опоры:

а – Поле давления многоклиневого подшипника с осевой подачей,

б – Обучающая выборка для конечно–разностной модели многоклиневого подшипника с четырьмя клиньями

Для ответа на поставленный ранее вопрос проведем оценку ошибки приближения по норме пространства L_2 , взяв в качестве эталонных приближения, полученные на равномерных сетках 150×150 , 200×200 , 250×250 и 300×300 . В случае, если истинным окажется первое предположение, мы должны наблюдать пересечение графиков ошибок для равномерных и аддитивных сеток в окрестностях одного и того же значения размерности, показывающего предельную величину параметра дискретизации, при котором задача об оптимальном кодировании может быть решена достаточно точно. В случае выполнения

второго предположения полученные графики не должны качественно отличаться и показывать пересечение кривых ошибки в некоторой окрестности *максимально доступного* значения параметра дискретизации. В этом случае точку пересечения можно трактовать как то значение параметра дискретизации, при котором приближение, полученное на адаптивной сетке становится точнее взятого за эталон.

На приведенных рисунках 4 можно видеть, что выполняется второе предположение – графики качественно не отличаются. Из этого можно сделать вывод, что параметрическая адаптация дает существенный выигрыш в точности по сравнению с равномерным разбиением расчетной области. Следует также дать объяснение поведению ошибки аппроксимации при равномерном разбиении расчетной области, в которой можно явно выделить четыре подпоследовательности, каждая из которых равномерно сходится к нулю. Нижняя подпоследовательность соответствует случаю, когда количество узлов в окружном направлении кратно четырем – то есть кратно количеству клиньев, в этом случае линии расчетной сетки приходятся строго на границы раздела клиньев.

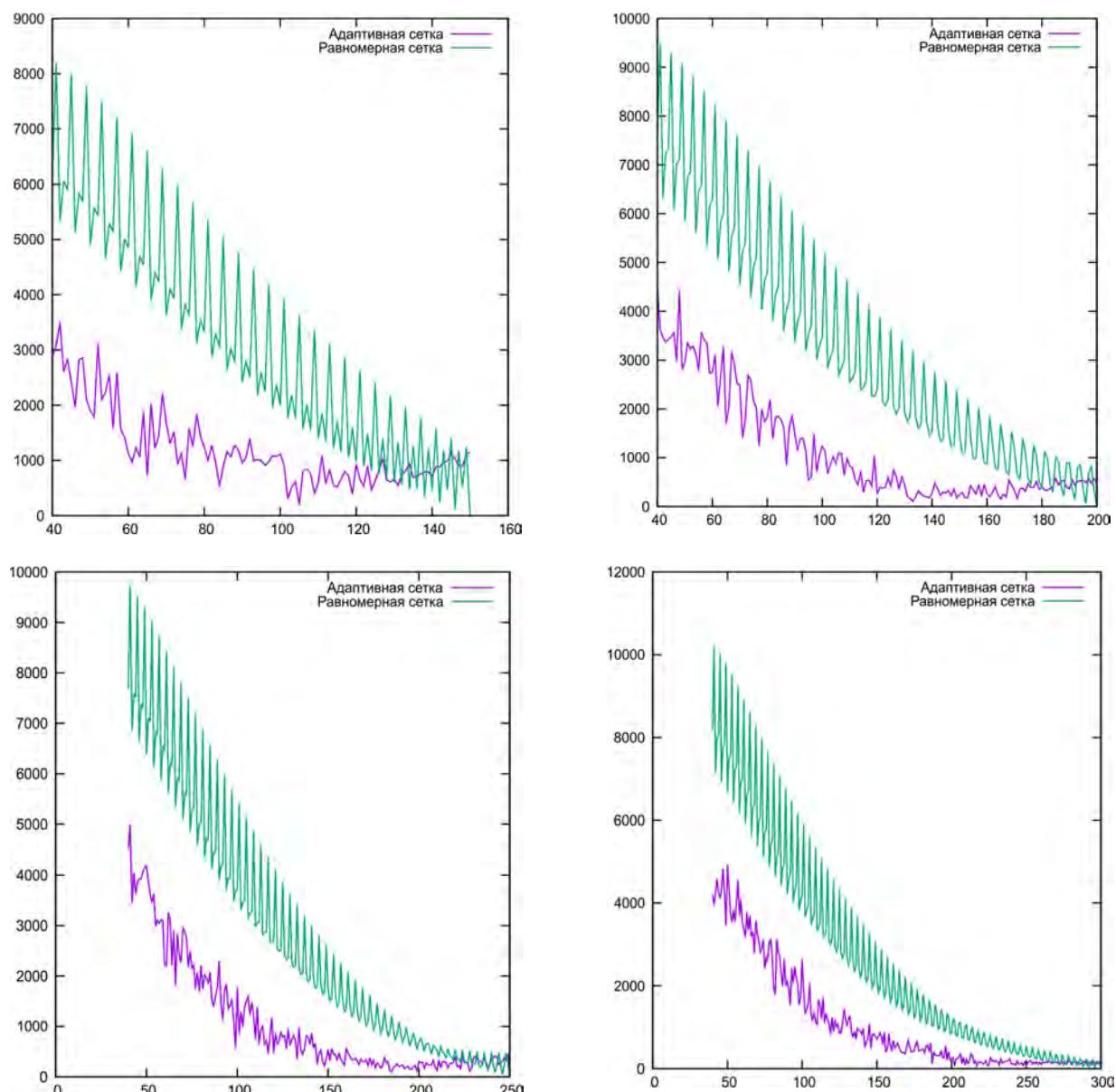


Рисунок 4 – Ошибка аппроксимации по норме пространства L_2 относительно эталонных аппроксимаций размерностей 150^2 , 200^2 , 250^2 и 300^2 узлов

Данное условие (кратность количества узлов количеству клиньев) хорошо известно и используется при расчете многоклиновых гидродинамических опор, например, в [4]. В то же

время явное указание условия попадания сеточной линии на границу раздела клиньев не является обязательным в случае адаптивного построения расчетной сетки (хотя и может быть использовано для сужения класса допустимых аппроксимаций), поскольку по распределению обобщенной ошибки можно чисто автоматически прийти к тому же выводу. Это особенно важно в тех случаях, когда такие очевидные уточнения отсутствуют, например, когда при моделировании геометрии опоры учитываются нерегулярные микронеровности.

Не менее важным вопросом, определяющим границы применимости метода параметрической адаптации, оказывается вопрос размерности эталонной аппроксимации в алгоритме генерации обучающей выборки [2]. Очевидно, что если для генерации обучающей выборки требуется иметь приближение размерности, сопоставимой с размерностью целевого (как правило – максимально допустимого в рамках имеющихся вычислительных ресурсов) приближения, то временные затраты на генерацию обучающей выборки и адаптацию значений свободных параметров могут оказаться неоправданными. С другой стороны, статистический характер предложенного метода позволяет предположить, что обучающая выборка окажется статистически адекватно распределению обобщенной ошибки уже при достаточно грубой «эталонной аппроксимации». В рамках данной работы проведем экспериментальное исследование данного вопроса. Именно, сравним динамику ошибки приближения на адаптивных сетках, построенных с использованием обучающих выборок, при генерации которых в качестве эталонного приближения взяты приближения на равномерных сетках различных размерностей. В качестве базовой модели в данном случае возьмем описанную в [2] модель гладкого гидродинамического подшипника, в качестве метода построения дискретной модели – метод конечных разностей.

На рисунке 5 показаны графики, описывающие поведение ошибки приближения сеточных функций на адаптивных сетках, построенных на обучающих выборках с различной размерностью эталонных приближений. Слева показана непосредственно динамика ошибок с ростом размерности сетки, справа – «срезы» величин ошибок для приближения различных размерностей.

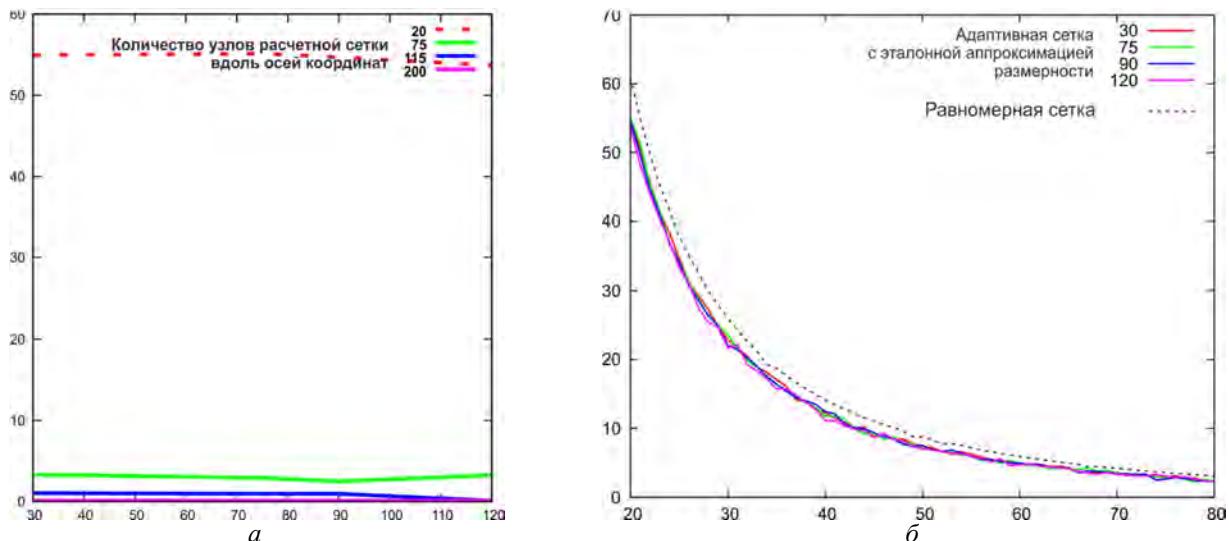


Рисунок 5 – Сравнительный график ошибки численного решения уравнения Рейнольдса при различных размерностях эталонной аппроксимации в алгоритме генерации обучающей выборки:
а – кривые ошибок для приближений одинаковых размерностей, полученных при различных эталонных аппроксимациях, б – кривые изменения ошибки при увеличении плотности расчетной сетки для эталонных аппроксимаций различных размерностей

По данным графикам можно видеть, что адаптивные приближения, полученные на различных эталонах, практически не отличаются – «срезы» ошибок близки к прямым линиям. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в достаточно большом диапазоне значений размерности эталонных приближений в алгоритме генерации обучающей выборки результирующая выборка оказывается статистически адекватной распределению обобщенной ошибки аппроксимации и, следовательно, может быть использована для

адаптации свободных параметров метода построения дискретной модели. Это позволяет утверждать, что предложенный метод параметрической адаптации обладает существенными преимуществами не только с точки зрения повышения точности получаемой дискретной модели, но и с точки зрения вычислительной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольцов, А.Ю. Построение статистически оптимальных приближений в классе параметрических функций / Кольцов А.Ю. // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 6. – С. 16–20.
2. Кольцов, А.Ю. Применение метода статистической адаптации расчетной сетки при решении уравнений математической физики методом конечных разностей / Кольцов А.Ю. // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5. – С. 180–185.
3. Кольцов, А.Ю. Моделирование рабочих поверхностей роторно–опорных узлов с учетом макро– и микронеровностей / Кольцов А.Ю., Просекова А.В. // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 5. – С. 39–42.
4. Соломин, О.В. Разработка методов и инструментальных средств динамического анализа роторных систем с подшипниками жидкостного трения: Дисс. докт. техн. наук: 01.02.06 / Соломин Олег Вячеславович. – Орел, 2007. – 417 с.

Кольцов Александр Юрьевич

ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет»

Инженер–исследователь ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем»

E-mail: me@alexander-koltsov.ru

A.Yu. KOLTSOV

RESEARCH OF QUESTIONS OF APPLICABILITY AND COMPUTATIONAL EFFICIENCY OF THE STATISTICAL PARAMETRICAL ADAPTATION METHOD IN CONSTRUCTING THE DISCRETE ANALOGUE OF MATHEMATICAL MODELS

The paper investigates the applicability of statistic parametric adaptation method to the computational tasks actually encountered when studying technical systems and physical phenomena. The considered application of this method to the specification of the multiple wedge bearing discrete model shows its ability to adapt to the features of a computational task, recover and specify the known empirical ways of improving the accuracy of a computational model. The algorythmic effeciency of the parametric adaptation method is prove.

Keywords: parametrical adaptation, mathematical modeling, computational mathematics, finite differences method, adaptive grid design.

BIBLIOGRAPHY

1. Koltsov, A.YU. Postroyeniye statisticheski optimalnykh priblizheniy v klasse parametricheskikh funktsiy / Koltsov A.YU. // Fundamentalnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 6. – S. 16–20.
2. Koltsov, A.YU. Primенине метода статистической адаптации расчетной сетки при решении уравнений математической физики методом конечных разностей / Koltsov A.YU. // Fundamentalnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 5. – S. 180–185.
3. Koltsov, A.YU. Modelirovaniye rabochikh poverkhnostey rotorno–opornykh uzlov s uchetom makro– i mikronerovnostey / Koltsov A.YU., Prosekova A.V. // Fundamentalnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 5. – S. 39–42.
4. Solomin, O.V. Razrabotka metodov i instrumentalnykh sredstv dinamicheskogo analiza rotornykh sistem s podshipnikami zhidkostnogo treniya: Diss. dokt. tekhn. nauk: 01.02.06 / Solomin Oleg Vyacheslavovich. – Orel, 2007. – 417 s.

Koltsov Alexander Yurievich

Prioksky State University, Russia, Orel

Research engineer of laboratory «Modelling of hydromechanical systems»

E-mail: me@alexander-koltsov.ru

А.В. КОШЕЛЕВ

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ВОЗБУЖДАЕМОЙ МАШИНЫ НА ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ ПОДВЕСКЕ

Описываются стационарные режимы круговых резонансных колебаний вибромашины, работы которой осуществляется за счет возбуждения комбинированного параметрического резонанса. Исследуется устойчивость стационарных решений на основе критерия Раусса-Гурвица по первому приближению. Составляются матрица Якоби и уравнения возмущенного движения. Приводятся характеристические уравнения второго и третьего порядков. Приводится сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом.

Ключевые слова: устойчивость; вибрационная машина; параметрический резонанс; изотропная упругая подвеска.

Практическая реализация вибрационных машин, работающих в резонансном режиме вынужденных колебаний, связана с трудностями соблюдения строгой резонансной настройки и технологической нагрузки. Такие машины самопроизвольно выходят из резонанса при незначительных ее изменениях, что объясняет их низкую стабильность и эффективность. Благодаря полученным результатам, являющимся перспективными в области совершенствования вибрационных машин, разработаны новые принципы для осуществления эффективных путей стабилизации и устойчивости режимов работы резонансных машин [1, 2].

На рисунке 1, а приведена механическая модель вибрационной машины с параметрическим возбуждением на изотропной упругой подвеске [3], динамика которой исследована в [4]. Применение изотропной упругой подвески объясняется возможностью получения и поддержания поступательных круговых колебаний рабочего органа, что позволяет реализовать более сложный закон движения и значительно расширить область применения вибрационной техники.

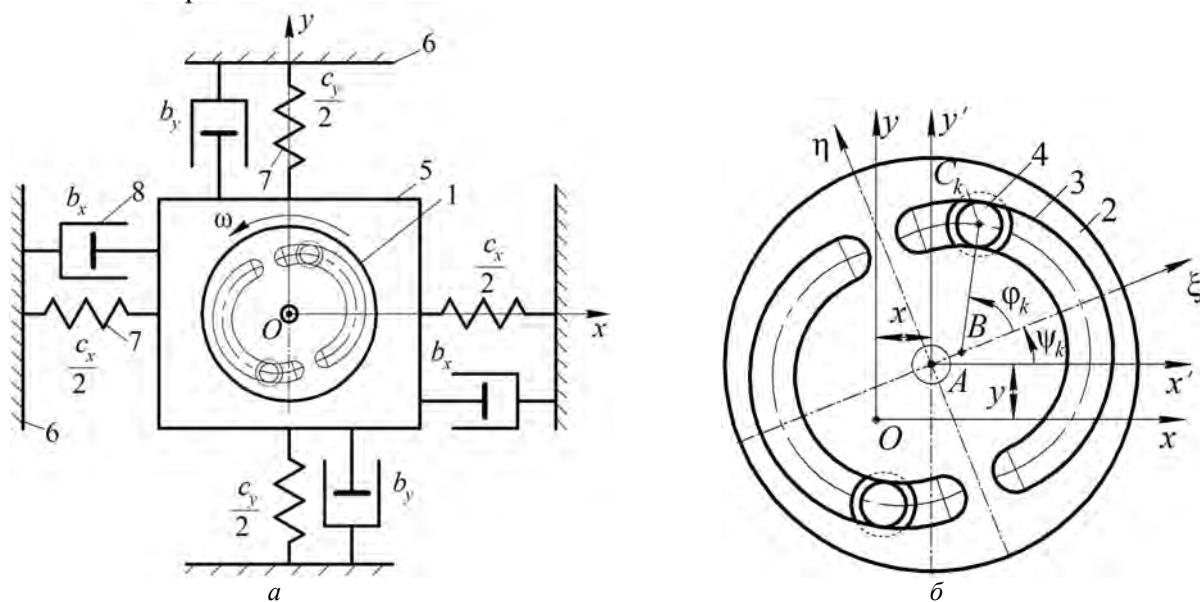


Рисунок 1 – Механическая модель параметрически возбуждаемой машины

Роторно-маятниковый возбудитель 1 этой машины состоит из набора отдельных одинаковых уравновешенных дисков 2 (рисунок 1, б). В каждом диске образована пара незамкнутых беговых дорожек 3 кругового профиля, которые расположены симметрично относительно двух взаимно перпендикулярных его диаметров, а их центры смешены от оси вращения ротора в диаметрально противоположных направлениях на одинаковые расстояния $AB=l$. На беговых дорожках размещены одинаковые уравновешенные тела качения (маятники) 4 массой m каждый с возможностью обкатки. Диски соединяются между собой в единую конструкцию так, что беговые дорожки одной пары повернуты вокруг оси ротора на

угол $\gamma_0=\pi/s$ относительно другой, где s – число дисков (рассматривается $s=2$). Роторно-маятниковый возбудитель, содержащий $N=2s$ маятников, расположенных попарно в параллельных плоскостях, в собранном виде массой m_0 жестко закрепляется на приводном валу, который посредством подшипников устанавливается на рабочем органе 5 массой M_0 . Рабочий орган связан с основанием 6 изотропной упругой подвеской 7. Демпфер 8 моделирует технологическую нагрузку.

Положение беговых дорожек определяется углами $\psi_k = \omega t + 2\pi k / N$, а положение маятников – углами $\varphi_k = A_k \cos(\omega_1 t + \theta_k)$. Качания маятников на углы φ_k ($k=1,2,3,4$), а также перемещения x, y рабочего органа составляют степени свободы рассматриваемой механической системы. Эти величины принимаются за обобщенные координаты системы. Таким образом, представленная механическая система имеет $n=N+2=6$ степеней свободы, которую можно рассматривать как систему, состоящую из двух подсистем.

Разумное усложнение динамической модели вибромашины за счет увеличения числа степеней свободы рабочего органа позволяет выявить дополнительные возможности повышения ее эффективности. Однако, резонансные машины особо чувствительны к изменению технологических нагрузок, поэтому исследование устойчивости стационарного режима работы является весьма актуальной задачей. Важно отметить, что в [5] исследуется вопрос устойчивости вибрационного грохота, рабочий орган которого имеет одну степень свободы (движение по оси y). В настоящей статье исследуется устойчивость стационарного режима работы машины, рабочий орган которой имеет две степени свободы (движение в двух взаимно перпендикулярных направлениях по осям x, y), что составляет новизну работы.

Согласно [4] с учетом $\sin \varphi_k = \varphi_k - 1/6\varphi_k^3$, $\cos \varphi_k = \varphi_k - 1/2\varphi_k^2$ математическая модель параметрически возбуждаемой машины на изотропной упругой подвеске описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_k + v^2 \tilde{\omega}^2 \varphi_k &= v^2 [\ddot{x} (\sin \tilde{\psi}_k + \varphi_k \cos \tilde{\psi}_k - \frac{1}{2} \varphi_k^2 \sin \tilde{\psi}_k) - \ddot{y} (\cos \tilde{\psi}_k - \varphi_k \sin \tilde{\psi}_k - \frac{1}{2} \varphi_k^2 \cos \tilde{\psi}_k)] + \\ &+ \beta_1 v^2 \tilde{\omega}^2 \varphi_k^3 - 2(\tilde{n}_0 + \tilde{h}_0 \varphi_k^2) \dot{\varphi}_k, \quad k=1,2,\dots,N \quad (N=4), \\ \ddot{x} + \tilde{x} &= \mu_0 \left\{ \sum_{k=1}^N [(\ddot{\varphi}_k - \tilde{\omega}^2 \varphi_k) \sin \tilde{\psi}_k + 2\tilde{\omega} \dot{\varphi}_k \cos \tilde{\psi}_k - \frac{1}{2} \tilde{\omega}^2 \varphi_k^2 \cos \tilde{\psi}_k + \varphi_k \ddot{\varphi}_k \cos \tilde{\psi}_k - \right. \\ &- 2\tilde{\omega} \varphi_k \dot{\varphi}_k \sin \tilde{\psi}_k + \dot{\varphi}_k^2 \cos \tilde{\psi}_k - \frac{1}{2} \varphi_k^2 \dot{\varphi}_k \sin \tilde{\psi}_k + \frac{1}{6} \tilde{\omega}^2 \varphi_k^3 \sin \tilde{\psi}_k - \tilde{\omega} \dot{\varphi}_k \varphi_k^2 \cos \tilde{\psi}_k - \\ &\left. - \varphi_k \dot{\varphi}_k^2 \sin \tilde{\psi}_k] \right\} - \beta_2 \tilde{x}^3 - 2(\tilde{n} + \tilde{h} \tilde{x}^2) \dot{\tilde{x}}, \\ \ddot{y} + \tilde{y} &= \mu_0 \left\{ \sum_{k=1}^N [(-\ddot{\varphi}_k + \tilde{\omega}^2 \varphi_k) \cos \tilde{\psi}_k + 2\tilde{\omega} \dot{\varphi}_k \sin \tilde{\psi}_k - \frac{1}{2} \tilde{\omega}^2 \varphi_k^2 \sin \tilde{\psi}_k + \varphi_k \dot{\varphi}_k \sin \tilde{\psi}_k + \right. \\ &+ 2\tilde{\omega} \varphi_k \dot{\varphi}_k \cos \tilde{\psi}_k + \dot{\varphi}_k^2 \sin \tilde{\psi}_k + \frac{1}{2} \varphi_k^2 \ddot{\varphi}_k \cos \tilde{\psi}_k - \frac{1}{6} \tilde{\omega}^2 \varphi_k^3 \cos \tilde{\psi}_k - \tilde{\omega} \dot{\varphi}_k \varphi_k^2 \sin \tilde{\psi}_k + \\ &\left. + \varphi_k \dot{\varphi}_k^2 \cos \tilde{\psi}_k] \right\} - \beta_2 \tilde{y}^3 - 2(\tilde{n} + \tilde{h} \tilde{y}^2) \dot{\tilde{y}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\tau = \lambda_2 t$ – безразмерное время;

$\tilde{\omega} = \omega / \lambda_2$ – безразмерная частота параметрического возбуждения;

$\lambda_2 = \sqrt{c/M}$ – собственная частота рабочего органа линейной части системы;

$\tilde{x} = x/l$, $\tilde{y} = y/l$ – безразмерные координаты;

$v^2 = m \rho_c l / J_B$ – безразмерный коэффициент, определяющий собственную частоту колебаний маятников во вращающейся системе координат, $v=0.25$;

$\rho_c = BC_k$;

J_B – момент инерции тела качения относительно оси обкатки;

$\beta_1 = 1/6$;

$\tilde{n}_0 = n_0 / \lambda_2$, $\tilde{n} = n / \lambda_2$ – безразмерные коэффициенты линейного демпфирования;

$$\mu_0 = m\rho_c / Ml = 2\varepsilon / Nv^2;$$

$\varepsilon = v^2 Nm\rho_c / (2Ml)$ – коэффициент пропорциональный отношению общей массы маятников к массе всей системы;

$M = M_0 + m_0 + Nm$ – общая масса системы;

$\tilde{h}_0 = h_0 / \lambda_2$, $\tilde{h} = h / \lambda_2$ – безразмерные коэффициенты нелинейного демпфирования;

$\beta_2 = \gamma l^2$ – коэффициент нелинейности упругих восстанавливающих сил;

$\gamma = c_1 / c$;

$c_1 = c_{1x} = c_{1y}$ – коэффициент нелинейности упругой восстанавливающей силы;

$c_x = c_y = c$ – суммарная жесткость упругих элементов в направлении осей x , y соответственно.

Необходимо отметить, что в системе (1) реализуется комбинационный параметрический резонанс, когда колебания возбуждаются на частотах ω_1 и ω_2 , связанных с частотой параметрического возбуждения $\tilde{\omega}$ соотношением:

$$\tilde{\omega} = \omega_1 + \omega_2, \quad (2)$$

причем частоты генерации близки к собственным частотам, т. е. $\omega_1 \approx \lambda_1 = v\tilde{\omega}$, $\omega_2 \approx \lambda_2 = 1$, и некратны между собой.

Исследуем устойчивость стационарного режима работы параметрически возбуждаемой машины в условии изотропной упругой подвески, заимствованного из статьи [4]. Для этого кратко изложим основные положения и выводы этой работы.

Решения уравнений (1) отыскиваются в виде $\tilde{x} = A \cos(\omega_2 t + \theta)$, $\tilde{y} = A \sin(\omega_2 t + \theta)$, $\phi_k = A_k \cos(\omega_1 t + \theta_k)$, $k=1,2,\dots,N$, $N=4$, а для определения стационарных амплитуд A_k , A и фаз θ_k , θ используется метод усреднения. В результате получаем систему уравнений первого приближения:

$$\begin{aligned} \dot{A}_k &= \frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} A \left(1 - \frac{1}{8} A_k^2\right) \cos\left(\frac{2\pi k}{N} - \theta_k - \theta\right) - \tilde{n}_0 u_0 A_k, \\ \dot{\theta}_k &= -\Delta^{(k)}_{1\beta} + \frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \frac{A}{A_k} \left(1 - \frac{3}{8} A_k^2\right) \sin\left(\frac{2\pi k}{N} - \theta_k - \theta\right), \\ \dot{A} &= \frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 \sum_{k=1}^N A_k \left(1 - \frac{1}{8} A_k^2\right) \cos\left(\frac{2\pi k}{N} - \theta_k - \theta\right) - \tilde{n} u A, \\ \dot{\theta} &= -\Delta_{2\beta} + \frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{A} \left(1 - \frac{1}{8} A_k^2\right) \sin\left(\frac{2\pi k}{N} - \theta_k - \theta\right), \end{aligned} \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где $\Delta^{(k)}_{1\beta} = \omega_1 - v\tilde{\omega} + \frac{3}{8} \beta_1 \omega_1 A_k^2$, $\Delta_{2\beta} = \omega_2 - 1 - \frac{3}{8} \beta_2 \omega_2 A^2$ – нелинейные расстройки частот;

$$u_0 = 1 + \frac{1}{4} h_0^* A_0^2, \quad u = 1 + \frac{1}{4} h^* A^2;$$

$$h_0^* = \tilde{h}_0 / \tilde{n}_0, \quad h^* = \tilde{h} / \tilde{n};$$

$v\tilde{\omega} - \frac{3}{8} \beta_1 \omega_1 A_k^2$, $1 + \frac{3}{8} \beta_2 \omega_2 A^2$ – парциальные частоты, смещенные за счет нелинейности системы.

Стационарный режим работы вибромашины определяется как особые точки системы уравнений (3) при равных нулю правых частях $\dot{A}_k = \dot{A} = \dot{\theta}_k = \dot{\theta} = 0$ и выполнении условия $\theta_k = 2\pi k / N$, $k=1,2,\dots,N$, $N=4$. Таким образом приходим к системе алгебраических нелинейных уравнений относительно амплитуд A_k , A , фаз θ_k , θ , частот генерации ω_1 , ω_2 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \frac{A}{A_0} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \cos \theta &= \frac{\tilde{n}_0 u_0}{2}, & \frac{1}{4} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \frac{A}{A_0} \left(1 - \frac{3}{8} A_0^2\right) \sin \theta &= \frac{-\Delta_{1\beta}}{2}, \\ \frac{1}{4} \mu_0 N \omega_2 \frac{A_0}{A} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \cos \theta &= \tilde{n} u, & \frac{1}{4} \mu_0 N \omega_2 \frac{A_0}{A} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \sin \theta &= -\Delta_{2\beta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Вопрос о правиле отбора решений уравнений (4) может быть решен исследованием их устойчивости. Для этого составим матрицу Якоби, которая представляет собой все частные производные системы уравнений первого приближения. Определив частные производные системы (3) составим матрицу Якоби (5), состоящую из коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} &= -\frac{1}{8} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} A^* A_0 \cos \theta^* - \tilde{n}_0 - \frac{3}{4} \tilde{n}_0 \tilde{h}_0^* A_0^2; \\ a_{15} = a_{26} = a_{37} = a_{48} = a_{1,10} = a_{2,10} = a_{3,10} = a_{4,10} &= -\frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} A^* \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \sin \theta^*; \\ a_{19} = a_{29} = a_{39} = a_{49} &= \frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \cos \theta^*; \\ a_{51} = a_{62} = a_{73} = a_{84} &= -\frac{3}{4} \beta_1 \omega_1 A_0 + \frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} A^* \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{A_0^2}\right) \sin \theta^*; \\ a_{55} = a_{66} = a_{77} = a_{88} = a_{5,10} = a_{6,10} = a_{7,10} = a_{8,10} &= -\frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \frac{A^*}{A_0} \left(1 - \frac{3}{8} A_0^2\right) \cos \theta^*; \\ a_{59} = a_{69} = a_{79} = a_{89} &= -\frac{1}{2} \frac{v^2 \omega_2^2}{\omega_1} \frac{1}{A_0} \left(1 - \frac{3}{8} A_0^2\right) \sin \theta^*; \\ a_{91} = a_{92} = a_{93} = a_{94} &= \frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 \left(1 - \frac{3}{8} A_0^2\right) \cos \theta^*; \\ a_{95} = a_{96} = a_{97} = a_{98} &= \frac{1}{4} A_{9,10} = -\frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 A_0 \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \sin \theta^*; \\ a_{99} &= -\tilde{n} - \frac{3}{4} \tilde{n} \tilde{h}^* A^{*2}; \\ a_{10,1} = a_{10,2} = a_{10,3} = a_{10,4} &= -\frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 \frac{1}{A^*} \left(1 - \frac{3}{8} A_0^2\right) \sin \theta^*; \\ a_{10,5} = a_{10,6} = a_{10,7} = a_{10,8} &= \frac{1}{4} A_{10,10} = -\frac{1}{4} \mu_0 \omega_2 \frac{A_0}{A^*} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \cos \theta^*; \\ a_{10,9} &= \frac{3}{4} \beta_2 \omega_2 A^* + \mu_0 \omega_2 \frac{A_0}{A^{*2}} \left(1 - \frac{1}{8} A_0^2\right) \sin \theta^*. \end{aligned}$$

$$J = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 & 0 & 0 & a_{19} & a_{1,10} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & a_{26} & 0 & 0 & a_{29} & a_{2,10} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & a_{37} & 0 & a_{39} & a_{3,10} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 & a_{48} & a_{49} & a_{4,10} \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 & 0 & 0 & a_{59} & a_{5,10} \\ 0 & a_{62} & 0 & 0 & 0 & a_{66} & 0 & 0 & a_{69} & a_{6,10} \\ 0 & 0 & a_{73} & 0 & 0 & 0 & a_{77} & 0 & a_{79} & a_{7,10} \\ 0 & 0 & 0 & a_{84} & 0 & 0 & 0 & a_{88} & a_{89} & a_{8,10} \\ a_{91} & a_{92} & a_{93} & a_{94} & a_{95} & a_{96} & a_{97} & a_{98} & a_{99} & a_{9,10} \\ a_{10,1} & a_{10,2} & a_{10,3} & a_{10,4} & a_{10,5} & a_{10,6} & a_{10,7} & a_{10,8} & a_{10,9} & a_{10,10} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для исследования устойчивости особых точек, соответствующих стационарному режиму колебаний, воспользуемся методом, предложенным в [6]. Запишем уравнения возмущенного движения, выполнив упрощение, заключающееся в замене старших индексов равных коэффициентов матрицы Якоби на младшие.

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{A}}_1 &= a_{11}\tilde{A}_1 + a_{15}\tilde{\theta}_1 + a_{19}\tilde{A} + a_{15}\tilde{\theta}, & \dot{\tilde{A}}_2 &= a_{11}\tilde{A}_2 + a_{15}\tilde{\theta}_2 + a_{19}\tilde{A} + a_{15}\tilde{\theta}, \\ \dot{\tilde{A}}_3 &= a_{11}\tilde{A}_3 + a_{15}\tilde{\theta}_3 + a_{19}\tilde{A} + a_{15}\tilde{\theta}, & \dot{\tilde{A}}_4 &= a_{11}\tilde{A}_4 + a_{15}\tilde{\theta}_4 + a_{19}\tilde{A} + a_{15}\tilde{\theta}, \\ \dot{\tilde{\theta}}_1 &= a_{51}\tilde{A}_1 + a_{55}\tilde{\theta}_1 + a_{59}\tilde{A} + a_{55}\tilde{\theta}, & \dot{\tilde{\theta}}_2 &= a_{51}\tilde{A}_2 + a_{55}\tilde{\theta}_2 + a_{59}\tilde{A} + a_{55}\tilde{\theta}, \quad (6) \\ \dot{\tilde{\theta}}_3 &= a_{51}\tilde{A}_3 + a_{55}\tilde{\theta}_3 + a_{59}\tilde{A} + a_{55}\tilde{\theta}, & \dot{\tilde{\theta}}_4 &= a_{51}\tilde{A}_4 + a_{55}\tilde{\theta}_4 + a_{59}\tilde{A} + a_{55}\tilde{\theta}, \\ \dot{\tilde{A}} &= a_{91}(\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + \tilde{A}_3 + \tilde{A}_4) + a_{95}(\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_4) + a_{99}\tilde{A} + 4a_{95}\tilde{\theta}, \\ \dot{\tilde{\theta}} &= a_{10,1}(\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + \tilde{A}_3 + \tilde{A}_4) + a_{10,5}(\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_4) + a_{10,9}\tilde{A} + 4a_{10,5}\tilde{\theta}.\end{aligned}$$

Из (6) видно, что второй и четвертый столбцы системы дифференциальных уравнений (6) линейно зависимы. Согласно [6] решение данной проблемы осуществляется путем разделения системы десяти уравнений (6) на три подсистемы. Для этого попарно вычтем и сложим первые восемь уравнений системы (6). В результате вычитания получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\tau}(\tilde{A}_2 - \tilde{A}_1) = a_{11}(\tilde{A}_2 - \tilde{A}_1) + a_{15}(\tilde{\theta}_2 - \tilde{\theta}_1) \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{A}_4 - \tilde{A}_3) = a_{11}(\tilde{A}_4 - \tilde{A}_3) + a_{15}(\tilde{\theta}_4 - \tilde{\theta}_3) \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{\theta}_2 - \tilde{\theta}_1) = a_{51}(\tilde{A}_2 - \tilde{A}_1) + a_{55}(\tilde{\theta}_2 - \tilde{\theta}_1) \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{\theta}_4 - \tilde{\theta}_3) = a_{51}(\tilde{A}_4 - \tilde{A}_3) + a_{55}(\tilde{\theta}_4 - \tilde{\theta}_3) \end{array} \right. \quad (7)$$

В результате сложения получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\tau}(\tilde{A}_2 + \tilde{A}_1) = a_{11}(\tilde{A}_2 + \tilde{A}_1) + a_{15}(\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1) + 2a_{19}\tilde{A} + 2a_{15}\tilde{\theta} \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{A}_4 + \tilde{A}_3) = a_{11}(\tilde{A}_4 + \tilde{A}_3) + a_{15}(\tilde{\theta}_4 + \tilde{\theta}_3) + 2a_{19}\tilde{A} + 2a_{15}\tilde{\theta} \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1) = a_{51}(\tilde{A}_2 + \tilde{A}_1) + a_{55}(\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1) + 2a_{59}\tilde{A} + 2a_{55}\tilde{\theta} \\ \frac{d}{d\tau}(\tilde{\theta}_4 + \tilde{\theta}_3) = a_{51}(\tilde{A}_4 + \tilde{A}_3) + a_{55}(\tilde{\theta}_4 + \tilde{\theta}_3) + 2a_{59}\tilde{A} + 2a_{55}\tilde{\theta} \end{array} \right. \quad (8)$$

Третью подсистему, состоящую из двух последних уравнений системы (6) оставляем без изменений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\tilde{A}} = a_{91}(\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + \tilde{A}_3 + \tilde{A}_4) + a_{95}(\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_4) + a_{99}\tilde{A} + 4a_{95}\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = a_{10,1}(\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + \tilde{A}_3 + \tilde{A}_4) + a_{10,5}(\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_4) + a_{10,9}\tilde{A} + 4a_{10,5}\tilde{\theta} \end{array} \right. \quad (9)$$

Система уравнений (7) распадается на две замкнутые независимые подсистемы для разностей возмущений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_1 = a_{11}\xi_1 + a_{15}\xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = a_{51}\xi_1 + a_{55}\xi_3 \end{array} \right. \quad (7')$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_2 = a_{11}\xi_2 + a_{15}\xi_4 \\ \dot{\xi}_4 = a_{51}\xi_2 + a_{55}\xi_4 \end{array} \right. \quad (7'')$$

где $\tilde{A}_2 - \tilde{A}_1 = \xi_1$, $\tilde{A}_4 - \tilde{A}_3 = \xi_2$, $\tilde{\theta}_2 - \tilde{\theta}_1 = \xi_3$, $\tilde{\theta}_4 - \tilde{\theta}_3 = \xi_4$.

В системе (8) выполним замену переменных $\tilde{A}_2 + \tilde{A}_1 = \eta_1$, $\tilde{A}_4 + \tilde{A}_3 = \eta_2$, $\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1 = \eta_3$, $\tilde{\theta}_4 + \tilde{\theta}_3 = \eta_4$. Затем попарно вычтем и сложим уравнения системы (8), в результате получим одну систему для разностей возмущений (8') и систему (8'') для суммы возмущений с добавкой уравнений системы (9):

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau}(\eta_2 - \eta_1) = a_{11}(\eta_2 - \eta_1) + a_{15}(\eta_4 - \eta_3) \\ \frac{d}{d\tau}(\eta_4 - \eta_3) = a_{51}(\eta_2 - \eta_1) + a_{55}(\eta_4 - \eta_3) \end{cases} \quad (8')$$

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau}(\eta_2 + \eta_1) = a_{11}(\eta_2 + \eta_1) + a_{15}(\eta_4 + \eta_3) + 4a_{19}\tilde{A} + 4a_{15}\tilde{\theta} \\ \frac{d}{d\tau}(\eta_4 + \eta_3) = a_{51}(\eta_2 + \eta_1) + a_{55}(\eta_4 + \eta_3) + 4a_{59}\tilde{A} + 4a_{55}\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{A}} = a_{91}(\eta_2 + \eta_1) + a_{95}(\eta_4 + \eta_3) + a_{99}\tilde{A} + 4a_{95}\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = a_{10,1}(\eta_2 + \eta_1) + a_{10,5}(\eta_4 + \eta_3) + a_{10,9}\tilde{A} + 4a_{10,5}\tilde{\theta} \end{cases} \quad (8'')$$

Таким образом, системы (8), (9) распадаются на две замкнутые независимые подсистемы (8') и (8''), состоящих из двух и четырех уравнений соответственно, которые с заменой переменных $\eta_2 - \eta_1 = \chi_1$, $\eta_4 - \eta_3 = \chi_3$, $\eta_2 + \eta_1 = \chi_2$, $\eta_4 + \eta_3 = \chi_4$ приводятся к видам:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = a_{11}\chi_1 + a_{15}\chi_3 \\ \dot{\chi}_3 = a_{51}\chi_1 + a_{55}\chi_3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{\chi}_2 = a_{11}\chi_2 + a_{15}\chi_4 + 4a_{19}\tilde{A} + 4a_{15}\tilde{\theta} \\ \dot{\chi}_4 = a_{51}\chi_2 + a_{55}\chi_4 + 4a_{59}\tilde{A} + 4a_{55}\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{A}} = a_{91}\chi_2 + a_{95}\chi_4 + a_{99}\tilde{A} + 4a_{95}\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = a_{10,1}\chi_2 + a_{10,5}\chi_4 + a_{10,9}\tilde{A} + 4a_{10,5}\tilde{\theta} \end{cases} \quad (11)$$

Как и в случае с системой (6) в системе (11) имеются линейно зависимые столбцы (второй и четвертый). Выполним аналогичные преобразования для получения системы третьего порядка. А именно сложим второй и четвертый столбцы системы (11), после чего сложим вторую и четвертую строки, в результате получим:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau}\chi_2 = a_{11}\chi_2 + a_{15}(\chi_4 + 4\tilde{\theta}) + 4a_{19}\tilde{A} \\ \frac{d}{d\tau}(\chi_4 + 4\tilde{\theta}) = (a_{51} + 4a_{10,1})\chi_2 + (a_{55} + 4a_{10,5})(\chi_4 + 4\tilde{\theta}) + (4a_{59} + 4a_{10,9})\tilde{A} \\ \frac{d}{d\tau}\tilde{A} = a_{91}\chi_2 + a_{95}(\chi_4 + 4\tilde{\theta}) + a_{99}\tilde{A} \end{cases} \quad (11')$$

Введя переменную $\chi_4 + 4\tilde{\theta} = \chi_5$, придем к виду:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_2 = a_{11}\chi_2 + a_{15}\chi_5 + 4a_{19}\tilde{A} \\ \dot{\chi}_5 = (a_{51} + 4a_{10,1})\chi_2 + (a_{55} + 4a_{10,5})\chi_5 + 4(a_{59} + a_{10,9})\tilde{A} \\ \dot{\tilde{A}} = a_{91}\chi_2 + a_{95}\chi_5 + a_{99}\tilde{A} \end{cases} \quad (11'')$$

Устойчивость или неустойчивость положения равновесия определяется знаками действительных частей собственных значений матрицы Якоби. Чтобы найти собственные значения p , необходимо решить характеристическое уравнение алгебраического вида:

$$a_0 p^z + a_1 p^{z-1} + a_2 p^{z-2} + \dots + a_{z-1} p + a_z = 0, \quad (12)$$

где z – порядок системы.

Вычисления корней такого уравнения может представлять значительные трудности, особенно, если $z \geq 3$, поэтому большое значение имеют методы, которые позволяют без решения характеристическое уравнения, установить устойчивость системы. Одним из таких методов является критерий Рауса–Гурвица, который содержит необходимые и достаточные условия устойчивости системы. Полученные в результате выше проведенных преобразований системы (7), (7'), (10) являются идентичными системами второго порядка, что не составляет труда исследовать их на устойчивость по критерию Рауса–Гурвица. Для системы второго порядка условие устойчивости имеет вид: $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0$, то есть все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными. Составим характеристическое уравнение второго порядка для систем (7), (7'), (10), имеющих одинаковые коэффициенты:

$$p^2 - (a_{11} + a_{55})p + a_{11}a_{55} - a_{15}a_{51} = 0, \quad (13)$$

где $a_0 = 1, a_1 = -(a_{11} + a_{55}), a_2 = a_{11}a_{55} - a_{15}a_{51}$.

Для системы третьего порядка условие устойчивости имеет вид: $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$, то есть все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными. Кроме этого добавляется дополнительное условие $a_1a_2 - a_0a_3 > 0$, которое тоже должно быть положительным. В соответствии с этим составим характеристическое уравнение для системы (11''):

$$\begin{aligned} p^3 - (a_{11} + a_{55} + a_{99} + 4a_{10,5})p^2 + (a_{11}a_{55} + 4a_{11}a_{10,5} + a_{11}a_{99} + a_{55}a_{99} + 4a_{99}a_{10,5} - \\ - 4a_{59}a_{95} - 4a_{95}a_{10,9} - a_{15}a_{51} - 4a_{15}a_{10,1} - 4a_{19}a_{91})p - (a_{11}a_{55}a_{99} + 4a_{11}a_{99}a_{10,5} - \\ - 4a_{11}a_{59}a_{95} - 4a_{11}a_{95}a_{10,9} - a_{15}a_{51}a_{99} - 4a_{15}a_{99}a_{10,1} + 4a_{15}a_{59}a_{91} + 4a_{15}a_{91}a_{10,9} + \\ + 4a_{19}a_{51}a_{95} + 16a_{19}a_{95}a_{10,1} - 4a_{19}a_{55}a_{91} - 16a_{19}a_{91}a_{10,5}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $a_0 = 1, a_1 = -(a_{11} + a_{55} + a_{99} + 4a_{10,5}),$

$$\begin{aligned} a_2 = (a_{11}a_{55} + 4a_{11}a_{10,5} + a_{11}a_{99} + a_{55}a_{99} + 4a_{99}a_{10,5} - 4a_{59}a_{95} - 4a_{95}a_{10,9} - a_{15}a_{51} - \\ - 4a_{15}a_{10,1} - 4a_{19}a_{91}), \\ a_3 = -(a_{11}a_{55}a_{99} + 4a_{11}a_{99}a_{10,5} - 4a_{11}a_{59}a_{95} - 4a_{11}a_{95}a_{10,9} - a_{15}a_{51}a_{99} - 4a_{15}a_{99}a_{10,1} + \\ + 4a_{15}a_{59}a_{91} + 4a_{15}a_{91}a_{10,9} + 4a_{19}a_{51}a_{95} + 16a_{19}a_{95}a_{10,1} - 4a_{19}a_{55}a_{91} - 16a_{19}a_{91}a_{10,5}). \end{aligned}$$

Результаты компьютерного моделирования преобразованных алгебраических уравнений (4) численным методом итераций типа Зейделя в программном пакете MathLab позволяют вычислить коэффициенты характеристических уравнений (13), (14), а также построить амплитудно–частотные характеристики.

Анализ устойчивости стационарных режимов работы параметрически возбуждаемой машины при наличии изотропных связей показывает, что левая ветвь резонансной кривой 1, изображенной сплошной линией на рисунке 2 до точки A_1 является устойчивой, поскольку в точках этой кривой все коэффициенты характеристических уравнений (13), (14) являются положительными. Правая ветвь резонансной кривой 1, изображенной штриховой линией – неустойчива. В точках этой кривой не выполняется дополнительное условие устойчивости характеристического уравнения (14) третьего порядка. В интервале резонансной зоны $\tilde{\omega}^{(1)} < \tilde{\omega} < \tilde{\omega}^{(2)}$ (области неустойчивости) состояние равновесия системы неустойчиво и происходит плавное возбуждение параметрических колебаний, амплитуда которых изменяется вдоль левой ветви резонансной кривой 1. В точке A_1 этой кривой колебания теряют устойчивость, и происходит их срыв. В интервале $\tilde{\omega}^{(2)} < \tilde{\omega} < \tilde{\omega}^{(3)}$ параметрические колебания можно возбудить ударом (жестким возбуждением), величиной, превышающей максимальное значение амплитуды правой ветви резонансной кривой. При частотах, расположенных справа от точки A_1 , т.е в области $\tilde{\omega} > \tilde{\omega}^{(3)}$ колебания невозможны ни при каких начальных условиях. Резонансные кривые 2 и 3 являются устойчивыми, поскольку в точках этих кривых все коэффициенты характеристических уравнений имеют

положительные значение, а также выполняется дополнительное условие устойчивости для системы третьего порядка.

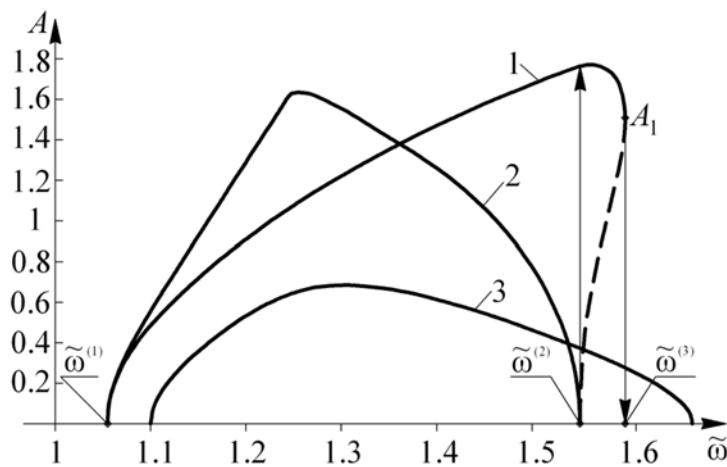


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды колебаний рабочего органа вибромашины от частоты параметрического возбуждения:

кривая 1 соответствует настройке $\varepsilon=0,01$, $v=0,25$, $\tilde{n}_0 = \tilde{n} = 0,02$, $\tilde{h}_0 = 0,06$, $\tilde{h} = 0,04$, $\beta_1=1/6$, $\beta_2=0,17$;

кривая 2 соответствует настройке $\varepsilon=0,01$, $v=0,25$, $\tilde{n}_0 = \tilde{n} = 0,02$, $\tilde{h}_0 = \tilde{h} = 0,04$, $\beta_1=1/6$, $\beta_2=0$;

кривая 3 соответствует настройке $\varepsilon=0,01$, $v=0,25$, $\tilde{n}_0 = 0,02$, $\tilde{n} = 0,12$, $\tilde{h}_0 = 0,03$, $\tilde{h} = 0,06$, $\beta_1=1/6$, $\beta_2=0$

Другим аргументом в пользу выбранного решения стационарного режима работы машины является сопоставление полученных теоретических результатов с результатами эксперимента [7]. Указанное сопоставление четко отражает амплитудно–частотная характеристика, построенная в ходе эксперимента (рисунок 3).

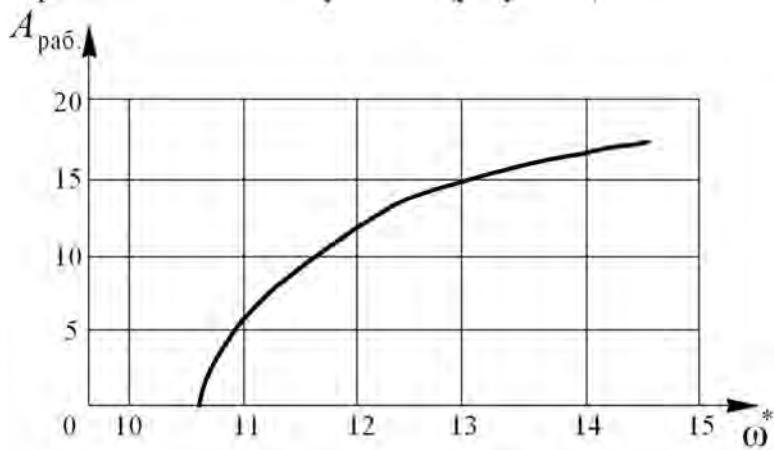


Рисунок 3 – АЧХ экспериментальной установки

Полученные результаты показывают, что использование роторно–маятникового возбудителя в качестве привода вибрационных машин позволяет получить устойчивый резонансный (энергосберегающий) режим работы. Это открывает широкие возможности для совершенствования современных и разработки принципиально новых энергетически эффективных вибрационных машин различного технического и технологического назначений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов, В.И. Использование комбинационного параметрического резонанса для усовершенствования вибрационных машин / В.И. Антипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 4. – С. 16–21.

2. Антипов, В.И. Энергетические соотношения в вибрационной машине на многократном комбинационном параметрическом резонансе. / В.И. Антипов, Н.Н. Денцов, А.В. Кошелев // Вестник Нижегородского университета им.Н.И. Лобачевского. – 2013. – 5(1). – С. 188–194.

3. Патент № 2410167 РФ МКП В 06 В 1/16. Способ возбуждения резонансных механических колебаний и устройство для его осуществления (варианты) / Антипов В.И., Антипова Р.И., Наумов В.И., Палашова И.В. – № 2009131736/09; заявл. 07.12.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3 – 3 с.

4. Антипов, В.И. Динамика параметрически возбуждаемой вибрационной машины с изотропной упругой системой / В.И. Антипов, Н.Н. Денцов, А.В. Кошелев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8. – часть 5. – С. 1037–1042.

5. Денцов, Н.Н. Исследование устойчивости стационарного режима работы вибрационного грохота с параметрическими вибровозбудителями / Н.Н. Денцов, А.А. Миронов // Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 1. – URL: www.science-education.ru/121-18618.

6. Ланда, П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы / П.С. Ланда. – М., 1980. – 360 с.

7. Кошелев, А.В. Экспериментальное исследование эффективности работы параметрического резонансного привода / А.В. Кошелев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – часть 5. – С. 996–999.

Кошелев Александр Викторович

Арзамасский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Арзамас

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин

E-mail: koshelevav88@mail.ru

A.V. KOSHELEV

ON STABILITY PARAMETRICALLY EXCITED MACHINES ON ISOTROPIC ELASTIC SUSPENSION

It describes the stationary states of circular resonance vibrations vibrator, whose work is carried out by combination excitation of parametric resonance. The stability of stationary solutions on the basis of the criterion of Routh–Hurwitz in the first approximation. In a matrix Jacobi equations of perturbed motion. We present the characteristic equation of the second and third orders. A comparison of the results of numerical simulation and experiment.

Keywords: sustainability; vibration machine; parametric resonance; isotropic elastic suspension.

BIBLIOGRAPHY

1. Antipov, V.I. Ispolzovaniye kombinatsionnogo parametricheskogo rezonansa dlya usovershenstvovaniya vibratsionnykh mashin / V.I. Antipov // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 1998. – № 4. – S. 16–21.

2. Antipov, V.I. Energeticheskiye sootnosheniya v vibratsionnoy mashine na mnogokratnom kombinatsionnom parametricheskem rezonanse. / V.I. Antipov, N.N. Dentsov, A.V. Koshelev // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im.N.I. Lobachevskogo. – 2013. – 5(1). – S. 188–194.

3. Patent № 2410167 RF MKP V 06 V 1/16. Sposob vozbuздheniya rezonansnykh mekhanicheskikh kolebaniy i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya (varianty) / Antipov V.I., Antipova R.I., Naumov V.I., Palashova I.V. – № 2009131736/09; zayavl. 07.12.2009; opubl. 27.01.2011, Byul. № 3 – 3 s.

4. Antipov, V.I. Dinamika parametricheski vozbuздhenoy vibratsionnoy mashiny s izotropnoy uprugoy sistemoy / V.I. Antipov, N.N. Dentsov, A.V. Koshelev // Fundamentalnyye issledovaniya. – 2014. – № 8. – chast 5. – S. 1037–1042.

5. Dentsov, N.N. Issledovaniye ustoychivosti statsionarnogo rezhima raboty vibratsionnogo grotkota s parametricheskimi vibrovozbuditelyami / N.N. Dentsov, A.A. Mironov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, 2015. – № 1. – URL: www.science-education.ru/121-18618.

6. Landa, P.S. Avtokolebaniya v sistemakh s konechnym chislom stepeney svobody / P.S. Landa. – M., 1980. – 360 s.

7. Koshelev, A.V. Eksperimentalnoye issledovaniye effektivnosti raboty parametricheskogo rezonansnogo privoda / A.V. Koshelev // Fundamentalnyye issledovaniya. – 2014. – № 11. – chast 5. – S. 996–999.

Koshelev Aleksandr Viktorovich

Arzamas Polytechnic Institute (branch) VPO «Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseev», Arzamas PhD, senior lecturer in technical disciplines

E-mail: koshelevav88@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.791.55

И.Н. КРАВЧЕНКО, А.А. КОЛОМЕЙЧЕНКО, Д.Г. ГРЕЧКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В статье рассмотрены статистические методы построения математических моделей процесса, на основании которых установлены закономерности влияния технологических режимов на распределение толщины газотермических покрытий, а также разработаны рекомендации по выбору их оптимальных значений, гарантирующих получение слоев с равномерной толщиной. Предложен подход к моделированию процесса формирования структуры газотермических покрытий и приведены результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие работоспособность разработанной технологии оптимизации.

Ключевые слова: газотермические технологии, защитные покрытия, нормальный закон распределения, закон Вейбулла, многофакторный план Бокса–Бенкена, математическое моделирование, уравнение регрессии, технологический процесс.

Исследование технологических процессов нанесения газотермических покрытий с помощью программ математического моделирования можно реализовать как последовательность расчетных экспериментов. Целью такого моделирования является получение информации о влиянии технологических режимов на распределение толщины газотермических покрытий [1–4]. Такая взаимосвязь может быть представлена в виде уравнений, которые позволяют анализировать влияние факторов на выходной параметр, и могут быть использованы как основа описания исследуемых процессов.

При напылении неподвижным соплом плазмотрона на поверхности формируется покрытие, толщина которого распределяется пропорционально плотности вероятности двумерного нормального закона распределения [5–7], обеспечивающего симметрию относительно центра распределения с сохранением правильной колоколообразной формы. Такой характер распределения толщины в пятне распыла может иметь место в случае отсутствия какого-либо возмущения, связанного с условиями напыления и конструктивными особенностями плазмотрона. Когда влияние возмущающих факторов становится существенным, то применение гипотезы нормального распределения может стать плохим приближением, не учитывающим асимметрию распределения.

С целью наилучшего приближения эмпирической кривой распределения толщины в пятне напыленного слоя расширен ряд теоретических функций: нормальный закон с учетом показателя асимметрии (A_s), логарифмически нормальный и распределение Вейбулла:

$$h_1(z) = \frac{h_0}{\sqrt{2\pi} S_1} \exp\left[-\frac{(z - \bar{z})^2}{2S_1^2}\right]; \quad (1)$$

$$h_2(z) = \frac{h_0}{\sqrt{2\pi} S_2} \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - \xi)^2}{2S_2^2}\right]; \quad (2)$$

$$h_3(z) = \frac{h_0 b}{a} \left(\frac{z}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{z}{a}\right)^b\right]; \quad (3)$$

$$A_s = \frac{m_3 - 3m_1 m_2 + 2m_1^3}{S_1^3}. \quad (4)$$

При дискретном замере высоты слоя h_i на расстоянии z_i с равномерным шагом измерений $C = z_i - z_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; n – общее число интервалов) оценка параметров указанных распределений производилась по следующим формулам:

$$\bar{z} = m_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i z_i}{\alpha}, \quad \xi = \sum_{i=1}^n \frac{h_i \ln z_i}{\alpha}, \quad \alpha = \sum_{i=1}^n h_i, \quad h_0 = c\alpha; \quad (5)$$

$$S_1^2 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i(z_i - \bar{z})^2}{\alpha}, \quad S_2^2 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i(\ln z_i - \xi)^2}{\alpha}, \quad (6)$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^n h_i z_i^2, \quad m_3 = \sum_{i=1}^n h_i z_i^3.$$

Выбор параметров a и b осуществлялся на основании методических рекомендаций [8, 9] с учетом соотношения:

$$V_e = \frac{S_1}{\bar{z}}. \quad (7)$$

Для установления зависимости параметров распределений от значений основных факторов напыления (сила тока I , А; суммарный расход газа S , г/с; дистанция напыления L , мм) строили математические модели на основе трехфакторного плана Бокса–Бенкена [10].

На плоские шлифованные образцы размером $120 \times 90 \times 10$ мм напылялись покрытия из магнетита при постоянном расходе порошка ($g = 0,54$ г/с) и соотношении расходов

плазмообразующих газов $\frac{m_{Ar}}{m_{N_2}} = 1$. При этом, ввод частиц порошка осуществлялся под срез

сопла. Снятие профиля покрытий производили в двух перпендикулярных плоскостях, проходящих через вершину напыленной «горки». Точность измерений составляла 0,002 мкм.

Анализ формы пятен напыленных слоев показал, что они представляют собой эллипсы с большой z_1 и малой z_2 осями, т.е. распределение не является строго круговым. При этом величина показателя асимметрии отлична от нуля и будет зависеть от параметров режима напыления. Поскольку ввод порошка под срез сопла и смещение оси подводящей трубки от вертикальной оси сопла вызывают неравномерное распределение частиц в потоке плазмы, то режимы напыления, их нагрев, ускорение и время пребывания в струе являются превалирующими причинами формирования слоев с асимметричным распределением их толщины на поверхности [11, 12].

Действие более значительных сил инерции и газодинамических сил на частицы способствует появлению большой оси эллипса и искажению формы профиля покрытия, что отражается в более высоких значениях показателя асимметрии, чем в направлении малой оси, зависимость которых от условий напыления имеет вид:

$$A_{S_1} = 0,271 - 0,036 x_1 - 0,088 x_2 - 0,06 x_3 + 0,033 x_1^2 - \\ - 0,094 x_2^2 - 0,053 x_3^2 - 0,031 x_1 x_2 + 0,111 x_2 x_3; \quad (8)$$

$$A_{S_2} = -0,063 - 0,028 x_1 + 0,035 x_3 + 0,028 x_1^2 - 0,011 x_2^2 + \\ + 0,024 x_3^2 - 0,013 x_1 x_2 - 0,042 x_1 x_3 + 0,011 x_2 x_3, \quad (9)$$

где x_i – значения в кодированном масштабе, связанные со значениями факторов в натуральном виде (I, S, L) соотношениями:

$$x_1 = \frac{I - 450}{50}; \quad x_2 = \frac{S - 1}{0,25}; \quad x_3 = \frac{L - 130}{30}.$$

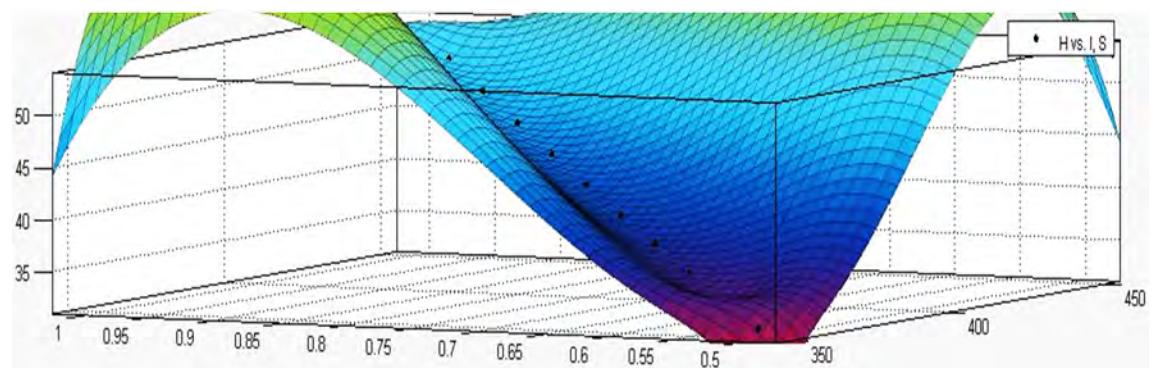
Зависимость максимальной толщины h в пятне распыла и коэффициента использования порошка η от режимов напыления адекватно описываются следующими уравнениями регрессии:

$$h = 0,618 + 0,019 x_1 - 0,175 x_2 - 0,264 x_3 + 0,068 x_1^2 + 0,03 x_2^2 + \\ + 0,112 x_3^2 + 0,026 x_1 x_2 + 0,013 x_1 x_3 + 0,016 x_2 x_3, \text{ мм}; \quad (10)$$

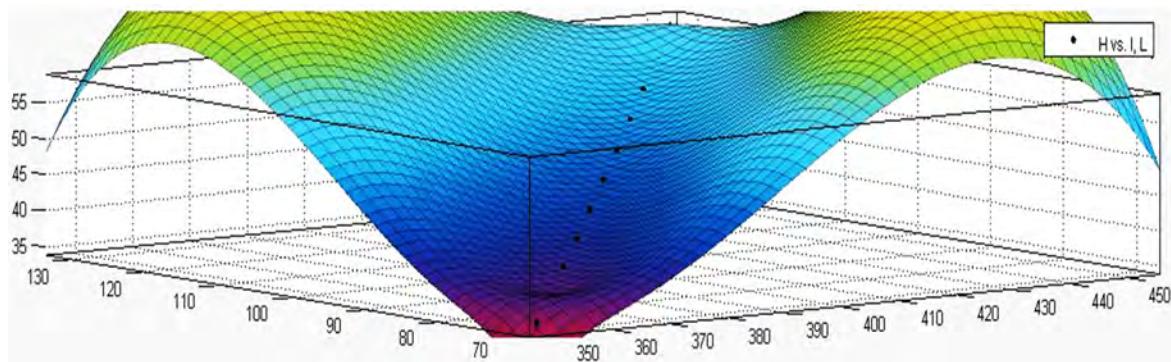
$$\eta = 0,346 + 0,033 x_1 - 0,046 x_2 + 0,034 x_3 - 0,015 x_1^2 + 0,013 x_2^2 + \\ - 0,037 x_3^2 + 0,01 x_1 x_2 + 0,055 x_1 x_3 - 0,028 x_2 x_3. \quad (11)$$

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель в виде полинома второй степени:

$$h = 8,4114868 - 0,0273058 I + 1,47312 S + 0,0292683 L + 0,000272 I^2 + 0,48 S^2 + \\ + 0,000121968 L^2 + 0,00208 I \cdot S + 0,00000858 I \cdot L + 0,002112 S \cdot L, \text{ мм}. \quad (12)$$

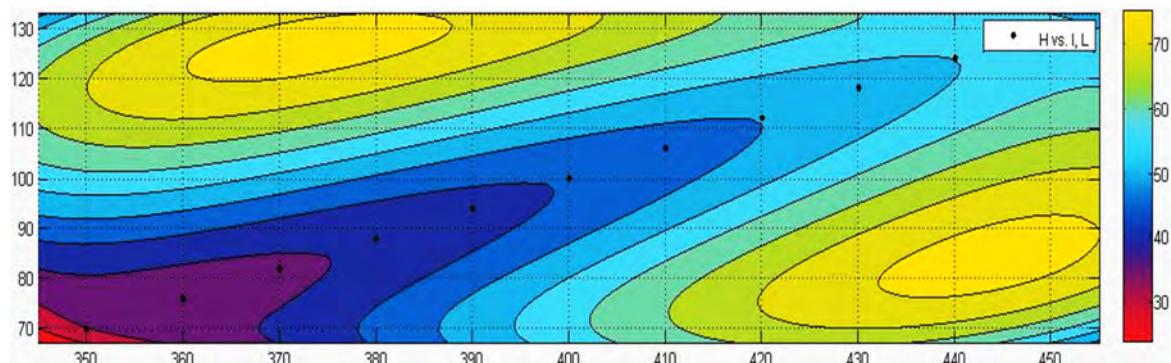


a

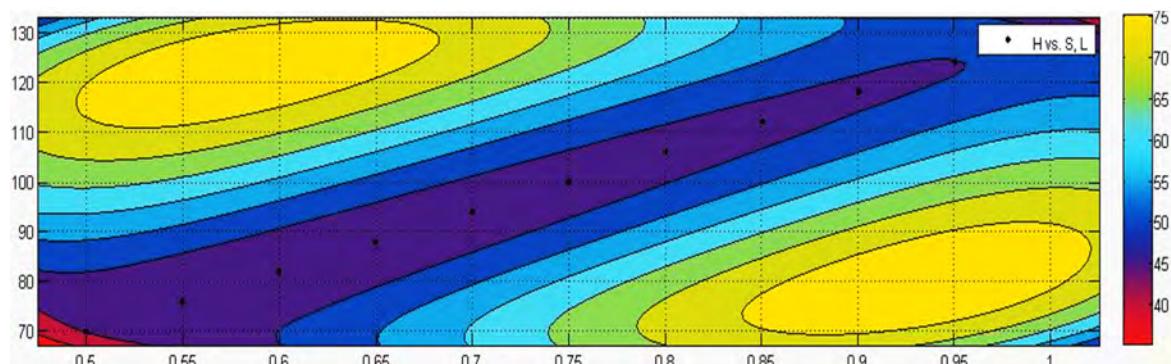


b

Рисунок 1 – Поверхность отклика функций: *a* – $h = f(I, S)$; *b* – $h = f(I, L)$; h – максимальная толщина в пятне распыла, мм; I – сила тока, А; S – суммарный расход газа, г/с; L – дистанция напыления, мм



a



b

Рисунок 2 – Проекции изолиний поверхности отклика функций: *a* – $h = f(I, L)$; *b* – $h = f(S, L)$

Поскольку время нанесения всех покрытий составляло 5 с, то скорость напыления определяется из уравнения (10) с учетом соотношения $V_h = \frac{h}{\tau}$.

В плоскостях большой и малой осей эллипса профиль напыленных слоев с малой погрешностью описывается как нормальным, так и вейбулловским законами распределения, причем их применение находится в прямой зависимости от параметров режима напыления [11, 14].

Наибольшее отклонение от эмпирического распределения толщины получено при использовании логарифмически нормального распределения. Несмотря на то, что вейбулловское распределение наиболее точно отражает характер эмпирической кривой распределения, оно вносит небольшую погрешность при расчете максимальной толщины по сравнению с нормальным законом. Поэтому распределение толщины по пятну напыленного слоя принималось нормально эллиптическим.

Расчет параметров распределения толщины в зависимости от режимов напыления производится по следующим адекватным уравнениям:

$$h_{01} = 13,539 + 0,63x_1 - 3,53x_2 - 2,25x_3 + 2,12x_1^2 + 0,59x_2^2 + 0,63x_3^2 + 0,36x_1x_2 + 0,45x_1x_3; \quad (13)$$

$$S_{11} = 7,816 + 0,12x_1 - 0,28x_2 + 1,25x_3 + 0,24x_1^2 - 0,28x_2^2 - 0,58x_3^2 + 0,14x_1x_3 - 0,12x_2x_3; \quad (14)$$

$$\bar{z}_1 = 22,46 + 1,34x_1 - 0,88x_2 + 2,8x_3 + 2,12x_1^2 - 1,26x_3^2 - 0,54x_1x_2 + 1,85x_1x_3 - 1,61x_2x_3; \quad (15)$$

$$h_{02} = 7,954 + 0,33x_1 - 2,73x_2 - 1,51x_3 + 1,38x_1^2 + 0,63x_2^2 + 0,99x_3^2 + 0,44x_1x_2 + 0,28x_1x_3; \quad (16)$$

$$S_{12} = 5,174 - 0,21x_2 + 1,16x_3 + 0,37x_1^2 + 0,25x_1x_3; \quad (17)$$

$$\bar{z}_2 = 19,02 - 1,57x_2 + 1,96x_3 + 1,96x_1^2 + 0,6x_2^2 - 0,85x_3^2 - 0,19x_1x_2 + 1,37x_1x_3 - 0,64x_2x_3. \quad (18)$$

При движении распылителя в направлении какой-либо из главных осей (z_j ; $i, j = 1, 2$) с постоянной скоростью V и производительностью напыления G_h (г/с) определена максимальная толщина нанесения покрытий:

$$h(z_i) = \frac{\eta G_h}{\sqrt{2\pi} S_{1j} \gamma_h V} \exp\left[-\frac{(z_j - \bar{z}_j)^2}{2S_{1j}^2}\right], \quad (19)$$

в которой значения η , S_{1j} для выбранных режимов напыления подсчитываются по уравнениям (11), (14) или (17), а плотность покрытия γ_h определяется экспериментальным путем. При этом величина оптимального шага t , обеспечивающего получение равномерного по толщине покрытия по всей поверхности изделия, рассчитывается по формуле:

$$t = 1,6952 S_{1j},$$

полученной из соотношения $h(kt) = (kt + 0,5)$, где $k = 2, 3, \dots$ и т.д.

Таким образом, предложенные подходы к моделированию процесса формирования структуры газотермических покрытий, и оценка структурно-функциональных характеристик позволяют целенаправленно их оптимизировать с необходимыми для практики свойствами. Кроме того, появляется возможность формулировать требования к применяемому оборудованию и исследовать его технологические возможности с точки зрения обеспечения заданных характеристик функциональных покрытий.

Выводы:

1. Использование методов планирования активного эксперимента для проведения и обработки результатов позволяет значительно сократить объём экспериментальных работ. При этом обработка результатов экспериментальных исследований по данной методике дает возможность построить математические модели и универсальные статистические характеристики процесса, позволяющие установить закономерности влияния технологических режимов на распределение толщины газотермических покрытий, а также выбрать их оптимальные значения, гарантирующие получение слоев с равномерной толщиной.

2. Проведение исследований в едином технологическом цикле обеспечивает получение параметров распределения максимальной толщины покрытий в зависимости от управляемых режимов их нанесения и тем самым, существенно повышает качество проведения испытаний в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газотермическое напыление: учеб. пособие / кол. авторов; под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
2. Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий: руководство для инженеров. – М.: ООО «Термал–Спрай–Тек», 2009. – 72 с.
3. Солоненко, О.П. Компьютерное проектирование газотермических покрытий из порошков металлов / О.П. Солоненко, В.А. Бледнов, В.И. Иордан // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Том 18. – № 2. – С. 265–283.
4. Кравченко, И.Н. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, А.А. Коломейченко, И.Е. Пупавцев // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агронженерный университет имени В.П. Горячина». – 2015. – № 1. – С. 36–41.
5. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
6. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учебное пособие / А.Ф. Пузряков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
7. Бледнов, В.А. Разработка вычислительной технологии для моделирования формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Бледнов Виталий Александрович. – Новосибирск, 2011.– 212 с.
8. ГОСТ Р 50779.27-2007. Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.
9. Гайдар, С.М. Планирование и анализ эксперимента: учебник / С.М. Гайдар. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 585 с.
10. Пузряков, А.Ф. Исследование свойств плазменных покрытий на основе применения регрессионного анализа / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, А.А. Коломейченко, И.Е. Пупавцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 10. – С. 28–32.
11. Кравченко, И.Н. Оптимизация режимов нанесения многофункциональных покрытий повышенной толщины и прочности / И.Н. Кравченко, Е.В. Панкратова, Е.М. Бобряшов, Е.М. Зубрилина // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2013. – № 3. – С. 43–50.
12. Кравченко, И.Н. Плазменное восстановление и упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин / И.Н. Кравченко, Ю.А. Кузнецов, А.А. Коломейченко // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 10. – С. 27–31.
13. Кравченко, И.Н. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика / И.Н. Кравченко, Е.А. Пучин, А.В. Чепурин [и др.]; под ред. проф. И.Н. Кравченко. – М.: Инфра–М, 2012. – 336 с.
14. Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности: монография / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, И.К. Соколов [и др.]. – М.: Изд–во «Эко–Пресс», 2013. – 300 с.

Кравченко Игорь Николаевич
РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева
доктор технических наук
профессор
Тел.: 8–985–994–02–20
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Коломейченко Анастасия Александровна
РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева
Аспирантка
Тел.: 8 (967) 076–24–36;
E-mail: wolfy666999@mail.ru

Гречко Дмитрий Григорьевич
РГАУ–МСХА им. К.А.
Тимирязева
аспирант
Тел.: 8–918–264–53–26
E-mail: imagrechko@bk.ru

SIMULATION THE FORMATION OF STRUCTURES THERMAL COATINGS

The article describes the statistical methods of constructing mathematical models of the process, based on which the regularities of the influence of technological conditions on the distribution of the thickness of the thermal spray coatings and developed recommendations for choosing their optimal values, guarantee a layer of uniform thickness. An approach to modeling the process of forming the structure of thermal coatings and the results of computational experiments illustrating the operation of the technology optimization.

Keywords: thermal spray technologies, protective coatings, the normal distribution law, the Weibull law, multi-factor Box-Behnken, mathematical modeling, the regression equation, technological process.

BIBLIOGRAPHY

1. Gazotermicheskoye naplyeniye: ucheb. posobiye / kol. avtorov; pod obshchey red. L.KH. Baldayeva. – M.: Market DS, 2007. – 344 s.
2. Prakticheskiye primeneniya gazotermicheskikh tekhnologiy naneseniya zashchitnykh pokrytiy: rukovodstvo dlya inzhenerov. – M.: OOO «Termal-Sprey-Tek», 2009. – 72 s.
3. Solonenko, O.P. Kompyuternoye proyektirovaniye gazotermicheskikh pokrytiy iz poroshkov metallov / O.P. Solonenko, V.A. Blednov, V.I. Iordan // Teplofizika i aeromekhanika. – 2011. – Tom 18. – № 2. – S. 265–283.
4. Kravchenko, I.N. Effektivnyye tekhnologicheskiye metody naneseniya pokrytiy gazoplamennym naplyeniym / I.N. Kravchenko, V.M. Korneyev, A.A. Kolomeychenko, I.Ye. Pupavtsev // Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina». – 2015. – № 1. – S. 36–41.
5. Kudinov, V.V. Naneseniye pokrytiy naplyeniym. Teoriya, tekhnologiya i oborudovaniye / V.V. Kudinov, G.V. Bobrov. – M.: Metallurgiya, 1992. – 432 s.
6. Puzryakov A.F. Teoreticheskiye osnovy tekhnologii plazmennogo naplyeniya: uchebnoye posobiye / A.F. Puzryakov. – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. – 360 s.
7. Blednov, V.A. Razrabotka vychislitelnoy tekhnologii dlya modelirovaniya formirovaniya sloistoy struktury plazmennykh pokrytiy iz poroshkov metallov : diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.13.18 / Blednov Vitaliy Aleksandrovich. – Novosibirsk, 2011.– 212 s.
8. GOST R 50779.27–2007. Statisticheskiye metody. Kriteriy soglasiya i doveritelnyye intervaly dlya raspredeleniya Veybulla. – M.: Standartinform, 2008. – 12 s.
9. Gaydar, S.M. Planirovaniye i analiz eksperimenta: uchebnik / S.M. Gaydar. – M.: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2015. – 585 s.
10. Puzryakov, A.F. Issledovaniye svoystv plazmennykh pokrytiy na osnove primeneniya regressionnogo analiza / A.F. Puzryakov, I.N. Kravchenko, A.A. Kolomeychenko, I.Ye. Pupavtsev // Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya. – 2015. – № 10. – S. 28–32.
11. Kravchenko, I.N. Optimizatsiya rezhimov naneseniya mnogofunktionalnykh pokrytiy povyshennoy tolshchiny i prochnosti / I.N. Kravchenko, Ye.V. Pankratova, Ye.M. Bobryashov, Ye.M. Zubrilina // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. – 2013. – № 3. – S. 43–50.
12. Kravchenko, I.N. Plazmennoye vosstanovleniye i uprochneniye rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh i zemleroynikh mashin / I.N. Kravchenko, YU.A. Kuznetsov, A.A. Kolomeychenko // Tekhnika i oborudovaniye dlya sela. – 2014. – № 10. – S. 27–31.
13. Kravchenko, I.N. Otsenka nadezhnosti mashin i oborudovaniya: teoriya i praktika / I.N. Kravchenko, Ye.A. Puchin, A.V. Chepurin [i dr.]; pod red. prof. I.N. Kravchenko. – M.: Infra-M, 2012. – 336 s.
14. Tekhnologii naneseniya zashchitnykh i iznosostoykikh pokrytiy povyshennoy prochnosti: monografiya / A.F. Puzryakov, I.N. Kravchenko, I.K. Sokolov [i dr.]. – M.: Izd-vo «Eko-Press», 2013. – 300 s.

Kravchenko Igor Nikolayevich
Russian State Agrarian University
– Moscow agricultural Academy
named after Timiryazev
Doctor of Technical Sciences,
Professor
Ph.: 8–985–994–02–20
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Kolomeychenko Anastasiya Aleksandrovna
Russian State Agrarian University –
Moscow agricultural Academy named after
Timiryazev
graduate student
Ph.: 8–967–076–24–36
E-mail: wolfy666999@mail.ru;

Grechko Dmitriy Grigoryevich
Russian State Agrarian
University – Moscow agricultural
Academy named after
Timiryazev
graduate student
Ph.: 8–918–264–53–26
E-mail: dimagrechko@bk.ru

И.А. СЕРЕБРЯНИК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ПОМОЛА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИКИ ДЕФОРМАЦИИ СЛЮДЫ

Рассмотрена специфика механики струйного измельчения. Предложена математическая модель процесса, учитывающая особенности измельчаемого материала с учетом его деформации. Приведены результаты эксперимента струйного измельчения слюды мусковит, подтверждающие справедливость предложенной модели. Проанализированы результаты математического моделирования на предмет возможности расчета основных параметров струйного измельчения с целью повышения производительности и снижения энергоемкости.

Ключевые слова: струйный помол, математическая модель, Марковские цепи, слюда, деформация.

Измельчение – важный процесс в обогащении полезных ископаемых. Оно, как правило, сопряжено с большими затратами энергии. Совершенствование техники и методов измельчения – один из способов снижения энергозатратности. Современная тенденция в области измельчения полезных ископаемых – получение тонких порошков. Именно она делает моделирование обогатительных процессов востребованным и актуальным. К тому же метод математического моделирования позволяет усовершенствовать процессы без значительных финансовых затрат.

Сегодня нельзя говорить о том, что тематика разработки моделей обогатительных процессов достаточно проработана. За рубежом исследований в этой области несколько больше, чем в России. Все вышесказанное делает тему моделирования процессов измельчения, а также классификации крайне актуальной и востребованной, особенно в контексте необходимости развития промышленного производства в стране.

Разработка математической модели измельчения, в конечном счете, позволит изменять технологические параметры процесса, конструктивно изменять оборудование, повышая его эффективность и снижая энергозатратность. Объектом исследования выступит струйный помол слюды. Автор выбрал в качестве схемы моделирования на основе Марковских цепей. Аппарат Марковских цепей является оптимальным для моделирования струйного помола, в силу того, что метод Марковских цепей наиболее полно отражает особенности случайных процессов, к которым относят измельчение. Марковские цепи являются адекватным и эффективным средством с минимально–необходимой размерностью. По данным исследования автором опубликовано более 10 научных работ.

Установка струйного помола – это целый комплекс агрегатов, позволяющих получить материал заданной крупности за счет энергии газов или пара. Стандартная схема воздухоструйной мельнице приведена на рисунке 1 [1].

Технология струйного помола совершенствуется с момента первых разработок в этой области. Можно выделить два пути оптимизации – повышение производительности и снижение энергозатратности.

При измельчении слюды в зависимости от применяемого аппарата измельчения получают смесь, состоящую из пластинок, обладающих различной степенью повреждаемости или дефектности внешней поверхности, т.е. различный по качеству продукт. При струйном помоле частицы слюды получают меньшую деформацию и их конечная форма представлена неправильным многоугольником.

Известно, что для каждого материала есть свой оптимальный вид помола, который позволяет учитывать его особенности. Если мы говорим о слюде, то основным критерием качества данного материала выступает коэффициент полезной площади пластины и ее

Моделирование технологических процессов

дефектность. У мусковита струйного помола данный коэффициент самый высокий^[3], С.153]. Для большого числа конечных продуктов применение слюды струйного помола будет вполне целесообразно [5].

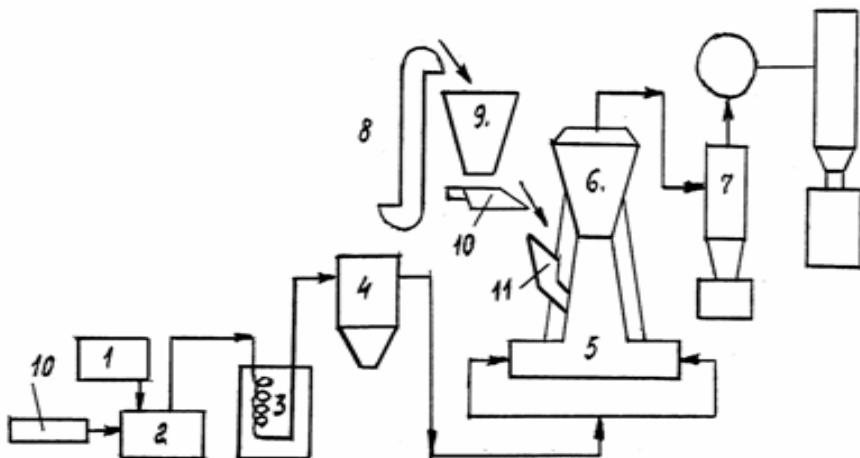


Рисунок 1 – Схема установки воздухоструйной мельницы:

1 – масляной фильтр; 2 – компрессор; 3 – холодильник; 4 – Фильтр; 5 – камера измельчения; 6 – классификатор; 7 – циклон; 8 – элеватор; 9 – приемный бункер; 10 – вибропитатель; 11 – труба подсоса

Струйный вид помола сочетает в себе, как ударное измельчение, так и истирание. Измельчение проходит в нижней части мельницы, где находится так называемый «кипящий» (псевдоожженный) слой. Следовательно, представляется интересным разработать модель именно для истирания материала в «кипящем» слое мельницы.

Процесс истирания представим Марковским процессом. Его описанием будет служить матрица вероятностей переходов P , где p_{ij} ($i,j=1,n$) – вероятность частиц класса j при разрушении перейти в класс i . Каждый элемент матрицы – вероятность перехода из заданного состояния к следующему состоянию. Матрица вероятностей переходов выглядит так:

$$P = \{P_{i,j}\} = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & p_{n-1,n-1} & 0 \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{n,n-1} & p_{nn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

где частица j -го класса может с вероятностью p_{jj} остаться в своем классе ($i=j$); частица j -го класса может с вероятностью $p_{j+1,j}$ перейти в соседний более мелкий класс ($i=j+1$); частица j -го класса может с вероятностью p_{nj} перейти в самый мелкий класс ($i=n$).

Суммарная вероятность группы событий равна единице. Гранулометрический состав материала после истирания в «кипящем» слое определяется как произведение матрицы вероятностей переходов (1) на вектор исходного состояния F' (2)

$$F'' = P \cdot F' \quad (2)$$

где F' , F'' – вектор гранулометрического состава порошка до, а также после процесса истирания;

P – матрица вероятностей переходов

Следовательно, после любого акта разрушения можно рассчитать гранулометрический состав порошка.

Селективная функция $S(x)$ позволит определить долю разрушившихся частиц материала при однократном погружении. Она представляет собой вероятность разрушения частиц за время Δt ($P_{jj}=1-S_j$).

Селективная функция также может быть представлена в виде степенной зависимости от размера частицы (3).

$$S = \alpha \delta^k \quad (3)$$

где α – коэффициент пропорциональности;

δ – размер частицы;

k – коэффициент селективной функции.

В случае тонкого помола может быть использован закон измельчения Бонда, согласно которому $k=0,5$ [4, С.52].

Для определения вероятности переходов автор использовал модель формы частиц. Существует игольчатая модель – для частиц, которые имеют форму кристалла, а также пространственная – для частиц с произвольной пространственной формой кристалла.

Во время истирания частиц игольчатой формы происходит откалывание зерен минимального размера δ_n . При такой схеме разрушения отношение массовых долей или вероятностей переходов частиц в классы n и $(j+1)$ можно найти как отношение размеров соответствующих частиц (4):

$$\frac{P_{j+1,j}}{P_{n,j}} = \frac{\delta_{j+1}}{\delta_n} \quad (4)$$

Для частиц произвольной формы отношение вероятностей выражается как отношение массовых долей или вероятностей переходов частиц в классы n и $(j+1)$ к соответствующим размерам зерен в степени k (5):

$$\frac{P_{j+1,j}}{P_{n,j}} = \left(\frac{\delta_{j+1}}{\delta_n} \right)^k \quad (5)$$

Эксперимент подтвердил правильность разработанной модели. Использовалась лабораторная установка струйного помола. Данные по гранулометрическому составу представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав пробы мусковита до измельчения.

Класс крупности, мм.	Средний размер частиц, мм.	Масса, г	Масса, %
+0,63	0,63	140	68,78593
-0,63+0,4	0,5	50	24,5664
-0,4+0,315	0,317	6,4	3,1445
-0,315+0,2	0,25	2,25	1,105488
-0,2+0,1	0,15	4,75	2,333808
-0,1+0,063	0,08	0,1	0,049133
-0,063+0,05	0,056	0,02	0,009827
-0,05+0	0,025	0,01	0,004913
Всего:		203,53	

Значение $S(x)$ для самой крупной фракции слюды мусковит (0,63 мм.) в ансамбле по эмпирическим данным равно 0,687%. Следовательно, значение коэффициента пропорциональности равно 0,866. Зная значение коэффициента пропорциональности, представляется возможным определить значение селективной функции для всех фракций слюды мусковит в ансамбле, используя формулу (3).

Вероятность каждой из фракций оставаться неизмельченной (P_{jj}) по формуле полной вероятности равна $1-S_j$. Характер селективной функции отображен графически (рисунок 2).

P_{ij} (вероятность переходов из фракции во фракцию) и вероятность перехода фракций в последний класс гранулометрического состава (мелочь) определяется по следующей формуле:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 - S_j, i = 1 \\ \frac{S_j \delta_{j+1}^k}{\delta_{j+1}^k + \delta_n^k}, i = j+1 \\ \frac{S_j \delta_n^k}{\delta_{j+1}^k + \delta_n^k}, i = n \\ 0, i \neq j, j+1, n \end{cases} \quad (7)$$

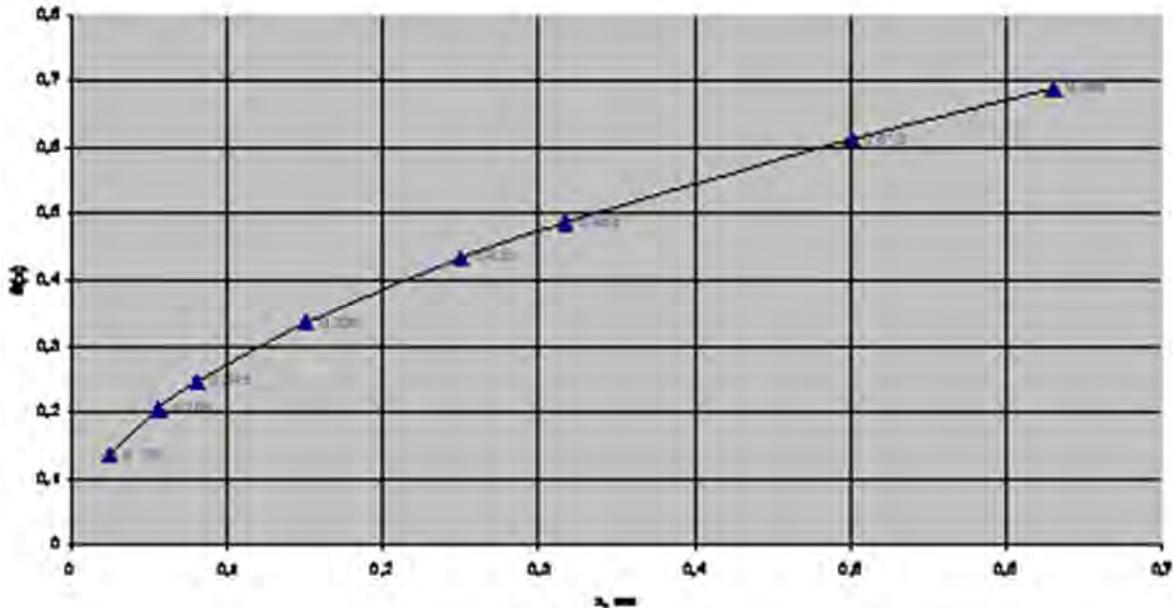


Рисунок 2 – Характер $S(x)$ по закону Бонда

Полученные результаты расчетов сведены в конечную матрицу вероятностей переходов:

0,312141	0	0	0	0	0	0	0
0,562157	0,387206	0	0	0	0	0	0
0	0,478435	0,51206859	0	0	0	0	0
0	0	0,37070439	0,56668956	0	0	0	0
0	0	0	0,30769463	0,66435918	0	0	0
0	0	0	0	0,21529004	0,754882599	0	0
0	0	0	0	0	0,14693939	0,794920069	0
0,125702	0,134358	0,11722702	0,12561581	0,12035079	0,09817801	0,205079931	1

События образовали полную группу, вероятность их равна единице. Для наглядности изобразим процесс в виде графа вероятностей переходов из одного состояния в другое (рисунок 3).

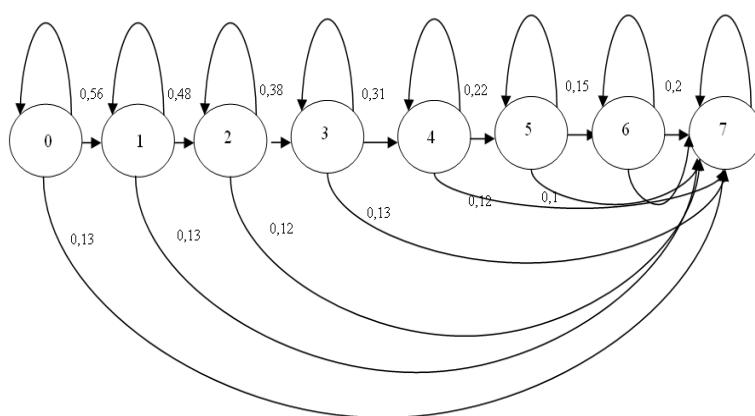


Рисунок 3 – Граф вероятностей переходов состояний системы

Были построены следующие графические зависимости (рисунок 4.).

Анализируя графические зависимости, можно определить:

1. время перехода в каждое из состояний системы;
2. время пребывания системы в каждом из состояний;
3. размер частиц гранулометрического состава, находящихся в каждом из состояний системы.

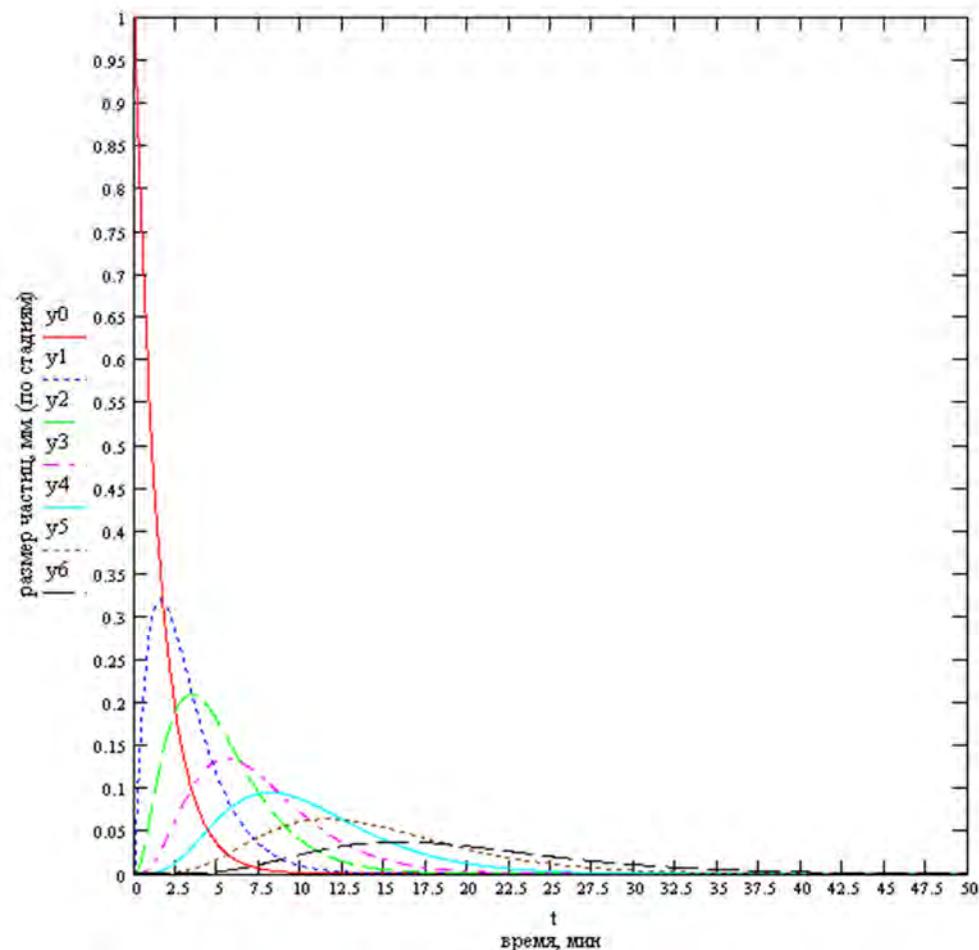


Рисунок 4 – Динамика переходов состояний системы (измельчение) в зависимости от времени

Разработанная математическая модель позволила определить методику расчета основных параметров струйного помола, среди которых:

1. время окончания процесса измельчения;
2. размер гранулометрического состава материала на каждом этапе измельчения;
3. необходимое время для получения измельчаемого материала заданной крупности.

Данная методика была внедрена на ООО «Нижнеудинская слюдинитовая фабрика». Благодаря использованию данной методики удается достичь сокращения времени помола слюды мусковит, используемой при производстве микалекса, и добиться снижения энергоемкости процесса. Материал, подаваемый в струйную мельницу, не переизмельчается, так как появляется возможность достаточно точно определить через какой временной промежуток доля требуемого гранулометрического состава будет максимальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акунов, В.И. Струйное измельчение горных пород / В.И. Акунов // Горный журнал. – 1985. – № 4. – С. 35–38.

Моделирование технологических процессов

2. Байбородин, Б.А. Псевдоожженый (кипящий) слой струйной мельницы / Б.А. Байбородин, С.В. Федорова, И.А. Серебряник // Материалы научно–практической конференции «Технико–экономические проблемы развития регионов». – Иркутск: изд–во ИрГТУ. – 2005. – С. 81–83.
3. Серебряник, И.А. Слюдя как измельчаемый материал / И.А. Серебряник // Обогащение руд. Материалы Всероссийской школы–семинара молодых ученых «Современные методы переработки минерального сырья». Иркутск: Изд–во ИрГТУ. – 2004. – С. 155–160.
4. Серебряник, И.А. Моделирование и оптимизация процессов измельчения и классификации слюдяного сырья / И.А. Серебряник // Theoretical & Applied Science. – 2015. – № 5(25). – С. 50–53.
5. Серебряник, И.А. Слюдя: основные характеристики помола / И.А. Серебряник, А.В. Дружинина // Theoretical & Applied Science. – 2015. – № 5(25). – С. 9–13.

Серебряник Инна Александровна

Иркутский национальный исследовательский
технический университет, г.Иркутск
Кандидат технических наук, доцент кафедры экономики
E-mail: nasamolet@yandex.ru

I.A. SEREBRYANIK

MODELING OF JET GRINDING WITH REGARD FEATURES MECHANICAL STRAIN MICA

Describes the features of mechanics of jet milling. Given the mathematical model of the process, taking into account the features of crushed material taking into account its deformation. The experimental results of Muscovite micas jet milling confirming the validity of the proposed model. We analyzed the results of mathematical modeling for the possibility of calculating the basic parameters of jet milling with the aim of increasing productivity and reducing energy intensity.

Keywords: jet milling, mathematical model, Markov chain, mica, deformation.

BIBLIOGRAPHY

1. Akunov, V.I. Struynoye izmelcheniye gornykh porod / V.I. Akunov // Gornyy zhurnal. – 1985. – № 4. – S. 35–38.
2. Bayborodin, B.A. Psevdoozhizhennyj (kiyashchiy) sloy struynoy melnitsy / B.A. Bayborodin, S.V. Fedorova, I.A. Serebryanik // Materialy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Tehniko–ekonomicheskiye problemy razvitiya regionov». – Irkutsk: izd–vo IrGTU. – 2005. – S. 81–83.
3. Serebryanik, I.A. Slyuda kak izmelchayemyy material / I.A. Serebryanik // Obogashcheniye rud. Materialy Vserossiyskoy shkoly–seminara molodykh uchenykh «Sovremennyye metody pererabotki mineralnogo syrya». Irkutsk: Izd–vo IrGTU. – 2004. – S. 155–160.
4. Serebryanik, I.A. Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov izmeleniya i klassifikatsii slyudyanogo syrya / I.A. Serebryanik // Theoretical & Applied Science. – 2015. – № 5(25). – S. 50–53.
5. Serebryanik, I.A. Slyuda: osnovnyye kharakteristiki pomola / I.A. Serebryanik, A.V. Druzhinina // Theoretical & Applied Science. – 2015. – № 5(25). – S. 9–13.

Serebryanik Inna Aleksandrovna

National Research Irkutsk
Technical University, Irkutsk
Ph.D., assistant professor of economics
E-mail: nasamolet@yandex.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 622.23.05

В.Е. КЛИМОВ, Л.С. УШАКОВ

РАЗРАБОТКА И ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЖАТЕЛЯ ДЛЯ УДАРНО-СКАЛЫВАЮЩЕГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ОРГАНА ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА

В статье представлена конструкция держателя для ударно-скалывающего многоцелевого рабочего органа экскаватора-погрузчика. Произведен прочностной анализ конструкции с учетом основных нагрузок, действующих на инструмент и машину, при помощи комплекса САПР для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической разработки проекта. В результате расчетов выявлены основные нагрузки и деформации, подобрано сечение и материал держателя.

Ключевые слова: гидроударник, держатель, моделирование, ударно-скалывающий многоцелевой орган, прочностной расчет.

Темпы и качество строительных работ, производительность и условия труда неразрывно связаны с созданием новых эффективных средств механизации и совершенствованием технологических процессов. К таким процессам следует отнести разработку мерзлых и прочных грунтов, разрушение асфальтобетонных и бетонных покрытий, горных пород и полезных ископаемых.

В городских условиях с компактными строительными площадками, экскаватор–погрузчик стал наиболее востребованной техникой, используемой в указанных областях. Мобильность в передвижении, многофункциональность в использовании, превращают экскаватор–погрузчик в фаворита строительной техники. Увеличение объемов работ в дорожном строительстве, увеличение работ по строительству городской инфраструктуры и ремонту тепловых сетей, кабельных коммуникаций в стесненных городских условиях, а также, увеличение объемов коттеджного строительства, привело к увеличению спроса на универсальные многофункциональные машины, которые одновременно совмещают функции нескольких машин – это все современный экскаватор–погрузчик.

Основной причиной быстрого распространения машин, применяющих гидроударники в качестве рабочего инструмента является их бесспорное преимущество перед другими способами разрушения горных пород и строительных конструкций: с использованием тяжелых металлических шаров, пневматических ударников, взрывчатых веществ. Еще одним фактором, способствующим быстрому распространению гидроударников в горном деле и строительстве является рост количества техники с гидравлическим приводом в первую очередь – гидравлических экскаваторов.

Технический прогресс в области создания новых машин и механизмов для перечисленных видов работ имеет выраженную направленность в повышении эффективности воздействия инструмента на обрабатываемую среду путем применения гидроударников в качестве рабочих органов дорожно–строительных машин.

Большое внимание уделяется как созданию новых видов оборудования, внедрению современных технологий, так и совершенствованию существующих решений и исследований по повышению эффективности работы гидропневматической силовой импульсной системы СДМ для реализации поставленных задач. В большинстве случаев модернизация существующей техники и оборудования экономически выгоднее создания нового оборудования ввиду того, что обновлению обычно подлежат несколько узлов и агрегатов, а не вся конструкция.

Изложенное выше определяет актуальность темы научной работы, направленной на разработку и прочностной расчет конструкции держателя для ударно-скалывающего многоцелевого рабочего органа экскаватора–погрузчика. За основу такого органа взят гидроударник модульный «Орлик–1» (ГМо–1), созданный в ПНИЛ «Импульсные технологии» ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК.

Данный вид ударника разрабатывался для применения в городском коммунальном хозяйстве, например для разрушения мерзлых и известняковых грунтов, вскрытия асфальтобетонных покрытий с целью получения доступа к инженерным коммуникациям (тепловым магистралям, газопроводам трубопроводам телефонных и силовых кабелей и т.д.), уплотнение рыхлого грунта (при использовании сменного инструмента – трамбовка). В металлургии в литьевых и плавильных цехах возможно использование для очистки и удаления шлака с литьевых сосудов. Во многих случаях облегчит поставленные задачи для прокладки трубопроводов, рытья траншей в твердых грунтах, содержащих скальные породы, а также для нужд армии и МЧС.

Гидроударник может найти применение на тракторах класса 0,9 и 1,4 для строительно–дорожных работ, на комбайнах для расширения и ремонта горных выработок, на машинах для оборки кровли горных выработок, имеющих массу не менее 3 т и стрелу (манипулятор), воспринимающих силу воздействия до 1500 Н.

Для выявления возможности установки гидроударника ГМо–1М (рисунок 1) на базовую машину экскаватор–погрузчик были поставлены и решены задачи, часть которых представлена в данной статье. Первый этап включал обзор и анализ гидроударника ГМо–1, его конструкции и принципиальной схемы работы. Далее производился расчет гидросистемы и подбор насоса для работы ГМо–1М в составе базовой машины (таблица 1). На следующем этапе установлен способ крепления ГМо–1М к базовой машине. После чего выполнена разработка, моделирование и прочностной расчет конструкции держателя (корпуса) ГМо–1М.

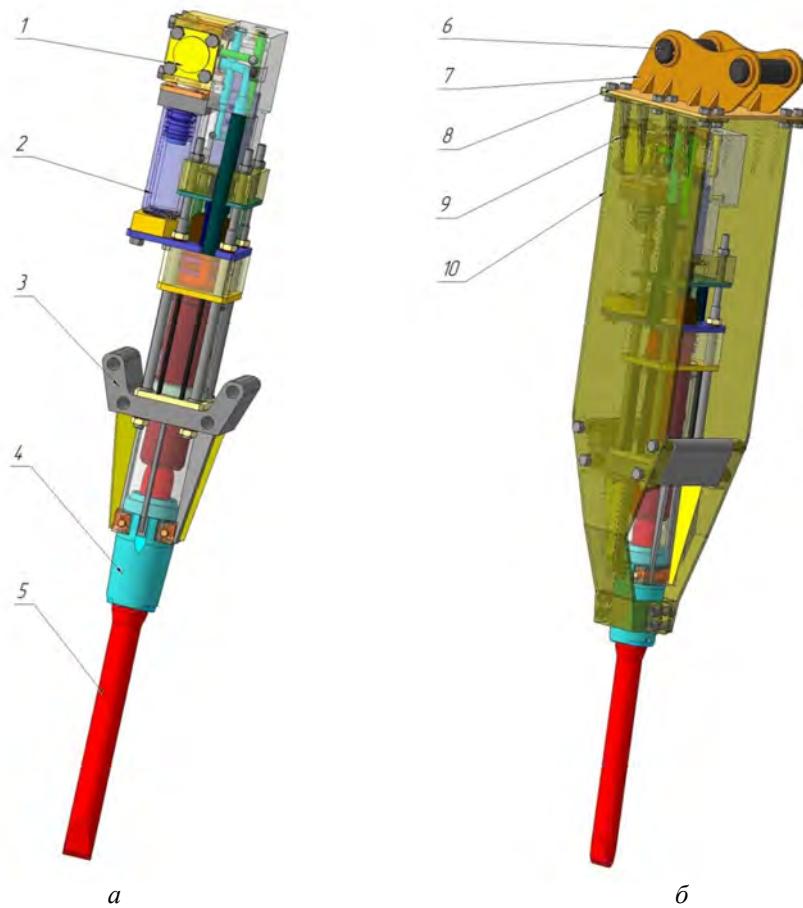


Рисунок 1 – Общий вид конструкции гидроударника ГМо–1М:
а – гидроударник ГМо–1М, б – гидроударник ГМо–1М в корпусе; 1 – распределитель, 2 – аккумулятор, 3 – крепежная плита, 4 – направляющая втулка, 5 – инструмент, 6 – палец держателя, 7 – крепеж держателя, 8 – крепежный элемент (болт, гайка), 9 – ребра жесткости, 10 – пластина держателя.

В ходе выполнения анализа существующих компонентов корпусов и держателей, а также методов креплений были выявлены определенные закономерности в конструкции и типовые модели на базе которых, методом аналогии, производилось моделирование данного держателя.

Кинематический анализ расчетной схемы конструкции корпуса держателя сводиться к разбиению её на стержни и поиску напряжений, осевых моментов и условий прочности.

Расчет на прочность можно выполнить несколькими методами. Суть первого состоит в разбиении металлоконструкции на стержни, нахождении усилий в них, подборе материала и поперечного сечения конструкции. Расчет по второму методу заключается в моделировании металлоконструкции при помощи комплексов САПР для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической разработки проекта.

Таблица 1– Основные параметры и размеры ГМо–1М.

Наименование параметра и размера	Единицы измерения	Значение (норма)
Энергия единичного удара при давлении в гидросистеме $P_H = 16 \text{ МПа}$	Дж	1550_{-140}
Частота ударов при расходе рабочей жидкости $0,0016 \text{ м}^3/\text{с}$	1/с	4
Рабочее давление жидкости в напорной магистрали	МПа	16,0
Сила воздействия гидроударника на базовую машину при давлении 16 МПа	кН	2,5
Ход бойка	мм	80
Ход инструмента	мм	70
Вылет инструмента из корпуса, не более	мм	500
Габариты:	мм	
длина без инструмента		1070
ширина		240
высота		270
Масса с инструментом, не более	кг	190

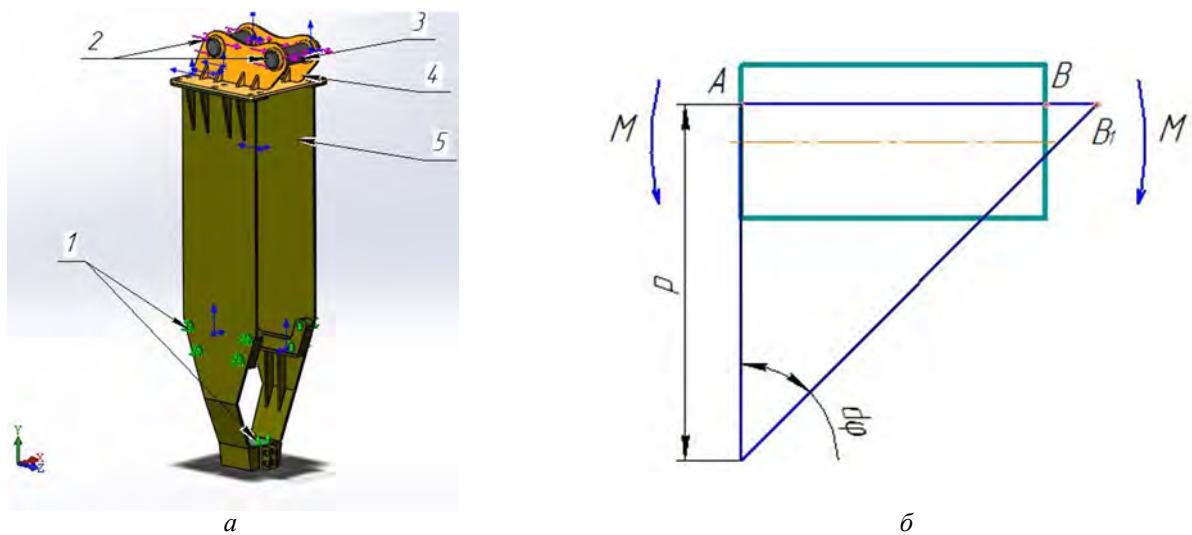


Рисунок 2–Расчетная модель конструкции держателя гидроударника ГМо–1М:
а – трехмерная модель, б – расчетная схема; 1 – крепление (фиксированный шарнир), 2 – приложенная нагрузка, 3 – палец, 4 – крепеж верхний, 5 – пластина держателя

Представим пластину 5 (рисунок 2, а) в виде стержня (рисунок 2, б), тогда на нее действует изгибающий момент M :

$$M = \frac{EY_x}{\rho},$$

где EY_x – жесткость стержня при изгибе;
 ρ – радиус кривизны.

Нормальные напряжения при изгибе:

$$\sigma = \frac{M_x y}{Y_x},$$

где Y_x – осевой момент инерции;
 y – расстояние от нейтральной линии.

Осевой момент сопротивлению сечению:

$$W_x = \frac{Y_x}{y_{\max}}$$

Условие прочности при изгибе:

$$\delta = \frac{M_x}{W_x} \leq [\delta]$$

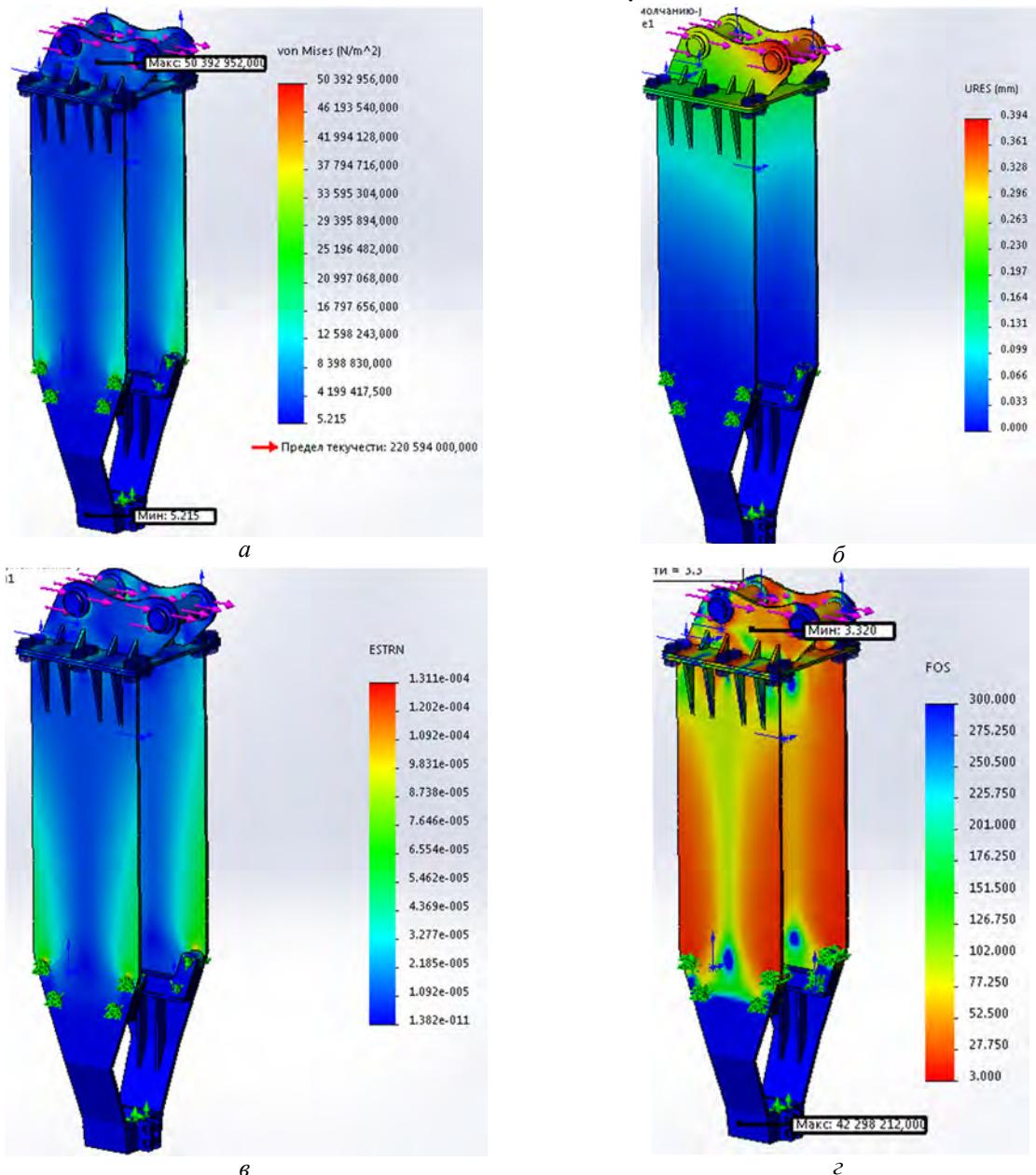


Рисунок 3 – Результаты нагрузения
а – напряжение, б – перемещение, в – деформации, г – коэффициент запаса по прочности

Для выявления возможности установки и дальнейшей эксплуатации дополнительного навесного оборудования выполнен прочностной анализ конструкции при помощи комплекса САПР для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической разработки проекта.

Данная конструкция была смоделирована и посчитана с помощью программ Компас-3D и SolidWorks simulation.

Основные нагрузки на компоненты были взяты из технических условий, распространяющихся на гидроударник модульный «Орлик – 1» (ГМо-1) и приложены к осям (пальцам) (рисунок 3, позиция 3).

Для исследования возможных отклонений от требуемых параметров держателя выполняется статический анализ модели. Для моделирования приближенных к реальности условий в автоматизированном комплексе САПР SolidWorks simulation устанавливаются некоторые параметры:

- материал – для всех компонентов: углеродистая сталь (предел текучести 220 594 000 Н/м²);
- соединения – жесткая связь устанавливается в месте креплений компонентов друг к другу разъемными соединениями (болт, гайка) (рисунок 1 позиция 8), так же определяется вид контакта между всеми компонентами – без проникновения, в том случае если детали никак не связаны друг с другом (сварка, склейка, посадка и т.д.);
- крепления – зафиксированный шарнир в местах креплений корпуса (держателя) к гидроударнику (рисунок 2 позиция 1), ограничивает все передвижения, кроме вращения вокруг собственной оси;
- внешняя нагрузка – установлена в виде направленной силы (2500 Н) (рисунок 2 позиция 2).

После установки всех параметров и ограничений производится исследование модели и анализ результатов.

В результате моделирования с использованием автоматизированного комплекса САПР была разработана конструкция корпуса (держателя) гидроударника ГМо–1М. Компоненты изготавливается из углеродистой стали 40, максимальные напряжения составили $50,4 \cdot 10^6$ Н/м², максимальные перемещения – 0,4 мм, минимальный коэффициент запаса по прочности – 3,32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоберман, Л.А. Строительные и дорожные машины. Атлас конструкций: учеб.пособие для машиностроительных техникумов / Л.А. Гоберман, К.В. Степанян. – М.: Машиностроение, 1985. – 96с.
2. Ушаков, Л.С. Импульсные технологии и гидравлические ударные механизмы: учебное пособие для вузов / Л.С. Ушаков. – Орел: Орел–ГТУ, 2009. – 250 с.
3. Ушаков, Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, В.А. Кравченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.
4. Александров, Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 202 с.
5. Алексеева, Т.В. Гидропровод и гидроавтоматика землеройно–транспортных машин / Т.В. Алексеева. – М.: Машиностроение, 1966. – 147с.
6. Беляев, М.А. Навесное оборудование для уплотнения грунтов в стесненных условиях / М.А. Беляев, Ю.Е. Пономаренко // Изв. вузов. Горный журнал. – 1993. – № 9. – С. 46–49.
7. Горбунов, В.Ф. Импульсный гидропривод горных машин / В.Ф. Горбунов, А.Г. Лазуткин, Л.С. Ушаков; отв. ред. д–р техн. наук проф. М.С. Сафонин. – Новосибирск: Наука СО, 1986. – 198 с.
8. Лобанов, Д.П. Машины ударного действия для разрушения горных пород / Д.П. Лобанов, В.Б. Горовиц, Е.Г. Фонберштейн и др. – М.: Недра, 1983. – 152 с.
9. Волков, Д.П. Строительные машины: учеб.для вузов / Д.П. Волков, Н.И. Алешин, В.Я. Крикун, О.Е. Рынков. под.ред. Д.П. Волкова. – М.: Высш. школа, 1988. – 319 с.
10. Андреев, Л.Н. Системы автоматизированного проектирования: учеб.пособ. для вузов / Л.Н. Андреев, Д.Е. Бортиков, С.В. Мещеряков. – СПб: Изд–во СПбГТУ, 2002. – 76 с.
11. Соколов, С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учеб.пособ. для вузов / С.А. Соколов. – СПб.: Политехника, 2011. – 450 с.
12. Рыжков, Н.И. Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении. Организация и технология: учеб.для вузов / Н.И. Рыжков. 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
13. Пешковский, О.И. Сборка металлических конструкций: учеб. для вузов / О.И. Пешковский, В.Б. Якубовский. 3–е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
14. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций: учеб.пособ. для вузов / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.
15. Добронравов, С.С. Строительные машины и оборудование: Справочник для вузов и инж. – техн. Работников / С.С. Добронравов. – М.: Высшая школа, 1991. – 536 с.
16. Брауде, В.И. Надежность подъемно–транспортных машин: учеб. для вузов / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 183 с.
17. Соколов, С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учеб.пособ. для вузов / С.А. Соколов. – СПб.: Политехника, 2011. – 450 с.
18. Металлические конструкции. В 3–х т. Т. 1. Элементы конструкций: учеб.пособ. для вузов / В.В. Горев., Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В. Горева. – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 551 с.
19. Хархута Н.Я. и др. Дорожные машины (теория, конструкция расчет): учеб.для вузов / Н.Я. Хархута. – Л., «Машиностроение», 1968. – 245 с.

Ушаков Леонид СеменовичФГБОУ ВО Приокский государственный университет
Доктор технических наук, профессор
302020, Россия, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29
E-mail: dtk3333@mail.ru**Климов Валерий Евгеньевич**ФГБОУ ВО Приокский государственный университет
Студент
302020, Россия, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29
E-mail: dtk3333@mail.ru

V.E. KLIMOV, L.S. USHAKOV

DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF MOUNT STRENGTH CALCULATIONS FOR IMPACT SHEAR MULTI-BODY BACKHOE LOADER

The article presents the design of the mount for the shock-shear multi-purpose working body of the backhoe loader. Produced strength analysis designs taking into account the main loads acting on the tool and machine, using complex CAD software to automate the work at the stages of design and technological development of the project. The calculations revealed the basic load and deformation, selected cross-section and the material of the holder.

Keywords: hydraulic hammer holder, modeling, impact-shear multipurpose body strength calculation.

BIBLIOGRAPHY

1. Goberman, L.A. Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny. Atlas konstruktsiy: ucheb.posobiye dlya mashinostroyitelnykh tekhnikumov / L.A. Goberman, K.V. Stepanyan. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 96s.
2. Ushakov, L.S. Impulsnyye tekhnologii i gidravlicheskiye udarnyye mekhanizmy: uchebnoye posobiye dlya vuzov / L.S. Ushakov. – Orel: Orel-GTU, 2009. – 250 s.
3. Ushakov, L.S. Gidravlicheskiye mashiny udarnogo deystviya / L.S. Ushakov, YU.Ye. Kotylev, V.A. Kravchenko. – M.: Mashinostroyeniye, 2000. – 416 s.
4. Aleksandrov, Ye.V. Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem / Ye.V. Aleksandrov, V.B. Sokolinskiy. – M.: Nauka, 1969. – 202 s.
5. Alekseyeva, T.V. Gidroprovod i gidroavtomatika zemleroyno-transportnykh mashin / T.V. Alekseyeva. – M.: Mashinostroyeniye, 1966. – 147s.
6. Belyayev, M.A. Navesnoye oborudovaniye dlya uplotneniya gruntov v stesnennykh uslovayakh / M.A. Belyayev, YU.Ye. Ponomarenko // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. – 1993. – № 9. – S. 46–49.
7. Gorbunov, V.F. Impulsnyy gidroprivod gornykh mashin / V.F. Gorbunov, A.G. Lazutkin, L.S. Ushakov; otv. red. d-r tekhn. nauk prof. M.S. Safokhin. – Novosibirsk: Nauka SO, 1986. – 198 s.
8. Lobanov, D.P. Mashiny udarnogo deystviya dlya razrusheniya gornykh porod / D.P. Lobanov, V.B. Gorovits, Ye.G. Fonbershteyn i dr. – M.: Nedra, 1983. – 152 s.
9. Volkov, D.P. Stroitelnyye mashiny: ucheb.dlya vuzov / D.P. Volkov, N.I. Aleshin, V.YA, Krikun, O.Ye. Rynskov. pod.red. D.P. Volkova. – M.: Vyssh. shkola, 1988. – 319 s.
10. Andreyev, L.N. Sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya: ucheb.posob. dlya vuzov / L.N. Andreyev, D.Ye. Bortyakov, S.V. Meshcheryakov. – SPb: Izd-vo SPbGTU, 2002. – 76 s.
11. Sokolov, S.A. Stroitelnaya mekhanika i metallicheskkiye konstruktsii mashin: ucheb.posob. dlya vuzov / S.A. Sokolov. – SPb.: Politekhnika, 2011. – 450 s.
12. Ryzhkov, N.I. Proizvodstvo svarynykh konstruktsiy v tyazhelom mashinostroyenii. Organizatsiya i tekhnologiya: ucheb.dlya vuzov / N.I. Ryzhkov. 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 375 s.
13. Peshkovskiy, O.I. Sborka metallicheskikh konstruktsiy: ucheb. dlya vuzov / O.I. Peshkovskiy, V.B. Yakubovskiy. 3-ye izd., pererab.i dop. – M.: Vysshaya shkola, 1989. – 239 s.
14. Nikolayev, G.A. Svarkyye konstruktsii. Tekhnologiya izgotovleniya. Avtomatzatsiya proizvodstva i proyektirovaniye svarynykh konstruktsiy: ucheb.posob. dlya vuzov / G.A. Nikolayev, S.A. Kurkin, V.A. Vinokurov. – M.: Vysshaya shkola, 1983. – 344 s.
15. Dobronravov, S.S. Stroitelnyye mashiny i oborudovaniye: Spravochnik dlya vuzov i inzh. – tekhn. Rabotnikov / S.S. Dobronravov. – M.: Vysshaya shkola, 1991. – 536 s.
16. Braude, V.I. Nadezhnost pod'yemno-transportnykh mashin: ucheb. dlya vuzov /V.I. Braude, L.N. Semenov. – L.: Mashinostroyeniye, 1986. – 183 s.
17. Sokolov, S.A. Stroitelnaya mekhanika i metallicheskkiye konstruktsii mashin: ucheb.posob. dlya vuzov / S.A. Sokolov. – SPb.: Politekhnika, 2011. – 450 s.
18. Metallicheskkiye konstruktsii. V 3-kh t. T. 1. Elementy konstruktsiy: ucheb.posob. dlya vuzov / V.V. Gorev., B.YU. Uvarov, V.V. Filippov i dr.; Pod red. V.V. Goreva. – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Vysshaya shkola, 2001. – 551 s.
19. Kharkhuta N.YA. i dr. Dorozhnyye mashiny (teoriya, konstruktsiya raschet): ucheb.dlya vuzov / N.YA. Kharkhuta. – L., «Mashinostroyeniye», 1968. – 245 s.

Ushakov Leonid SemenovichPrioksky State University
Doctor of Technical Sciences, Professor
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
E-mail: dtk3333@mail.ru**Klimov Valeriy Evgenievich**Prioksky State University
Student
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
E-mail: dtk3333@mail.ru

К.А. ВОЛОБУЕВ

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КРИВОШИПНЫМ ПРЕССОМ

Рассмотрена конструкция кривошипного пресса и имеющиеся системы его управления. Приведена схема кривошипного пресса с адаптивной системой управления на базе частотного преобразователя. Описан разработанный алгоритм работы адаптивной системы управления, позволяющий посредством установки оптимальных параметров технологического процесса под различные материалы и формы заготовок, экономить потребляемую энергию, продлевать срок работоспособности пресса, а также с заданной точностью контролировать весь процесс изготовления.

Ключевые слова: кривошипный пресс, адаптивная система правления, алгоритм.

Одной из наиболее острых проблем машиностроения в целом, так и ее автоматизации [1] в частности, является проблема энергосбережения и энергоэффективности. Современные механизмы и машины создаются исходя принципов максимальной производительности при минимальных энергозатратах. Однако, машины более раннего поколения все еще пригодны для использования, т.к. их механические составляющие обладают высокой прочностью и значительным временем наработки до отказа. Наглядным примером данного факта являются кривошипные прессы, как самые распространенные штамповочное оборудование.

Конструкция кривошипного пресса такова, что основным ее элементом является маховик, который за счет накопления и расхода кинетической энергии E_k совершает полезную работу, необходимую для процесса штамповки. [2] Однако, доля энергии расходующейся на совершение операции составляет не более 30%, остальная часть энергии необходима для поддержания частоты вращения привода. В случае, если привод маховика значительно замедлит свое вращение высок риск перегрева и выхода из строя асинхронного двигателя, который приводит весь привод пресса в действие.

Исходя из формулы кинетической энергии вращательного тела:

$$E_k = \frac{I_z \omega^2}{2}, \text{ Дж},$$

где I_z , кг \times м² – момент инерции маховика,

ω , рад/с – угловая скорость вращения маховика, энергию можно изменить путем изменения двух перечисленных составляющих.

Рассмотрим вариант изменения момента инерции маховика. Формула момента инерции диска (маховика) имеет вид:

$$I_z = \frac{mr^2}{2}, \text{ кг}\times\text{м}^2,$$

где m – масса маховика, кг;

r – его радиус, м.

Таким образом изменить момент инерции возможно только путем замены маховика, что недопустимо как с точки зрения времени замены, так и пределов прочности валов пресса.

Второй вариант изменения энергии состоит в изменении скорости вращения маховика. Данный вариант более предпочтителен с точки зрения простоты его реализации.

Существует несколько решений данной задачи:

- использование ступенчатых шкивов ременной передачи;
- использование многоскоростных электродвигателей;
- изменение скорости вращения электродвигателя [3].

Первый и второй варианты изменения скорости наиболее просты, однако, имеют ряд недостатков: конечное число скоростей (не более 6), изменение скорости ступенчато,

меньшая прочностью конструкции (для шкива) и значительное удорожание привода (для многоскоростного электродвигателя).

Третий вариант имеет также несколько реализаций. Наиболее распространенной из них является ввод частотного преобразователя [4, 5, 6]. Типовая схема такой реализации представлена на рисунке 1.

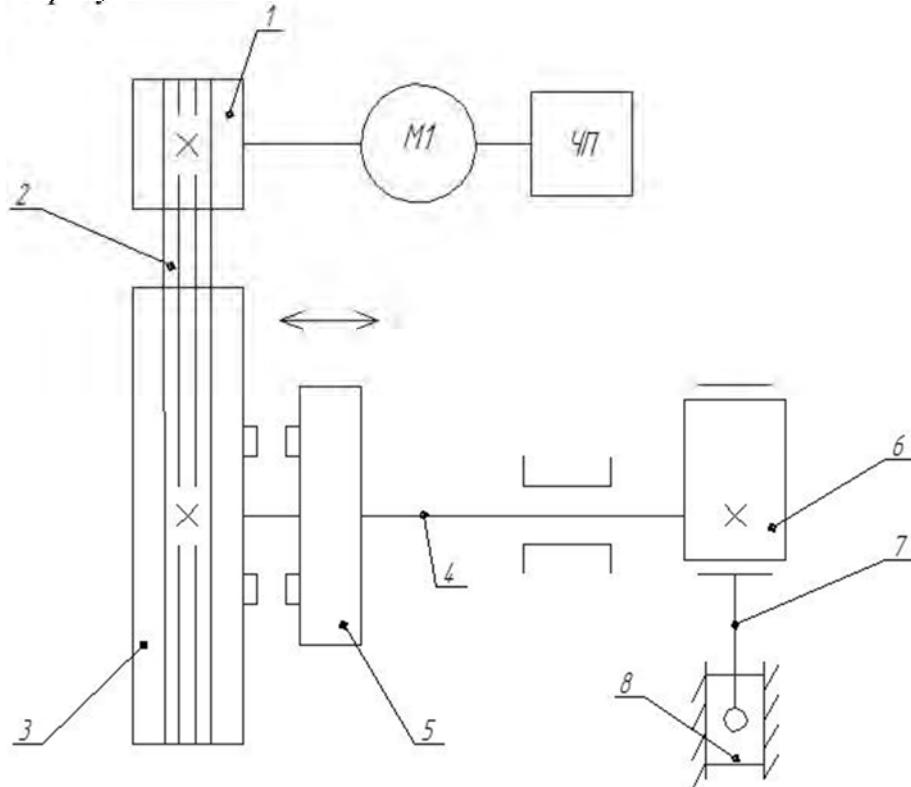


Рисунок 1 – Схема кривошипного пресса с частотным управлением скоростью

Согласно представленной схеме частотный преобразователь (ЧП) задает скорость вращения электродвигателя M_1 . Шкив 1 ременной передачи 2 жестко закреплен на валу двигателя. По ременной передаче вращение передается маховику 3. С помощью замыкания муфты 5, жестко закрепленной на валу 4, приводится в действие главный исполнительный механизм, состоящий из кривошипа 6, шатуна 7 и ползуна 8. Контролирующим устройством в описанной схеме выступает оператор, что связано определенными ошибками и трудностью подбора частоты преобразователя.

С целью устранить данные недостатки была рассмотрена возможность внедрения системы управления и контроля технологическим процессом.

Если проследить историю развития систем управления прессами, то можно выявить тенденцию перехода от механических [7], пневматических и электропневматических систем [8] к электронным, построенных на базе программируемых контроллеров [9, 10].

Однако, применимо к кривошипному прессу все рассмотренные системы управления имеют явный недостаток в виде отсутствия непосредственного контроля качества изделий и технологического процесса. Качество обрабатываемых изделий сложно подвергнуть автоматизации ввиду большой вариативности по форме и материалу изделий. А контроль технологического процесса благодаря современным датчикам и средствам автоматизации не представляется проблемой. Правильно контролируя повторяемость технологического процесса мы можем косвенно контролировать качество выпускаемой продукции. Системы управления подстраивающие процесс изготовления под изменяющиеся параметры посредством обратной связи носят название адаптивных систем. Системы данного типа построены по схеме, представленной на рисунке 2.

Адаптивные системы управления включают в себя объект (O), регулятор (P) и блок адаптации (A). Блок адаптации на основе сравнения задающего сигнала $x(t)$ и выходного сигнала $y(t)$ вырабатывает управляющее воздействие $c(t)$, производящее подстройку

параметров воздействия регулятора. Регулятор построен по принципу обратной связи, формируя управляющий сигнал $u(t)$ так, чтобы скомпенсировать текущие ошибки системы.

Проанализировав процесс штамповки на кривошипном прессе и существующие схемы управления данным процессом, типовая схема (рисунок 1) была усовершенствована и дополнена следующими блоками (рисунок 3):

- 1) программируемый логический контроллер;
- 2) датчики;
- 3) блок данных, хранящий информацию о параметрах обрабатываемой заготовки и необходимом воздействии на регулятор;
- 4) блок ввода данных;
- 5) блок автоматической подачи заготовок.

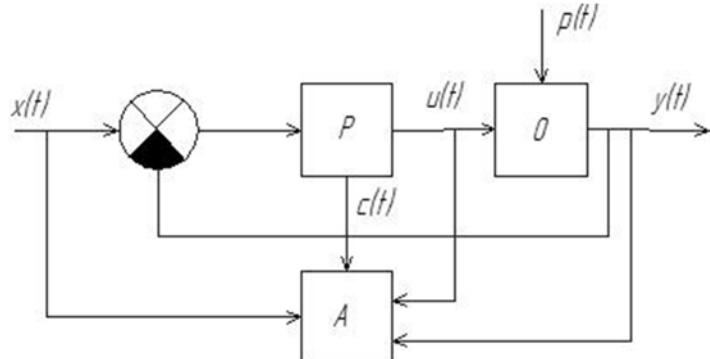


Рисунок 2 – Общая схема адаптивной системы управления

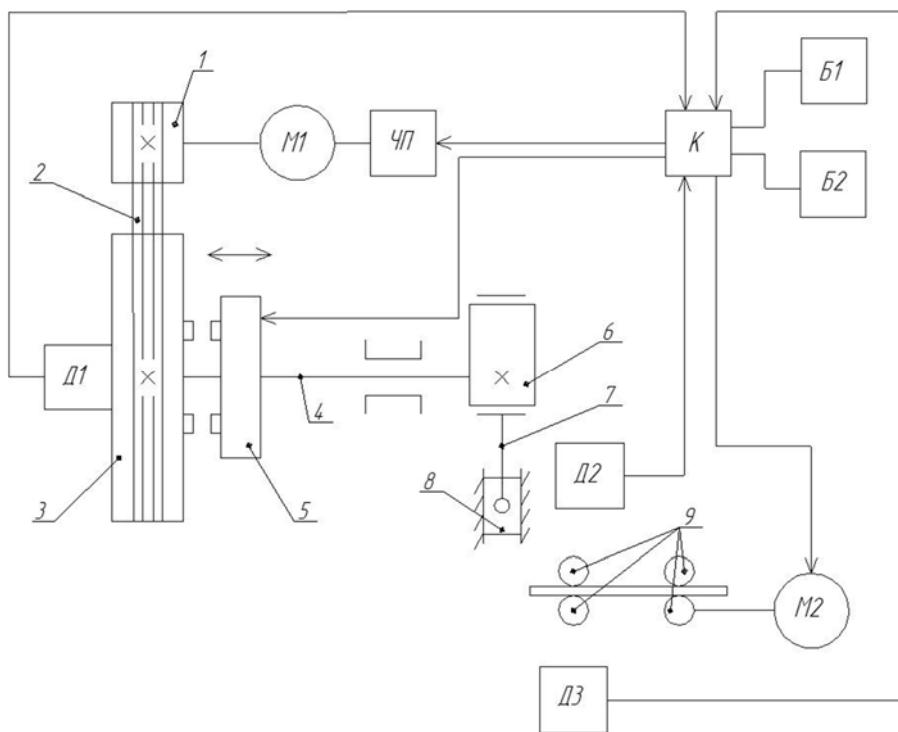


Рисунок 3 – Схема кривошипного пресса с адаптивной системой управления

Оператор установки выбирает необходимую программу, хранящуюся в блоке Б1, либо вводит информацию вручную через блок ввода Б2. Главным управляющим органом является программируемый логический контроллер (К). Он осуществляет сбор информации, поступающей от датчиков (Д1–Д3), их обработку и на основе ее вырабатывает управляющий сигнал. Таким образом, в данной схеме он является адаптером. Алгоритм работы системы управления показан на рисунке 4.

На основе информации о скорости вращения маховика 3 и положении ползуна 7 пресса контроллер вырабатывает управляющее воздействие на частотный преобразователь (ЧП), выступающий в роли регулятора. При необходимости, частотный преобразователь меняет частоту напряжения так, чтобы обеспечить оптимальные параметры скорости электродвигателя М1 (объекта управления). При выходе маховика на заданную скорость вращения контроллер подает сигнал для включения двигателя М2, подающего ленту по валкам 9. В случае ее отсутствия на контроллер придет сигнал с датчика Д3. После успешной подачи заготовки происходит замыкание муфты 5. Далее исполнительный механизм

Конструирование, расчеты, материалы

совершает полезную работу и при перемещении ползуна в верхнее положение контроллер подает команду на размыкание муфты.

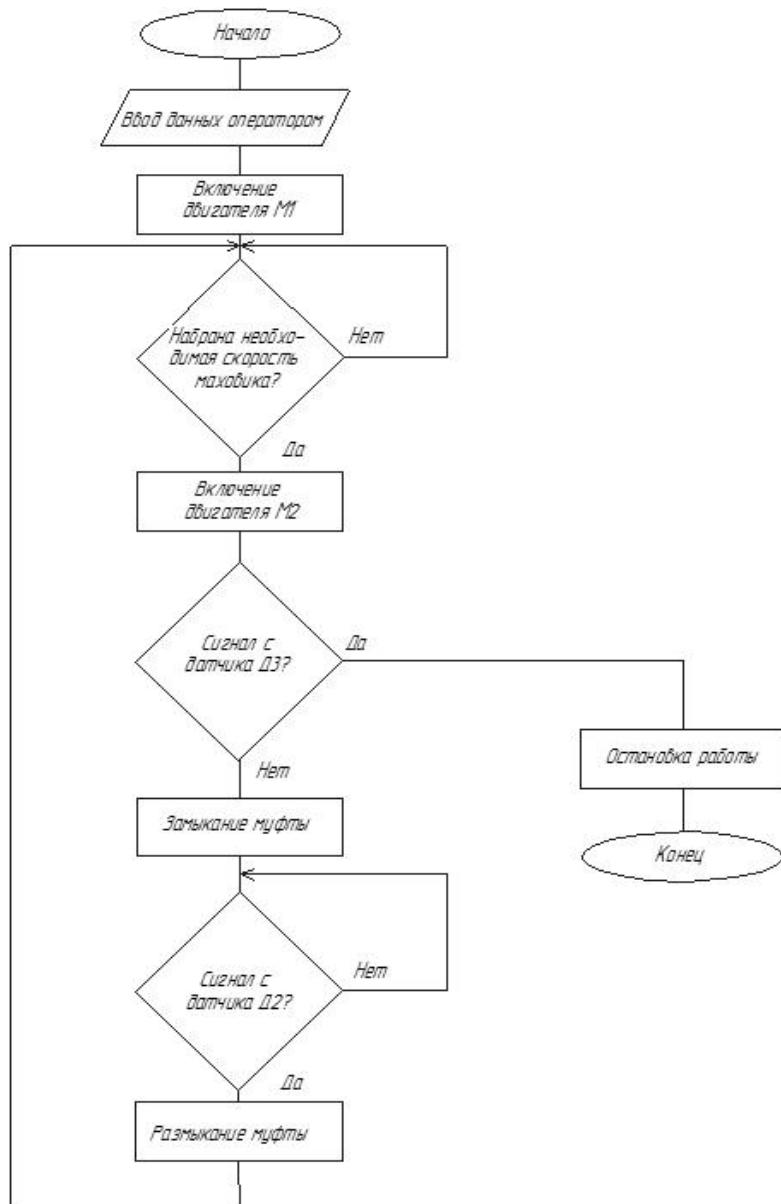


Рисунок 4 – Алгоритм работы системы управления

Вывод: применение предлагаемой адаптивной системы управления с обратной связью от маховика позволит не только использовать оптимальные параметры технологического процесса под различные материалы и формы заготовок, экономить энергию и продлевать срок службы пресса, но и контролировать весь процесс изготовления с необходимой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байрамов, Ф.Д. Автоматизация технологического процесса ковки или горячей штамповки заготовок / Ф.Д. Байрамов, А.А. Фардеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 59–63.
2. Бочаров, Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю.А. Бочаров. – М.: Академия, 2008. – 480 с.
3. Braslavskiy, I.Y. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / I.Y. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Poljakov; Под ред. I.Y. Braslavskogo. – M.: Akademiya, 2004. – 256 c.
4. Волобуев, К.А. Анализ частотной системы регулирования привода кривошипного пресса / Т.В. Федоров, К.А. Волобуев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3(293). – С. 79–87.

5. Волобуев, К.А. Моделирование потребной силы кривошипного пресса при изготовлении деталей методом гибки / Т.В. Федоров, К.А. Волобуев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2(304). – С. 63–68.
6. Литвиненко, А.М. Автоматизация дозирования энергии прессов / А.М. Литвиненко, А.О. Богданов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 43–46.
7. Петров, Н. В. Расчет перекоса траверсы гидравлического пресса с рычажным механизмом синхронизации / Н.В. Петров, О.В. Пилипенко, С.Н. Злобин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 5. – С. 33–37.
8. Системы включения кривошипных прессов. Расчет и проектирование / В.И. Власов. – М.: Машиностроение, 1969. – 272 с.
9. Койдан, И.М. Разработка системы числового программного управления гидравлическим прессом ПД476 (силой 1600кН) для тиксоштамповки. / И.М. Койдан, А.М. Поликушин, В.В. Овсянников, Ю.А. Бочаров. Наука и образование, 2009. – № 9. – (<http://technomag.bmstu.ru/doc/132150.html>)
10. Щербаков, В. Система управления прессом, построенная на базе ADAM-5510 / В. Щербаков, А. Барабошкин, А. Диулин. – М.: Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 32–35.

Волобуев Кирилл Андрианович

Приокский государственный университет, г. Орел

Аспирант кафедры «Автоматизированные процессы и машины бесстружковой обработки материалов»
E-mail: kirillvolobuev@yandex.ru

K.A. VOLOBUEV

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF CRANK PRESS

The design of crank press and existing control systems are examined. The diagram of crank press with adaptive control system on the basis of frequency converter are shown. The developed algorithm of the adaptive control system which allows to save consumption energy, to extend the period of press's performance as well as to control the whole process of manufacturing with the set accuracy by setting the optimum process parameters for various materials and forms of billets is developed.

Keywords: crank press, adaptive control system, algorithm.

BIBLIOGRAPHY

1. Bayramov, F.D. Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo protsessa kovki ili goryachej shtampovki zagotovok. // F.D. Bayramov, A.A. Fardeyev. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2012. – № 4. – S. 59–63.
2. Bocharov, YU.A. Kuznechno-shtampovochnoye oborudovaniye: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / YU.A. Bocharov. – M.: Akademiya, 2008. – 480 s.
3. Braslavskiy, I.YA. Energosberegayushchiy asinhronnyy elektroprivod: ucheb. posobiye dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / I.YA. Braslavskiy, Z.SH. Ishmatov, V.N. Polyakov; Pod red. I.YA. Braslavskogo. – M.: Akademiya, 2004. – 256 s.
4. Volobuyev, K.A. Analiz chastotnoy sistemy regulirovaniya privoda krivoshipnogo pressa. // T.V. Fedorov, K.A. Volobuyev. // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 3(293). – S. 79–87.
5. Volobuyev, K.A. Modelirovaniye potrebnoy sily krivoshipnogo pressa pri izgotovlenii detaley metodom gibki. // T.V. Fedorov, K.A. Volobuyev. // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 2(304). – S. 63–68.
6. Litvinenko, A.M. Avtomatizatsiya dozirovaniya energii pressov. // A.M. Litvinenko, A.O. Bogdanov // Elektrotekhnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya. – 2014. – № 1. – S. 43–46.
7. Petrov, N. V. Raschet perekosa traversy gidravlicheskogo pressa s rychazhnym mekhanizmom sinkhronizatsii / N.V. Petrov, O.V. Pilipenko, S.N. Zlobin // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. – 2007. – № 5. – S. 33–37.
8. Sistemy vklyucheniya krivoshipnykh pressov. Raschet i proyektirovaniye / V.I. Vlasov. – M.: Mashinostroyeniye, 1969. – 272 s.
9. Koydan, I.M. Razrabotka sistemy chislovogo programmnogo upravleniya gidravlicheskim pressom PD476 (siloy 1600kN) dlya tiksoshtampovki. / I.M. Koydan, A.M. Polikushin, V.V. Ovsyannikov, YU.A. Bocharov. Nauka i obrazovaniye, 2009. – № 9. – (<http://technomag.bmstu.ru/doc/132150.html>)
10. Shcherbakov, V. Sistema upravleniya pressom, postroyennaya na baze ADAM-5510 // V. Shcherbakov, A. Baraboshkin, A. Diulin. – M.: Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii. – 2007. – № 4. – S. 32–35.

Volobuev Kirill Andrianovich

Priokskii state university, Orel

Post-graduate student of the department

«Automated processes and material handling machines»

E-mail: kirillvolobuev@yandex.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.924

А.В. МИХЕЕВ, Г.В. БАРСУКОВ, Ю.С. СТЕПАНОВ, В.С. ШОРКИН

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСПОЛОЖЕНИЮ МЕЖСЛОЙНЫХ ОПОР ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ ПРИ РЕЗАНИИ ПАКЕТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Авторами статьи разработаны рекомендации по расположению межслойных опор для реализации технологии использования остаточной энергии гидроабразивной струи при резании пакетированных материалов, что позволяет обеспечить минимальные прогибы тонколистового материала и точность раскроя.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, многослойные материалы, пакет материалов, межслойный зазор, технологические опоры.

Экономика Российской Федерации является одной из самых энергоемких экономик мира. Она входит в тройку лидеров по использованию энергетических ресурсов. По данным Всемирного банка энергоемкость ВВП России превышает энергоемкость ВВП США в 2,2 раза, Китая – в 2,1 раза, Индии, Японии и Западной Европы – в 3 раза. Инновационный путь развития, который выбрала отечественная экономика, требует для своей реализации консолидации интеллектуальных, материальных и финансовых ресурсов страны. Особое место при этом отводится вопросам энерго- и ресурсосбережения во всех сферах жизни. Энергоемкость ВВП России к 2020 году должна снизиться на 40% по отношению к уровню 2007 года. В государственной программе Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» запланировано к 2020 г. снижение общей энергоемкости промышленного производства на 31,3%; снижение общей электроемкости промышленного производства на 31,8%. Проблема энергосбережения актуальная также для многих вертикально-интегрированных компаний [1–5].

Особенно остро проблема энергосбережения возникла в механообрабатывающем производстве, так как наибольшая часть формообразуемых деталей (более 2/3 общей номенклатуры) приходится на фигурные, профильные и другие детали сложной формы, а накопленный парк технологического оборудования не позволяет снизить операционное время на их изготовление и, к тому же, сконструирован еще в 80-х годах, в эпоху дешевой энергии.

В настоящее время в России накоплен опыт резания плоских деталей сложной формы, не относящиеся к телам вращения, которые имеют значительное число наименований (более 50 % номенклатуры) и составляют 20 – 30 % от общей стоимости механообработки. Это современные технологии с использованием энергии ультразвука, плазмы, лазера, гидроабразивной струи и др.

Одной из ключевых экологически чистых технологий радикально решающей вопросы производства деталей из любых материалов является гидроабразивное резание. Явные преимущества этой технологии обеспечили ее внедрение на многих предприятиях страны. В ряде случаев она является единственной возможной. Однако, как правило, изготовителями гидрорежущего оборудования преследуется одна цель – выполнение машинной задачи по обеспечению показателя назначения. Доля затрат на электроэнергию и воду составляет 20 %, на абразив 60 % от общих затрат на гидроабразивное резание, что говорит о высокой энергоемкости процесса [6].

А между тем оказался возможным другой подход, который отличается от известной технологии пакетной резки однотипных деталей гидроабразивной струей, когда снижают подачу сопла, а, следовательно, и производительность обработки для резания нижележащих слоев, что существенно повышает энергоемкость процесса [7].

Отличительной идеей предлагаемой разработки является использование остаточной энергии струи, являющейся отходом производства, которой недостаточно при традиционной технологии на резание нижележащих слоев материала, т.е. по сути, использование вторичного энергетического ресурса

Применение остаточной энергии струи для гидроабразивного резания дополнительного слоя материала оказалось возможным, если использовать факельный эффект ее расширения после выхода из обрабатываемого материала.

Для реализации разрабатываемой энергоэффективной технологии создается межслойный технологический зазор между листами посредством установки между ними перед началом резания технологических опор. Струя при ходе из верхнего слоя материала расширяется, насыщается воздухом, но еще остается компактной, обладая значительной энергией. Это связано с тем, что твердые частицы вследствие своей более ярко выраженной инертности не способны перемещаться вместе с расширяющейся несущей жидкостью, происходит разделение струи и обеспечивается компактная локализация абразивных частиц в ядре струи. Известно, что разрушение материала производится лишь небольшим отрезком фронтальной поверхности гидроабразивной струи и около 60 % абразивных частиц не участвуют в резании [8–10]. Поэтому создание условий для их перераспределение по ядру струи в межслойной зоне, позволяет сформировать новую струю, обладающую режущими возможностями достаточными для резания второго слоя материала.

Однако создание зазора приведет к прогибу тонколистового материала [11, 12]. Если размеры листа обрабатываемого материала велики в сравнении с расстоянием a между опорами (рисунок 1) и поперечная нагрузка распределена по ней равномерно, то изгиб во всех достаточно удаленных от краев пластинки панелях можно считать одинаковым, и мы будем вправе свести нашу задачу к вопросу об изгибе одной лишь единственной панели. Направив оси координат параллельно рядам колон и поместив начало в центре панели, мы сможем рассматривать эту панель как равномерно нагруженную прямоугольную пластинку со сторонами f и e . Максимальный прогиб будет в центре панели, в вершинах же прогиб будет равен нулю. Для упрощения задачи предположим, что для случая прогиба в центре пластиинки размеры поперечных сечений колонн малы и что ими можно пренебречь.

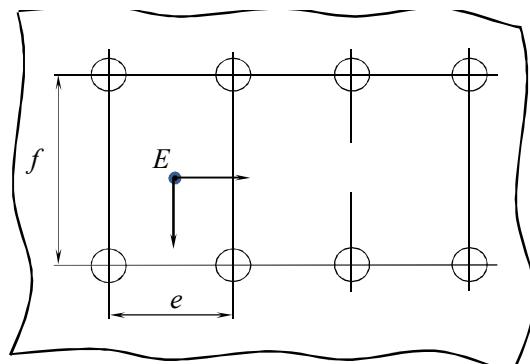


Рисунок 1 – Примерное расположение опор

Для этого случая имеем равномерно нагруженную прямоугольную пластинку, опертую в вершинах, причем из симметрии мы должны будем заключить, что наклон изогнутой поверхности в направлении нормали к краю, а также сила резания обращаются в нуль во всех точках на краях пластиинки, за исключением вершин. Поступая, как и в случае для свободно опертой пластиинки [11, 12], примем полный прогиб в виде:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2, \quad (1)$$

где:

$$\psi_1 = \frac{qf^4}{384D} \left(1 - \frac{4\zeta^2}{f^2} \right)^2. \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой прогиб равномерно нагруженной полоски, защемленной по краям, удовлетворяющий дифференциальному уравнению прогиба пластиинки, равно, как и граничным условиям:

$$\left(\frac{\partial \psi_1}{\partial \delta} \right)_{\delta=\pm\frac{e}{2}} = 0, \quad (\mathcal{Q}_\delta)_{\delta=\pm\frac{e}{2}} = -D \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \zeta^2} \right)_{\delta=\pm\frac{e}{2}} = 0. \quad (3)$$

Прогиб ψ_2 берем в виде ряда:

$$\psi_2 = A_0 + \sum_{s=2,4,6,\dots}^{\infty} Y_s \cos \frac{s\pi\delta}{e}. \quad (4)$$

Каждый член выражения (4) удовлетворяет условиям (3). Функции Y_s должны быть подобраны таким образом, чтобы удовлетворялось однородное уравнение:

$$\Delta\Delta\psi_2 = 0, \quad (5)$$

и, более того, так, чтобы ψ удовлетворяло граничным условиям на краях $\zeta = \frac{f}{2}$.

Уравнение (5) и условия симметрии будут удовлетворяться, если мы припишем ряду (4) следующую форму:

$$\psi_2 = A_0 + \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \left(A_s ch \frac{s\pi\delta}{e} + B_s \frac{s\pi\delta}{e} sh \frac{s\pi\delta}{e} \right) \cos \frac{s\pi\delta}{e}, \quad (6)$$

где A_0, A_s, B_s – постоянные и определяются из граничных условий на краю $\zeta = \frac{f}{2}$. Из условия, указанного ранее относительно наклона:

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial \zeta} \right)_{\zeta=\pm\frac{f}{2}} = \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial \zeta} + \frac{\partial \psi_2}{\partial \zeta} \right)_{\zeta=\pm\frac{f}{2}} = 0. \quad (7)$$

После этого получим:

$$B_s = -A_s \frac{th\alpha_s}{\alpha_s + th\alpha_s}, \quad (8)$$

где $\alpha_s = \frac{s\pi f}{2e}$.

Сформулируем условие действия силы резания бесконечно близкой к краю $\zeta = \frac{f}{2}$.

Сила резания Q_ζ равна нулю во всех точках, за исключением тех, которые близки к опорам, причем в этих последних точках Q_ζ должна быть бесконечно большой, чтобы передать конечную нагрузку опоре на бесконечно малом расстоянии между $\delta = \frac{e}{2} - c$ и $\delta = \frac{e}{2} + c$.

Представив Q_ζ тригонометрическим рядом, который по условию симметрии:

$$Q_\zeta = C_0 + \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} C_s \cos \frac{s\pi\delta}{e}, \quad (9)$$

заметив, что:

$$Q_s = 0 \text{ для } 0 < \delta < \frac{e}{2} - c, \quad (10)$$

а так же, что:

$$\int_{\frac{e}{2}-c}^{\frac{e}{2}} Q_\zeta d\delta = -\frac{qef}{4}, \quad (11)$$

находим, пользуясь обычным приемом расчета:

$$C_0 = -\frac{qf}{2} - \frac{P_1}{2e}, \quad (12)$$

где $P_1 = qef$ представляет собой полную нагрузку на панель пластиинки.

Подстановка этих значений коэффициентов C_0 и C_s в ряд (9) дает нам искомое граничное условие в таком виде:

$$(Q_\zeta)_{\zeta=\frac{f}{2}} = -D \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial \zeta^3} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial \delta^2 \partial \zeta} \right)_{\zeta=\frac{f}{2}} = -\frac{P_1}{e} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} (-1)^{\frac{s}{2}} \cos \frac{s\pi\delta}{e} - \frac{P_1}{2e}. \quad (13)$$

Подставив сюда вместо ψ выражение (1), и обратив внимание на то, что в силу граничного условия для $\frac{\partial \psi}{\partial \zeta}$ второй член в скобках обращается в нуль, получаем:

$$-D \left(\frac{\partial^3 \psi_2}{\partial \zeta^3} \right)_{\zeta=\frac{f}{2}} = -\frac{P_1}{e} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} (-1)^{\frac{s}{2}} \cos \frac{s\pi\delta}{e}. \quad (14)$$

Откуда, пользуясь выражением (6), находим:

$$D \frac{s^3 \pi^3}{e^3} [(A_s + 3B_s) sh \alpha_s + B_s \alpha_s ch \alpha_s] = \frac{P_1}{e} (-1)^{\frac{s}{2}}. \quad (15)$$

Решая уравнения (8) и (15) относительно постоянных A_m и B_m , получаем:

$$A_s = \frac{P_1 e^2}{2s^3 \pi^3 D} (-1)^{\frac{s}{2}} \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{sh \alpha_s th \alpha_s}, \quad (16)$$

$$B_s = \frac{P_1 e^2}{2s^3 \pi^3 D} (-1)^{\frac{s}{2}} \frac{1}{sh \alpha_s}. \quad (17)$$

Прогиб пластины принимает вид:

$$\psi = \frac{qf^4}{384D} \left(1 - \frac{4\zeta^2}{f^2} \right) + A_0 + \frac{qe^3 f}{2\pi^3 D} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{s}{2}} \cos \frac{s\pi\delta}{e}}{s^3 sh \alpha_s th \alpha_s} \times \\ \times \left[th \alpha_s \frac{s\pi\zeta}{e} sh \frac{s\pi\zeta}{e} - (\alpha_s + th \alpha_s) ch \frac{s\pi\zeta}{e} \right]. \quad (18)$$

Используя выражение (18) получена графическая зависимость (рисунок 2) влияния размеров размещения межслойных опор на максимальный прогиб листа обрабатываемого материала.

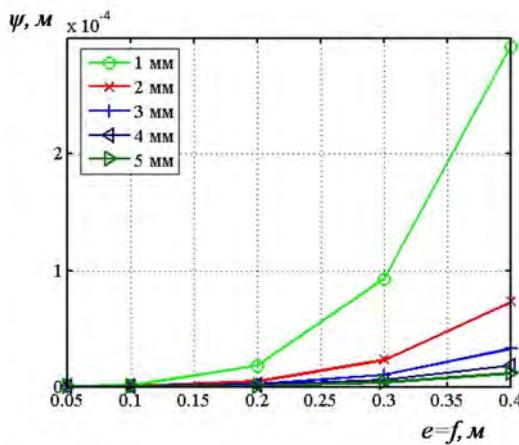


Рисунок 2 – Влияние размеров размещения межслойных опор на максимальный прогиб листа обрабатываемого материала

Постоянную A_0 можно определить из того условия, что прогиб в вершинах пластиинки обращается в нуль, тогда:

$$A_0 = \frac{qe^3 f}{2\pi^3 D} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \frac{1}{s^3} \left[\alpha_s - \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{th^2 \alpha_s} \right]. \quad (19)$$

С помощью выражений (18) и (19) можно вычислить прогиб в любой точке пластины. Максимальный прогиб получиться в центре:

$$\psi_{\delta=0, \zeta=0} = \frac{qf^4}{384D} - \frac{qe^3 f}{2\pi^3 D} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{s}{2}}}{s^3} \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{sh \alpha_s th \alpha_s} - \\ - \frac{qe^3 f}{2\pi^3 D} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \frac{1}{s^3} \left(\alpha_s - \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{th^2 \alpha_s} \right). \quad (20)$$

Для случая квадратной панели, максимальный прогиб:

$$\psi_{\delta=0, \zeta=0} = \frac{qf^4}{384D} - \frac{qe^3 f}{2\pi^3 D} \sum_{s=2,4,6...}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{s}{2}}}{s^3} \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{sh \alpha_s th \alpha_s} - \frac{1}{s^3} \left(\alpha_s - \frac{\alpha_s + th \alpha_s}{th^2 \alpha_s} \right). \quad (21)$$

Машиностроительные технологии и инструменты

Основываясь на полученных выражениях, разработаны рекомендации по расположению межслойных опор для реализации технологии использования остаточной энергии гидроабразивной струи при резании пакетированных материалов (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендации по выбору расположения межслойных опор.

Толщина листа, мм	Предельные размеры расположения опор $f=e$, м		
	Сталь 3	Титан	Алюминий
1	0,3	0,35	0,25
2	0,55	0,5	0,4
3	0,7	0,7	0,5
4	0,8	0,8	0,6
5	0,9	0,9	0,7

Таким образом, разработанные рекомендации по расположению межслойных опор позволяет обеспечить минимальные прогибы тонколистового материала, точность раскрова и реализовать новую инновационную технологию обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Энергосбережение как приоритетное направление экономической политики многоуровневых компаний / Е.Ю. Степанова // Энерго– ресурсосбережение–XXI век: Сб. матер. IX–ой междунар. науч.–практ. Интернет–конференции / Под ред. д.т.н., проф. В.А. Голенкова, д.т.н., проф. А.Н. Качанова, д.т.н., проф. Ю.С. Степанова. – Орел: ООО ПФ «Картуш». – 2011. – С. 251–256.
2. Степанова, Е.Ю. Проблемы энергосбережения для крупных компаний / Е.Ю. Степанова //Энерго– и ресурсосбережение XXI век: Сб. матер. VI междунар. науч.–практ. интернет–конф. /Под ред. В.А. Голенкова, А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. – Орел: ООО «Издательский дом «Орлик и К». – 2008. – С. 157–160.
3. Рыжикова, Е.Ю. Управление энергосбережением в многоуровневых университетских комплексах / Е.Ю. Степанова, Е.Ю. Рыжикова // Энерго– и ресурсосбережение – XXI век: Матер. XII междунар. науч.–практ. интернет–конф., 15 марта – 30 июня 2014 г., г. Орел / Под ред. О.В. Пилипенко, А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. – Орел: Госуниверситет–УНПК. – 2014. –С. 140–144.
4. Степанова, Е.Ю. Энергоемкость российской экономики: проблемы и решения //Энерго– и ресурсосбережение – XXI век: Матер. V междунар. науч.–практ. конф., апрель–июнь. – Орел: ООО «Издательский дом «ОРЛИК» и К». – 2007. – С. 23–24.
5. Степанова, Е.Ю. Вертикально–интегрированные компании: энергосбережение и энергоэффективность /Е.Ю. Степанова // Энерго– и ресурсосбережение – XXI век: Матер. IV междунар. науч.–практ. интернет–конф. / Под ред. В.А. Голенкова, Ю.С. Степанова, А.Н. Качанова. – Орел: ОрелГТУ, 2006. –С. 92–94.
6. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 46–54.
7. Барсуков, Г.В. Оптимизация энергетических затрат технологии резания материалов гидроабразивной струей / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, А.А. Александров // Наука и мир. – 2013. – № 2. – С. 46 – 49.
8. Степанов, Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков // СТИН. –2003. – № 10. – С. 15 – 17.
9. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев//Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 1. – С. 9–14.
10. Барсуков, Г.В. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды / Г.В. Барсуков Ю.С. Степанов, А.В. Михеев //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2–5. – С. 53 – 63.
11. Михеев, А.В. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 4–2. – С. 65 – 70.
12. Михеев, А.В. Математическое моделирование сверхзвукового удара и проникновения тел в металлические преграды / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев. – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 152 с.

Барсуков Геннадий Валерьевич

Приокский государственный университет,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой КТОМП
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Степанов Юрий Сергеевич

Приокский государственный университет,
доктор технических наук, профессор
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. +7906 660 42 24
E-mail: yury057@yandex.ru

Михеев Александр Васильевич

Приокский государственный университет,
кандидат технических наук, докторант
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Шоркин Владимир Сергеевич

Приокский государственный университет,
доктор физико–математических наук,
профессор, профессор кафедры «Физика»
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: awj@list.ru

A.V. MIKHEEV, G.V. BARSUKOV, Yu.S. STEPANOV, V.S. SHORKIN

**DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS ON THE LOCATION
OF INTERLAYER SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION
OF TECHNOLOGIES RESIDUAL ENERGY WATERJET JET
CUTTING PACKAGED MATERIALS**

The authors developed recommendations for the location of the interlayer supports for the implementation of the technology of using the residual energy waterjet cutting jet at the packet of materials that allows for minimal deflection of the web material and precision cutting.

Keywords: hydroabrasive cutting, multilayer materials, package materials, inter-gap technology support.

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, Ye.YU. Energosberezheniye kak prioritetnoye napravleniye ekonomicheskoy politiki mnogourovnykh kompaniy / Ye.YU. Stepanova // Energo- resursosberezheniye–XXI vek: Sb. mater. IX-ov mezhdunar. nauch.–prakt. Internet–konferentsii / Pod red. d.t.n., prof. V.A. Golenkova, d.t.n., prof. A.N. Kachanova, d.t.n., prof. YU.S. Stepanova. – Orel: OOO PF «Kartush». – 2011. – S. 251–256.
2. Stepanova, Ye.YU. Problemy energosberezheniya dla kryptykh kompaniy / Ye.YU. Stepanova //Energo– i resursosberezheniye XXI vek: Sb. mater. VI mezhdunar. nauch.–prakt. internet–konf. /Pod red. V.A. Golenkova, A.N. Kachanova, YU.S. Stepanova. – Orel: OOO «Izdatelskiy dom «Orlik i K». – 2008. – S. 157–160.
3. Ryzhikova, Ye.YU. Upravleniye energosberezheniyem v mnogourovnykh universitetskikh kompleksakh / Ye.YU. Stepanova, Ye.YU. Ryzhikova // Energo– i resursosberezheniye – XXI vek: Mater. XII mezhdunar. nauch.–prakt. internet–konf., 15 marta – 30 iyunya 2014 g., g. Orel / Pod red. O.V. Pilipenko, A.N. Kachanova, YU.S. Stepanova. – Orel: Gosuniversitet–UNPK. – 2014. –S. 140–144.
4. Stepanova, Ye.YU. Energovemkost rossiyorskoy ekonomiki: problemy i resheniya //Energo– i resursosberezheniye – XXI vek: Mater. V mezhdunar. nauch.–prakt. konf., aprel–iyun. – Orel: OOO «Izdatelskiy dom «ORLIK» i K». – 2007. – S. 23–24.
5. Stepanova, Ye.YU. Vertikalno–integrirovannyye kompanii: energosberezheniye i energoeffektivnost /Ye.YU. Stepanova // Energo– i resursosberezheniye – XXI vek: Mater.IV mezhdunar. nauch.–prakt. internet–konf. / Pod red. V.A. Golenkova, YU.S. Stepanova, A.N. Kachanova. – Orel: OrelGTU, 2006. –S. 92–94.
6. Galinovskiy, A.L. Minimizatsiya tekhnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetom stoimostnykh i tekhnologicheskikh parametrov protsessa obrabotki / A.L. Galinovskiy, V.A. Tarasov, V.M. Yefimov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2011. – № 4. – S. 46–54.
7. Barsukov, G.V. Optimizatsiya energeticheskikh zratat tekhnologii rezaniya materialov gidroabrazivnoy struyey / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev, A.A. Aleksandrov // Nauka i mir. – 2013. – № 2. – S. 46 – 49.
8. Stepanov, YU.S. Formirovaniye kachestva poverkhnostnogo sloya detaley pri rezanii sverkhzvukovoy struyey zhidkosti / YU.S. Stepanov, G.V. Barsukov // STIN. –2003. – № 10. – S. 15–17.
9. Barsukov, G.V. Opredeleniye proizvoditelnosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetom kharakteristik abrazivnogo zerna / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev//Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2008. – № 1.– S. 9–14.
10. Barsukov, G.V. Vliyaniye parametrov techeniya sverkhzvukovoy gidroabrazivnoy strui na geometricheskuyu formu poverkhnosti razrusheniya pregrady / G.V. Barsukov YU.S. Stepanov, A.V. Mikheyev //Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 2–5. – S. 53 – 63.
11. Mikheyev, A.V. Modelirovaniye razrusheniya mnogosloynoy pregrady s gazovym zazorom pod deystviyem sverkhzvukovogo struyognogo potoka svobodnykh abrazivnykh chastits / YU.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 4–2. – S. 65 – 70.
12. Mikheyev, A.V. Matematicheskoye modelirovaniye sverkhzvukovogo udara i proniknoveniya tel v metallicheskkiye pregrady / YU.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev. – Orel: «Izdatelskiy dom «Orlik», 2012. – 152 s.

Barsukov Gennady Valerievich
Prioksky State University,
Professor, Head. Department KTOMP
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Ph. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Stepanov Yury Sergeevich
Prioksky State University,
Dr. Sc. tech. Professor
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Ph.: +7906 660 42 24
E-mail: yury057@yandex.ru

Mikheev Alexander Vasilievich
Prioksky State University,
Ph.D.
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Ph. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Shorkin Vladimir Sergeyevich
Prioksky State University,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Department of «Physics»
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Ph. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

ВИБРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОГРАММЕ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НАУКОЁМКИХ ИЗДЕЛИЙ

Представлены предложения применения отечественных научных разработок в области виброволновых технологий для обеспечения импортозамещения средств технологического оснащения финишной обработки деталей, в том числе высокотехнологичных изделий, повышения качества и производительности. Приведены примеры практической реализации результатов исследования на предприятиях различных отраслей машиностроения и положительный опыт сотрудничества НИИ «Вибротехнология» ДГТУ с предприятиями и организациями авиационной, автотранспортной промышленности, приборостроения и др.

Ключевые слова: виброволновая обработка, вибрационные технологии, программа импортозамещения.

В последний период (1990–е и последующие годы) в связи с резким сокращением производства металлообрабатывающих станков на отечественных предприятиях станкоинструментальной промышленности Российской Федерации, возрос объем закупок оборудования для выполнения финишной обработки с использованием виброволновых процессов, применения соответствующего оборудования – вибрационных станков, обрабатывающих инструментов и сред, технологических жидкостей.

Средства технологического обеспечения приобретались у зарубежных фирм Германии, Италии, Франции, Великобритании, таких как: Rosler, Шпалек, W. Troval, Рото-Финиш и др. В последние годы производство средств технологического обеспечения для вибрационной технологии существенно снизилось. Практически в РФ в настоящее время оборудование для вибрационной обработки не изготавливается.

Зависимость от импорта в машиностроительном комплексе в целом удручающе велика. Она составляет, например, в производстве крупнотоннажных судов – 100%, полупогружных плавучих платформ и стационарных буровых платформ – 95%, крупнотоннажных трубоукладчиков – 100%, рыбопромыслового флота – 90%, деталей для судов – 70–100 %, в объеме судоремонта – 75%, Доля импорта в 2011 г. в поставках экскаваторов составляла – 96%, тракторов – 90%, бульдозеров – 63%.

Экспортные ограничения и санкции США, ЕС и других стран в отношении России существенно усложнили возможности приобретения научно-исследовательского оборудования в зарубежных компаниях [1]. Программы по импортозамещению являются теперь шансом для возрождения и развития отечественной промышленности. Но даже при их выполнении зависимость от импорта может составить к 2020 году в 50–60% [2].

Учитывая сложившуюся обстановку и в целях решения проблемы обеспечения импортозамещения, обеспечения повышения эффективности финишной обработки деталей, качества и конкурентоспособности изделий различных отраслей машиностроения предлагается научно-производственная программа: «Виброволновые технологии в программе импортозамещения технологического обеспечения финишной обработки деталей научно-исследовательских изделий».

НИИ Вибротехнология ДГТУ (НИИ «ВиТ») более 40 лет работает в области вибротехнологий – исследование и разработка технологических процессов, оборудования, инструментов, эффективных обрабатывающих сред и технологических жидкостей. Разработан типаж оборудования более 15 типов вибрационных станков, исследованы различные виды и характеристики обрабатывающих сред и технологических жидкостей. Наиболее востребованные типы оборудования прошли практическую апробацию на предприятиях различных отраслей машино- и приборостроения. В работах специалистов отмечается, что разработки НИИ «ВиТ» в области вибрационных технологий являются наиболее всесторонними и комплексными для решения широкого спектра технологических задач [3].

Научные разработки и их реализация осуществлялись при сотрудничестве с предприятиями: ОАО «Роствертол» (Ростов-на-Дону), Смоленский авиационный завод, Таганрогский авиационный завод, Минский моторный завод и завод «Автозапчасть», Завод гидроагрегатов (Москва), КБ «Сатурн» (Москва), подшипниковые заводы: ГПЗ-4, ГПЗ-9, ГПЗ-10, ГПЗ-19; НПО «Энергия» (Москва) и др. Из опыта работы НИИ «ВиТ» в советский период с предприятиями страны известны примеры поставки и внедрения вибрационных станков до 5–20 единиц на предприятие. Известны также примеры когда предприятие приобретало (внедряло) оборудование, изготовленное НИИ «ВиТ» ДГТУ и зарубежной фирмы.

Имеющийся накопленный опыт и продолжающиеся в настоящее время исследования, кадровый состав и творческие связи являются основанием для успешного и эффективного решения проблемы импортозамещения технологического обеспечения для выполнения финишных операций, составляющих значительный объем при изготовлении наиболее ответственных деталей высокотехнологичных изделий, обеспечении при этом высокого качества и производительности.

Научные разработки защищены более 110 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Вибрационные и виброволновые технологии характеризуются широкими технологическими возможностями, находят отражение практически во всех технологических переделах: заготовительных, механообрабатывающих, сборочных (и разборочных), на предприятиях машино- и приборостроения, а также предприятий по ремонту и утилизации изделий машиностроения [4].

Предлагаемая программа предусматривает разработку типажа универсального оборудования состоящего из 10-ти разновидностей, а также специальных станков для обработки деталей нетрадиционных форм и размеров и комбинированных процессов, изготовления и технологические испытания головных образцов оборудования из числа типовых представителей; разработку технологической документации (в том числе методики расчета конструкции оборудования); решение вопросов организации производства оборудования, определение обеспечения инструментальными средствами и технологическими жидкостями отечественного производства.

Предлагаемая программа, учитывая современные тенденции развития машиностроения, которые характеризуются все возрастающей ролью финишных операций, формирующих качество, эксплуатационные свойства и товарный вид продукции при обеспечении высокой производительности. Одним из эффективных методов обработки, позволяющим осуществить такие технологии, является вибрационная и виброволновая обработка деталей в различных технологических средах, в условиях использования низкочастотного спектра колебаний (15...100 Гц) [5].

В этой связи важна роль практических мероприятий направленных на производство средств технологического обеспечения упомянутых методов – вибрационных станков, оснастки и рабочих сред.

Область применения вибрационной и виброволновой техники и технологии охватывает различные отрасли машиностроения, приборостроения, предприятия ремонтного производства и утилизации это [4, 5]:

- очистка литых заготовок от остатков формовочной смеси и облоя;
- очистка штампованных заготовок и деталей от окалины, коррозии, ржавчины, загрязнений;
- удаление заусенцев;
- скругление кромок;
- шлифование и полирование с целью обеспечения требуемой шероховатости и тонкой отделки поверхности деталей (в том числе массового производства);
- подготовка поверхности под различного рода покрытия;
- упрочнения поверхностного слоя;
- вибрационная стабилизирующая обработка;
- придание поверхности специальных свойств;
- нанесение антикоррозийных, антифрикционных и других видов покрытий.

Достоинства вибрационной техники и технологии:

- высокая производительность, качество и стабильность результатов обработки;
- автоматизация рабочего цикла обработки;
- высокая эффективность применения;
- экологическая безопасность технологических процессов.

Имеющиеся научные разработки НИИ «ВиТ» в области машино- и приборостроения позволяют осуществлять отделочно-зачистные, шлифовально-полировальные, упрочняющие операции, стабилизирующую обработку, наносить металлические и не металлические покрытия на детали из различных конструкционных материалов при значительной экономии материальных и трудовых затрат. Однако, несмотря на очевидную потребность в данных товарах и услугах в настоящее время они остаются недостаточно востребованными предприятиями РФ. По нашему мнению, устройства, аппараты и станки, основанные на принципах вибрационного и виброволнового действия требуют дальнейшей научно-исследовательской и конструкторско-технологической проработки при их постановке на производство.

Участники проекта могут взять на себя необходимые функции по организации такого производства: ДГТУ и совместные лаборатории ДГТУ – ОАО «Роствертол» (Упрочняющие

технологии и покрытия); ДГТУ – ЗАО КомТех–центр (Вибрационные технологии) – разработка, конструкторско–технологическое сопровождение, технологические испытания образцов оборудования и общее руководство проектом, организация производства и реализация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3 (305). – С. 96–103.
2. Степанова, Е.Ю. Импортозамещение оборудования и технологий в машиностроительном комплексе / Е.Ю. Степанова /Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиа двигателестроения (ТМ–2015): материалы 7–ой международной научно–технической конференции, г. Брянск, 21–23 сентября 2015 г. – Брянск: БГТУ. – 2015. – С. 170–172.
3. La Roux K. Gillespie. Leaders Who have made a difference in Deburring / La Roux K. Gillespie // Deburring Technology International. – Kansas City, Missouri. – 2004. – Р. 1–17.
4. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
5. Бабчиев, А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно–зачистной обработки деталей / А.П. Бабчиев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи, Г.А. Прокопец, С.Н. Худолей, Д.Н. Кравченко. – Ростов–н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 209 с.

Бабичев Анатолий Прокофьевич
Донской ГТУ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», 344000 г. Ростов–на–Дону, пл. Гагарина, 1
Тел. (863) 2–738–513,
E-mail: vibrotech@mail.ru

Мотренко Петр Данилович
Донской ГТУ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», г. Ростов–на–Дону 344000, пл. Гагарина, 1
Тел. (863) 2–738–360,
E-mail: vibrotech@mail.ru

Бабичев Игорь Анатольевич
ЗАО «Комтех–плюс»,
Генеральный директор,
344010, Ростов–на–Дону,
пр. Буденновский, 90

A.P. BABICHEV, P.D. MOTRENKO, I.A. BABICHEV

VIBROWAVE TECHNOLOGY PROGRAM OF IMPORT SUBSTITUTION PROCESS TO ENSURE THE FINISH MACHINING OF HIGH-TECH PRODUCTS

The submitted proposal of application of national scientific developments in the field of vibrowave technologies to ensure import substitution equipment finishing machining details, including high-tech product, improve quality and productivity. Examples of the practical implementation results of the study on machinbuilding factories and positive experience cooperation with «Vibrotechnology» DSTU and aviations, instrumentation and motor corporation.

Keywords: vibrowave treatment, vibration technologies, import substitution programme.

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanova, E.Ju. Jeksporntye ogranicenija SShA i ES kak stimul k razvitiyu naukoemkih i vysokotekhnologichnyh sektorov jekonomiki / E.Ju. Stepanova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 3 (305). – S. 96–103.
2. Stepanova, E.Ju. Importozameshenie oborudovaniya i tehnologij v mashinostroitelnom komplekse / E.Ju. Stepanova /Problemy obespechenija i povyshenija kachestva i konkurentosposobnosti izdelij mashinostroeniija i aviadvigatelestroeniya (TM–2015): materialy 7–oj mezhdunarodnoj nauchno–tehnicheskoy konferencii, g. Brjansk, 21–23 sentjabrja 2015 g. – Brjansk: BGTU. – 2015. – S. 170–172.
3. La Roux K. Gillespie. Leaders Who have made a difference in Deburring / La Roux K. Gillespie // Deburring Technology International. – Kansas City, Missouri. – 2004. P. 1–17.
4. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: Izdatelskij centr DGTU, 2008. – 694 s.
5. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno–zachistnoj obrabotki detaej / A.P. Babchiev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi, G.A. Prokopec, S.N. Hudolej, D.N. Kravchenko. – Rostov–n/D: Izdatelskij centr DGTU, 2010. – 209 s.

Babichev Anatoly Prokofievich
DSTU,
doctor technical sciences, professor,
faculty «Machine building
technology», c. Rostov on Don,
344000, sq.Gagarin, 1,
Ph. (863)2–738–513
E-mail: vibrotech@mail.ru

Motrenko Petr Danilovich
DSTU,
doctor technical sciences, professor,
faculty «Machine building
technology», c. Rostov on Don,
344000, sq.Gagarin, 1,
Ph. (863)2–738–360,
E-mail: vibrotech@mail.ru

Babichev Igor Anatolievich
ZAO «Komtech–plus»,
general director,
c. Rostov on Don, st.
Budennovsky, 90

Я.И. СОЛЕР, НГУЕН МАНЬ ТИЕМ

ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ 13Х15Н5АМ3 ПРИ ШЛИФОВАНИИ НИТРИДБОРЫМИ КРУГАМИ ВЫСОКОЙ ПОРИСТОСТИ

Стochastic character of grinding of parts from high-strength corrosion-resistant steel 13Х15Н5АМ3 implies consideration of surface roughness as a random variable. Statistical methods do not allow predicting quality of surface roughness simultaneously for all parameters. Due to this reason, innovation direction of this research became application of MATLAB software. It allowed to develop fuzzy logic, which is realized by modeling in MATLAB. This logic allows to analyze a large number of variables of grinding process and expand its knowledge.

Ключевые слова: маятниковое шлифование, шероховатость, нечеткая логика, функция желательности.

Шлифование является процессом окончательной обработки ответственных высоконагруженных деталей. Его эффективность оценивается большим количеством показателей, среди которых шероховатость является одной из важнейших характеристик инженерии поверхности [1]. Она характеризуется большим количеством стандартизованных параметров [2]: R_a , R_q , R_z , R_{max} , S , S_m , t_p , $p=5\text{--}95\%$, многие из которых коррелированы между собой, но трудно поддаются качественной оценке с высокой точностью. Таким образом, физические модели получить не представляется возможным, а их экспериментальные аналоги не могут быть исчерпывающими и характеризуются ограниченной применяемостью. По этой причине решено привлечь нечеткую логику, позволяющую проанализировать большое количество переменных шлифования и расширить познания процесса.

Нечеткая логика относится к перспективному направлению в кибернетике, которое предложено и развито L. A. Zadeh [3]. Нечеткая логика равнозначна теории нечетких множеств A_l , т.е. классов с размытыми границами, представленными совокупностями упорядоченных пар, составленных из элементов y_l универсальных множеств $\{y_{lv}\}$ и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(y_l)$:

$$A_l = \{(y_{lv}, \mu_A(y_{lv})) | y_{lv} \in \{y_{lv}\}\}, \quad v = \overline{1, n}.$$

В данном исследовании использованы нечеткие модели для выбора характеристики высокопористого круга (ВПК) из кубического нитрида бора (CBN) при маятниковом шлифовании плоских деталей из высокопрочной коррозионной стойкой стали 13Х15Н5АМ3 (ВНС-5): $\sigma_e = 1390 - 1650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150$ МПа, $\delta = 15\%$, $\psi = 55\%$, $E = 220$ ГПа [4] – и широко используется в ответственных деталях летательных аппаратов, подверженных атмосферному воздействию.

Методы интерпретации экспериментальных данных при шлифовании. Для реализации концепции нечеткой логики используются экспериментальные данные, полученные при шлифовании периферией ВПК. Особенность данного процесса заключается в том, что абразивные зерна в инструменте имеет произвольную форму, хаотическое расположение в связке, разновысотность в радиальном направлении, различное количество активных зерен и режущих кромок на единицу площади его контакта при врезании в заготовку. Изложенное позволяет рассматривать наблюдения непрерывными случайными величинами (СВ) и их поведение оценивать на базе теоретико-вероятностных подходов. Реализация данной концепции предполагает представление экспериментальных данных в виде независимых множеств $l = \overline{1; k}$:

$$\{y_{lv}\}, \quad v = \overline{1; n}, \quad (1)$$

где v – количество параллельных опытов, которые желательно проводить с равным n .

Статистические методы разделяются на две группы: параметрическую и непараметрическую, в частности ранговую. Каждая из них имеет «свое поле» [5] для эффективного применения. В первом случае необходимо обеспечить выполнение двух ограничений, накладываемых на СВ: однородность дисперсий отклонений и нормальность

распределений. Изложенные требования при шлифовании чаще всего нарушаются в той или иной мере, что может сопровождаться значимым смещением оценок, доверительных границ и коэффициентов доверия. На практике этот метод приходится иногда применять и в тех ситуациях, когда (1) не удовлетворяют изложенным требованиям. Тогда оценки СВ, их доверительных границ нуждаются в уточнении. Для этого целесообразно использовать непараметрический метод, который не связан с конкретным семейством распределений и не использует его свойств. Случайные величины оцениваются следующими одномерными распределениями частот [5–8]:

– мерами положения (опорными значениями):

$$\text{средними } \bar{y}_l = y_{l..}, \quad (2)$$

$$\text{медианами } \tilde{y}_l; \quad (3)$$

– мерами рассеяния (прецизионностью):

$$\text{стандартами отклонений } SD_l, \quad (4)$$

$$\text{размахами } R_l = (y_{max} - y_{min})_l, \quad (5)$$

$$\text{квартильными широтами } KШ_l = (y_{0,75} - y_{0,25})_l. \quad (6)$$

Из теоретической статистики известно, что на одномерных распределениях частот (2), (4) и (5) базируется параметрический метод, а на (3), (6) – ранговые статистики. Принятие нуль-гипотез (H_0) относительно однородности дисперсий отклонений и нормальности распределений рассмотрено в [9, 10]. Для снижения трудоемкости статистических расчетов в работе привлечена программа Statistica 6.1.478.0.

Натурные опыты проведены при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок модели ЗЕ711В; круги формы 1А1 с размерами $200 \times 20 \times 76 \times 5$ мм (ГОСТ Р 53923–2010), технологические параметры – скорость резания $v_k = 28$ м/с, продольная подача $s_{np} = 6$ м/мин, поперечная подача $s_n = 4$ мм/дв.ход, глубина резания $t=0,01$ мм, операционный припуск $z=0,1$ мм, СОЖ–5%–ая эмульсия АквоЛ–6 (ТУ 0258–024–0014842–98), подаваемая поливом на заготовку в количестве 7–10 л/мин; число дублирующих опытов в (1) – $n=30$. Объект исследования – образцы из стали ВЧС–5 с размерами $B \times L \times H = 70 \times 40 \times 50$ мм, шлифуемые по торцу $B \times L$. В условиях эксперимента переменные «lv» в (1) трансформированы к виду «div». Индекс $i = \overline{1; 8}$ отражает характеристики ВПК: 1–CBN30 B76 100 OVK27–КФ40; 2–CBN30 B107 100 OVK27–КФ40; 3–CBN30 B107 100 0VC10–КФ40; 4–CBN30 B126 100 OVK27–КФ40; 5–CBN30 B126 100 MVK27–КФ40; 6–CBN30 B126 100 LVK27–КФ40; 7–CBN30 B126 100 LVK27–КФ25; 8–CBN30 B151 100 OVK27–КФ40 (ГОСТ Р 53922–2010, ГОСТ Р 53923–2010). Параметры шероховатости R_a, R_z, R_{max}, S и $S_m, t_p, p=5\text{--}95\%$ – измерены на профилографе–профилометре модели 252 завода «Калибр» в двух взаимно ортогональных направлениях $d = \overline{1; 2}$ соответственно по векторам: $s_n (R_{a1}, R_{z1}, R_{max1} \text{ и т.д.})$ и $s_{np} (R_{a2}, R_{z2}, R_{max2} \text{ и т.д.})$.

Реализация процесса моделирования нечеткой логики для (2)–(6) проведена в среде *MATLAB* с использованием специального пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. Последний обладает простым и хорошо продуманным интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечеткие модели [11–14]. Для оценки качества шероховатости деталей использована функция желательности d , предложенная Харрингтоном [15]. В основе ее построения лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную функцию желательности или предпочтительности, которая относится к психофизическим шкалам. Её назначение – установление соответствия между физическими и психологическими параметрами. Здесь под физическими параметрами понимаются возможные величины откликов, характеризующие функционирование исследуемого объекта. В условиях эксперимента назначение шкалы желательности: установление соответствия между полученными значениями показателей качества поверхности и их оценками желательности.

Уменьшение исследуемых параметров шероховатости сопровождается ростом эксплуатационных показателей деталей машин [1]. В связи с изложенным акцент в задаче нечеткой логики при поиске характеристики ВПК сделан на снижение их наибольших величин из двух возможных сечений. По микронеровностям априори известно, что наибольшие высотные параметры расположены в направлении поперечной подачи (R_{a1}, R_{max1} и др.), а шаговые: S_2 и особенно S_{m2} – по вектору s_{np} . Относительно опорных длин профиля: $t_p, p=5\text{--}95\%$ известно, что при переменных условиях шлифования они остаются

постоянными и связаны исключительно с расположением сечения p относительно вершины выступа микронеровности R_{max1} [1]. По этой причине они исключены из многокритериальной оптимизации процесса шлифования. Она проведена по трем параметрам: R_{a1} , R_{max1} и S_{m2} , которые считаются наиболее значимыми в обеспечении надежности и долговечности машин.

Тестирование (1) на однородность дисперсий отклонений проведено по трем группам критериев: Хартли, Кохрена, Бартлетта (в программе объединены в одну совокупность); Левене; Брауна – Форсайта. Оно показало, что H_0 относительно гомогенности (1) на 5%–ом уровне значимости приняты по всем параметрам. Менее удовлетворительными получены результаты проверки нормальности распределений по критерию Шапиро–Уилка (таблица 1), для которого H_0 принимаются при выполнении неравенств: $\alpha_{di} > 0,5$, где α_{di} – надежность принятия H_0 для параметров шлифования: $(R_{1a}, R_{1max}, S_{m2})_i, i = \overline{1; 8}$.

Таблица 1 – Проверка нормальности распределений по критерию Шапиро – Уилка.

Параметр	Расчетный уровень значимости α_{di} при переменных $i = \overline{1; 8}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
R_{a1i}	0,8694	0,3145	0,0000	0,9957	0,1508	0,0905	0,5340	0,0000
R_{max1i}	0,1806	0,5806	0,0000	0,3050	0,1453	0,4571	0,4762	0,0000
S_{m2i}	0,0000	0,0116	0,0012	0,0104	0,0174	0,0883	0,0091	0,0290

Как видно из таблицы 1, нормальные распределения выявлены только в трех случаях, которые подчеркнуты, из 24–ех анализируемых. В условиях нарушений нормальности распределений (1) оправданным оказалось привлечение рангового метода статистики с его одномерными распределениями частот (3) и (6). При моделировании в среде MATLAB принято рассматривать входными данными параметры, которые представлены в таблице 2 по результатами эксперимента и интерпретации в программе *STATISTICA 6.1.478.0*.

Таблица 2 – Входные данные качества поверхности деталей для моделирования нечеткой логики.

Круг $i = \overline{1; 8}$	Параметры качества					
	R_{a1i} , мкм		R_{max1i} , мкм		S_{m2i} , мкм	
	\tilde{y}	КШ	\tilde{y}	КШ	\tilde{y}	КШ
1	0,575 (0,63)	0,070	3,451 (4,0)	0,544	97,102 (100)	47,434
2	0,584 (0,63)	0,119	3,325 (4,0)	0,443	96,746 (100)	57,239
3	0,569 (0,63)	0,099	3,282 (4,0)	0,519	91,628 (100)	45,998
4	0,407 (0,50)	0,094	2,441 (2,5)	0,409	82,714 (100)	41,813
5	0,802 (0,100)	0,107	4,556 (5,0)	1,086	109,239 (125)	62,861
6	0,617 (0,63)	0,158	3,704 (4,0)	0,753	88,518 (100)	45,807
7	0,635 (0,80)	0,103	3,742 (4,0)	0,523	97,217 (100)	50,952
8	0,488 (0,50)	0,079	2,979 (3,2)	0,488	78,400 (80)	35,440

Примечание. ВПК i 1–CBN30 B76 100 OVK27–КФ40; 2–CBN30 B107 100 OVK27–КФ40; 3–CBN30 B107 100 OVC10–КФ40; 4–CBN30 B126 100 OVK27–КФ40; 5–CBN30 B126 100 MVK27–КФ40; 6–CBN30 B126 100 LVK27–КФ40; 7–CBN30 B126 100 LVK27–КФ25; 8–CBN30 B151 100 OVK27–КФ40; в скобках стоят КВ [16].

Методы статистики не позволяют вести анализ качества шлифованной поверхности в ситуации, когда каждый из параметров шероховатости представлен двумя одномерными распределениями частот (1), например, в данном случае (3) и (6). Сказанное является существенным недостатком статистических методов. В частности, по данным таблицы (2) при изучении параметра R_{a1i} выявлено, что наилучшими ВПК являются: CBN30 B126 100 OVK27–КФ40 ($i=4$) – по медиане $\tilde{y} = 0,407$ (0,50) мкм и CBN30 B76 100 OVK27–КФ40 ($i=1$) – по КШ = 0,07 мкм, где в скобках указана категориальная величина (КВ) шероховатости [16]. В такой ситуации на практике всегда возникает вопрос, какой из ВПК целесообразнее выбрать для повышения качества шлифованных деталей ВНС –5. Чаще всего подобная ситуация разрешается в пользу меры положения, которая ближе и понятнее для заводских инженеров. Обсуждаемая проблема усугубляется, когда оптимизация процесса шлифования ведется по нескольким переменным, как в нашем случае по трем. Подводя итоги, решено в данном исследовании апробировать метод нечеткой логики, позволяющий создать

экспертную систему классификации ВПК по комплексу изучаемых параметров. В этом случае на вход модели подаются атрибуты шероховатости ($R_{a1}, R_{max1} \text{ и } S_{m2}$) $_i$, $i = \overline{1;8}$, полученные по (3), (6). Ее выходом служат оценки качества деталей из стали 13Х15Н5АМ3, представленные переменной в виде функции желательности d_i [15], рост которой характеризует повышение эффективности процесса шлифования (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты нечеткой логики по выбору характеристики ВПК по отдельным исследуемым параметрам.

Круг $i = \overline{1;8}$	Функция желательности d_i по шероховатостям		
	R_{a1i}	R_{max1i}	S_{m2i}
1	0,891	0,810	0,499
2	0,499	0,889	0,191
3	0,586	0,870	0,526
4	0,874	0,892	0,878
5	0,181	0,108	0,108
6	0,108	0,486	0,582
7	0,523	0,778	0,490
8	0,882	0,874	0,892

Примечание. 1–CBN30 B76 100 OVK27–КФ40; 2–CBN30 B107 100 OVK27–КФ40; 3–CBN30 B107 100 OVC10–КФ40; 4–CBN30 B126 100 OVK27–КФ40; 5–CBN30 B126 100 MVK27–КФ40; 6–CBN30 B126 100 LVK27–КФ40; 7–CBN30 B126 100 LVK27–КФ25; 8–CBN30 B151 100 OVK27–КФ40

По результатам моделирования в среде MATLAB для отдельных параметров шероховатости представляет интерес проанализировать, как изменились приоритеты по выбору ВПК по сравнению с непараметрическими прогнозами по (3) и (6). В первую очередь обратимся к среднему арифметическому отклонению профиля, рассмотренному нами ранее на базе теоретико–вероятностных подходов. Как видно из таблицы 3, по результатам моделирования наилучшие результаты показаны при шлифовании деталей ВНС–5 кругом CBN30 B76 100 OVK27–КФ40 ($i=1$). Решающую роль в присуждении ему первого места сыграли самые низкие КШ = 0,07 мкм. На второй позиции нечеткая логика расположила ВПК CBN30 B151 100 OVK27–КФ40 ($i=8$) с самыми крупными зернами, решающую роль в котором сыграли сравнительно небольшие по совокупности (3) и (6): $\tilde{R}_{a18} 0,488(0,50)$ и $K\text{Ш}_{18} = 0,079$ мкм. Круг $i=4$, обеспечивающий минимальное опорное значение $\tilde{R}_{a14} 0,407(0,50)$, опустился на третью позицию в результате недостаточной воспроизводимости процесса. В то же время по наибольшей высоте профиля наилучшие результаты по качеству поверхности обеспечил ВПК $i=4$, а по S_{m2} – ВПК $i=8$. Таким образом, требуется проведение второго этапа моделирования нечеткой логики по комплексной оценке влияния ВПК $i = \overline{1;8}$ на снижение (3) и (6) одновременно для всех изучаемых микронеровностей. С этой целью создана новая модель, включающая 4 переменных: три входные и одно выходное (рисунок 1). Значение каждой переменной входа представлено числовым интервалом [0; 1], а его разбивка на четыре категории качества отражена в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры входа при поиске оптимального ВПК по комплексной оценке качества шлифованных деталей из стали 13Х15Н5АМ3.

Вид оценки	Параметры входа		
лингвистическая	плохой	нормальный	хороший
числовая	[0,1; 0,5]	[0,1; 0,5; 0,5; 0,9]	[0,5; 0,9]

Функция принадлежности для выходной переменной «оценка» представлена пятью классами качества шлифованных деталей: таблица 5, рисунок 2.

Таблица 5 – Параметры «Оценка» при поиске оптимального ВПК по комплексной оценке качества шлифованных деталей.

Вид оценки	Параметры выходов				
лингвистическая	очень плохо	плохо	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо
числовая d	[0,0; 0,2)	[0,2; 0,37)	[0,37; 0,63)	[0,63; 0,80)	[0,8; 1,00]



Рисунок 1 – Функции принадлежности для выходной переменной «Вывод» при решении задачи поиска оптимального ВПК по комплексной оценке шероховатости

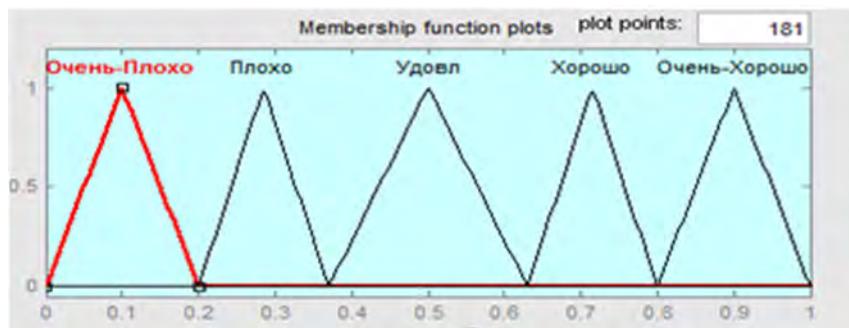


Рисунок 2 – Функции принадлежности для выходной переменной «Оценка» при решении задачи поиска оптимального ВПК по комплексной оценке качества деталей

Правила нечетких рассуждений для разработанной системы включают $N = 3 \times 3 \times 3 = 27$ возможных сочетаний выходных параметров. В таблице 6 представлены все нечеткие правила для системы классификации качества деталей.

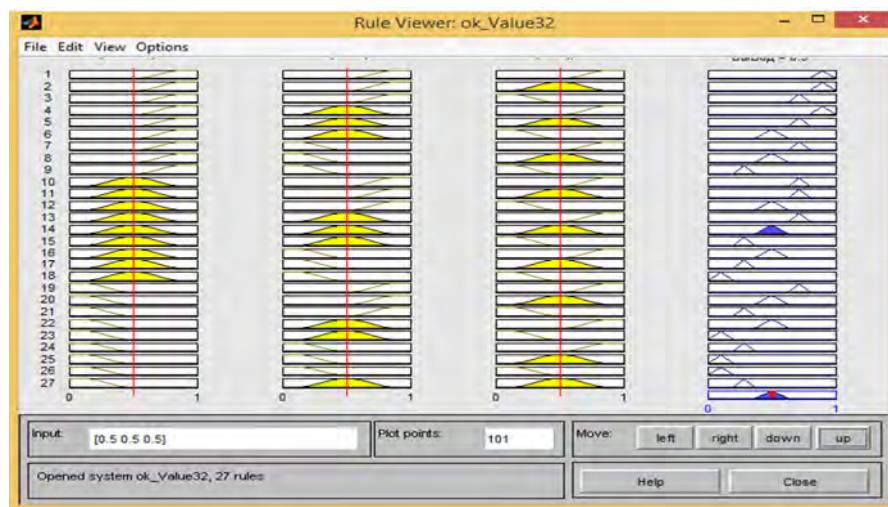
Таблица 6 – Нечеткие правила для системы классификации деталей.

Вариант	R_{a1}	R_{max1}	S_{m2}	Вывод
1	хороший	хороший	хороший	очень хорошо
2	хороший	хороший	нормальный	очень хорошо
3	хороший	хороший	плохой	хорошо
4	хороший	нормальный	хороший	очень хорошо
5	хороший	нормальный	нормальный	хорошо
6	хороший	нормальный	плохой	удовлетворительно
7	хороший	плохой	хороший	хорошо
8	хороший	плохой	нормальный	удовлетворительно
9	хороший	плохой	плохой	плохо
10	нормальный	хороший	хороший	хорошо
11	нормальный	хороший	нормальный	хорошо
12	нормальный	хороший	плохой	удовлетворительно
13	нормальный	нормальный	хороший	хорошо
14	нормальный	нормальный	нормальный	удовлетворительно
15	нормальный	нормальный	плохой	плохо
16	нормальный	плохой	хороший	удовлетворительно
17	нормальный	плохой	нормальный	плохо
18	нормальный	плохой	плохой	очень плохо
19	плохой	хороший	хороший	хорошо
20	плохой	хороший	нормальный	удовлетворительно
21	плохой	хороший	плохой	плохо
22	плохой	нормальный	хороший	удовлетворительно
23	плохой	нормальный	нормальный	плохо
24	плохой	нормальный	плохой	очень плохо
25	плохой	плохой	хороший	плохо
26	плохой	плохой	нормальный	очень плохо
27	плохой	плохой	плохой	очень плохо

В пакете Fuzzy Logic Toolbox существует графический интерфейс, который помогает

пользователю упростить просмотр правила рассуждений (Rule Viewer). Используя графический формат, выявлены все возможные упрощения. Сказанное позволило предсказать выходную переменную – вывод. Каждое изменение свойства детали отображается в просмотре правил вывода, соответственно видоизменяя его.

На рисунке 3 представлен просмотр правил вывода при комплексном анализе качества шлифованных деталей.



*Рисунок 3 – Просмотр правил вывода «оценка»
при комплексном анализе качества шлифованных деталей*

Полученные результаты моделирования нечеткой логики при комплексной оценке микрорельефа поверхности деталей из стали 13Х15Н5АМ3 представлены в таблице 7.

Моделирование нечеткой логики позволило установить, что ВПК СВН30 В126 100 ОВК27–КФ40, СВН30 В151 100 ОВК27–КФ40 и СВН30 В76 100 ОВК27–КФ40 в наибольшей мере обеспечивают комплексное снижение мер положения и рассеяния по всем исследуемым параметрам шероховатости, при этом ВПК расположены в последовательности снижения качества деталей. Следует констатировать, что результаты моделирования в значительной мере коррелированы с материалом детали, даже если он входит в одну группу обрабатываемости шлифованием с исследуемой сталью ВНС–5. Так, при шлифовании деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ–Ш в аналогичных условиях наилучшие результаты моделирования шероховатости достигнуты ВПК СВН30 В151 100 ОВК27–КФ40, а при зернистости В126 они оказались наихудшими [17].

Таблица 7 – Влияние ВПК на комплексную оценку качества деталей.

Круг $i = 1; 8$	d_i	Вывод
1–СВН30 В76 100 ОВК27–КФ40	0,8732	Очень хороший
2–СВН30 В107 100 ОВК27–КФ40	0,7141	Хороший
3–СВН30 В107 100 ОВС10–КФ40	0,7402	Хороший
4–СВН30 В126 100 ОВК27–КФ40	0,8968	Очень хороший
5–СВН30 В126 100 МВК27–КФ40	0,1010	Очень плохой
6–СВН30 В126 100 LVK27–КФ40	0,2845	Плохой
7–СВН30 В126 100 LVK27–КФ25	0,6427	Хороший
8–СВН30 В151 100 ОВК27–КФ40	0,8936	Очень хороший

Нечеткая логика позволила выявить дополнительные резервы повышения качества шлифованных деталей из стали ВНС–5 и предсказать новую характеристику ВПК, которая в таком сочетании не представлена в проведенном исследовании:

- Снижение размеров порообразующей в виде фруктовой косточки с 0,4 мм ($i=6$) до 0,25 мм ($i=7$) позволило повысить функцию желательности с 0,2845 до 0,6427, т.е. не менее двух раз.
- Замена связки К27 ($i=2$) на С10 ($i=3$) также обеспечило повышение качества поверхности, но в меньшей мере по сравнению с порообразующей: функция d возросла от 0,7141 до 0,7402.

• Используемая в большинстве ВПК степень твердости О (среднетвердая) оказалась самой оптимальной по сравнению с L (среднемягкой) и особенно с M (средней). В последнем случае функция предпочтительности снизилась в девять раз.

По результатам моделирования предложена новая характеристика ВПК CBN30 B151 100 O VC10–КФ25, позволяющая повысить качество шлифуемых деталей.

Выводы:

1. Шероховатость поверхности является важным фактором в оценке инженерии поверхности деталей. Она характеризуется большим количеством стандартизованных параметров, которые оцениваются мерами положения и рассеяния. Это затрудняет выбор оптимальных характеристик кругов с использованием методов статистики.

2. В условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений экспериментальных данных для реализации нечеткой логики оправданным оказалось привлечение непараметрических оценок мер положения и рассеяния, к которым относятся медианы \tilde{y} и квартильные широты КШ.

3. По результатам моделирования нечеткой логики в среде MATLAB при использовании исследуемых ВПК наилучшие результаты по комплексной оценке шероховатости при шлифовании деталей из стали 13Х15Н5АМ3 показаны следующими инструментами: CBN30 B126 100 OVK27–КФ40, CBN30 B151 100 OVK27–КФ40 и CBN30 B76 100 OVK27–КФ40. Использование данных кругов позволяет повысить эффективность робастного проектирования шлифовальных операций, поскольку поиск базовых моделей множественного дисперсионного анализа ведется инструментами оптимальной характеристики.

4. Частные решения нечеткой логики позволили выявить дополнительные резервы повышения качества шлифованной поверхности, для чего предложено следуют использовать ВПК CBN30 B151 100 O VC10–КФ25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения; введ. 01.01.1983. М.: Изд–во стандартов, 1982. – 20 с.
3. Zadeh, L.A. Fuzzy logic / L.A. Zadeh // IEEE Transactions on Computers. – 1988. – vol. 21. – № 4. – pp. 83–93.
4. Балла, О.М. Фрезы и фрезерование / О.М. Балла, Ю.И. Замащиков, О.П. Лившиц и др. – Иркутск: Изд–во ИрГТУ, 2009. – 172 с.
5. Hollander, M. Nonparametric statistical methods, Second Edition / M. Hollander, D.A. Wolfe. – Wiley–Interscience, 1999. – 787 р.
6. ГОСТ 5725–2–2012. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основой метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введен 2002–01–11. – М.: Изд–во стандартов, 2002. – 58 с.
7. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
8. Уиллер, Д. Статистическое управление процессами / Д. Уиллер, Д. Чамберс. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 469 с.
9. Солер, Я.И. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора / Я.И. Солер, А.В. Прокопьева // Обработка металлов (технология, оборудование и инструменты). – 2009. – № 1(42). – С. 24–27.
10. Soler, Ya.I. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness / Ya.I. Soler, D.Yu. Kazimirov // Russian engineering research. – 2010. – vol.30. – № 3. – P 251–261.
11. Ali, Y.M. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel / Y.M. Ali, L.C. Zhang. – Int J Mach Tool Manu 44, 2004. – 563 р.
12. Вятченин, Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации: Монография / Д.А. Вятченин. – Минск: УП Технопринт, 2004. – 219 с.
13. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М. Радио и связь, 1982. – 432 с.
14. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 736 с.
15. Harrington, E.C. The desirability function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – vol 21. – pp. 494–498.
16. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры характеристики и обозначения; введ. 01.11.1975 г, взамен ГОСТ 2789–1959. М.: – Изд–во стандартов, 1978. – 10 с.
17. Солер, Я.И. Поиск оптимальной зернистости нитридборовых кругов при плоском шлифовании деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ–Ш по микрорельефу поверхности в условиях моделирования нечеткой логики / Я.И. Солер, М.Т. Нгуен // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 6. – С 96–111.

Солер Яков Иосифович

ФГБОУ ВО Иркутский национальный
исследовательский технический университет
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: solera@istu.irk.ru

Нгуен Мань Тиен

ФГБОУ ВО Иркутский национальный
исследовательский технический университет
Аспирант
E-mail: nguyenmanhtiemhn@gmail.com

Ya.I. SOLER, M.T. NGUYEN

OPTIMIZATION OF SURFACE MICRORELIEF FLAT PARTS MADE OF CORROSION-RESISTANT STEEL 13H15N5AM3 GRINDING WITH COMMUNITY NITRIDBORYMI HIGH POROSITY

The stochastic character of the grinding of parts from 13H15N5AM3 high-strength corrosion-resistant steel 13H15N5AM3 involves consideration of the roughness of random variables, which are characterized by measures position and dispersion. Statistical methods cannot predict the quality of roughness simultaneously on a set of these parameters. For this reason, innovative direction of this study was to attract the fuzzy logic implemented the modeling in environment MATLAB. It is possible to develop characterization of high-performance wheel – CBN 30 B151 100 O VC10-KF25.

Keywords: pendulum grinding, roughness, statistics, fuzzy logic, desirability function.

BIBLIOGRAPHY

1. Suslov, A.G. Inzheneriya poverkhnosti detaley / A.G. Maslov, V.F. Bezyazychnyy, YU.V. Panfilov i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 2008. – 320 s.
2. GOST 25142–82. Sherokhovatost poverkhnosti. Terminy i opredeleniya; vved. 01.01.1983. M.: Izd–vo standartov, 1982. – 20 s.
3. Zadeh, L.A. Fuzzy logic / L.A. Zadeh // IEEE Transactions on Computers. – 1988. – vol. 21. – № 4. – P. 83–93.
4. Balla, O.M. Frezy i frezerovaniye / O.M. Balla, YU.I. Zamashchikov, O.P. Livshits i dr. – Irkutsk: Izd–vo IrGTU, 2009. – 172 s.
5. Hollander, M. Nonparametric statistical methods, Second Edition / M. Hollander, D.A. Wolfe. – Wiley–Interscience, 1999. – 787 p.
6. GOST 5725–2–2012. Tochnost (pravilnost i pretsizionnost) metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast 2. Osnovoy metod opredeleniya povtoryayemosti i vosproizvodimosti standartnogo metoda izmereniy. Vveden 2002–01–11. – M.: Izd–vo standartov, 2002. – 58 s.
7. Zaks, L. Statisticheskoye otsenivaniye / L. Zaks. – M.: Statistika, 1976. – 598 s.
8. Uiller, D. Statisticheskoye upravleniye protsessami / D. Uiller, D. Chambers. – M.: Alpina Biznes Buks, 2009. – 469 s.
9. Soler, YA.I. Issledovaniye vliyaniya vykhazhivaniya na mikrorelyef plastin R9M4K8 pri shlifovanii krugami iz kubicheskogo nitrida bora / YA.I. Soler, A.V. Prokopyeva // Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovaniye i instrumenty). – 2009. – № 1(42). – S. 24–27.
10. Soler, Ya.I. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness / Ya.I. Soler, D.Yu. Kazimirov // Russian engineering research. – 2010. – vol.30. – № 3. – P 251–261.
11. Ali, Y.M. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel / Y.M. Ali, L.C. Zhang. – Int J Mach Tool Manu 44, 2004. – 563 p.
12. Vyatchenin, D.A. Nechetkiye metody avtomaticheskoy klassifikatsii: Monografiya / D.A. Vyatchenin. – Minsk: UP Tekhnoprint, 2004. – 219 s.
13. Kofman, A. Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv / A. Kofman. – M. Radio i svyaz, 1982. – 432 s.
14. Leonenkov, A.V. Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i FuzzyTech / A.V. Leonenkov. – SPb.: BKHV–Peterburg, 2005. – 736 s.
15. Harrington, E.C. The desirability function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – vol 21. – P 494–498.
16. GOST 2789–73. Sherokhovatost poverkhnosti. Parametry kharakteristiki i oboznacheniya; vved. 01.11.1975 g, vzamen GOST 2789–1959. M.: – Izd–vo standartov, 1978. – 10 s.
17. Soler, YA.I. Poisk optimalnoy zernistosti nitridborovykh krugov pri ploskom shlifovanii detaley iz stali 06KH14N6D2MVT–SH po mikrorelyefu poverkhnosti v usloviyakh modelirovaniya nechetkoy logiki / YA.I. Soler, M.T. Nguyen // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroyeniye». – 2015. – № 6. – С 96–111.

Soler Yakov Iosifovich

FGBOU PO Irkutsk National Research Technical University
Candidate of Technical Sciences, associate professor
E-mail: solera@istu.irk.ru

Nguyen Manh Tiem

FGBOU PO Irkutsk National Research Technical
University
Postgraduate
E-mail: nguyenmanhtiemhn@gmail.com

Ю.А. ЦЕХАНОВ, С.Е. ШЕЙКИН, Д.В. КАРИХ, Д.А. СЕРГАЧ

МОДИФИКАЦИЯ НАКАТЫВАНИЕМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАГОТОВКИ ПЕРЕД ТЕРМОДИФУЗИОННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ

В статье описана комплексная обработка сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека из технически чистого титана. Исследован метод упрочнения поверхности заготовки накатыванием плоским инструментом. Предложена методика оценки накопленных деформаций поверхностью заготовки за весь цикл обработки. Представлены результаты моделирования накатывания методом конечных элементов в программном комплексе Deform-3D.

Ключевые слова: моделирование, накатывание, микроструктура, микротвердость, сферическая заготовка.

Имплантаты из чистого титана отвечают повышенным требованиям биосовместимости и находят обширное применение в протезировании. Однако, из-за невысоких механических свойств, использовать технически чистый титан в его исходном состоянии для изготовления долговечных пар трения не представляется возможным. Решить проблему износа можно повышением твердости поверхностей трения и снижением прочности адгезионных связей путем насыщения азотом поверхности сферической головки протеза. Для этого обеспечение долговечности сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава человека достигалось применением комплексной обработки.

Заготовка для термохимического насыщения должна отвечать определенным требованиям по точности и состоянию поверхностного слоя. Для интенсификации процесса насыщения в поверхностном слое заготовки необходимо сформировать мелкодисперсную структуру. Решить эту задачу удалось применением метода интенсивного пластического деформирования поверхности сферической заготовки накатыванием плоскими инструментами [1].

Процесс начинается с получения точением сферы диаметром $D_{ш}$ равным 28 мм из отожженного титанового прутка марки ВТ1-0. Поверхность полученной заготовки требуется упрочнить.

Заготовка (1) размещается в инструментальной камере (2) на удалении от ее боковой стенки. Внутренний диаметр камеры d составляет 180 мм. Сверху подводится прижим (3) в виде плоского диска, закрепленного в шпинделе сверлильного станка. Ось вращения прижима и ось цилиндрической стенки камеры имеют эксцентриситет e равный 8 мм. Диаметр D прижима должен обеспечивать постоянный контакт с заготовкой в зависимости от выбранного эксцентриситета и диаметра камеры. Зазор между камерой и прижимом H составляет одну треть от диаметра заготовки $D_{ш}$ (рисунок 1).

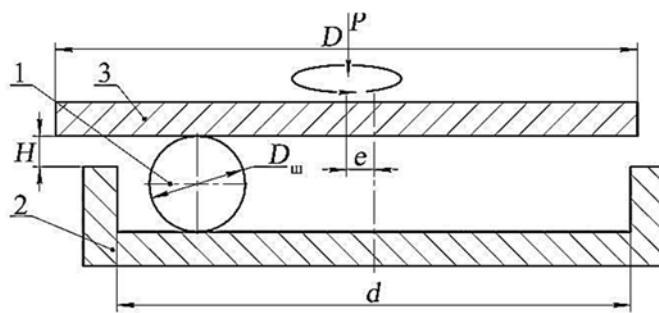


Рисунок 1 – Схема процесса накатывания

Вращение прижима со скоростью 351 об/мин обеспечивает перемещение заготовки в камере, а деформирование поверхности сферы обеспечивается за счет создания вертикальной подачей усилия P . Равномерность обработки поверхности достигается за счет

постоянного смещения следа деформационного упрочнения на протяжении всего процесса накатывания.

В результате обработки заготовки должен создаваться требуемый по глубине слой деформационного упрочнения с необходимыми параметрами твердости у его поверхности. Вопрос о выборе оптимального технологического усилия для обеспечения требуемой глубины слоя деформационного упрочнения рассматривался ранее [2]. Оптимальное технологическое усилие сжатия, создаваемое прижимом можно рассчитать по формуле:

$$P = 11,4 \cdot \sigma_t h^2,$$

где P – требуемое технологическое усилие, H ;

σ_t – предел текучести обрабатываемого материала заготовки, Мпа;

h – требуемая глубина слоя деформационного упрочнения, мм.

Твердость поверхности напрямую зависит от степени ее упрочнения. Для оценки накопленных деформаций поверхностью заготовки была предложена методика их расчета. Она заключается в предположении, что с каждым новым взаимодействием с инструментом деформация, накопленная этим участком поверхности, увеличивается каждый раз на равную величину Δe_{icp} . Количество таких взаимодействий m позволяет получить значение суммарных накопленных деформаций участком поверхности:

$$\sum e_i = m \cdot \Delta e_{icp},$$

где $\sum e_i$ – величина накопленных деформаций в конце обработки;

Δe_{icp} – величина среднестатистической деформации за один цикл обработки;

m – количество циклов обработки.

Определить параметр m для конкретной точки в ходе эксперимента не представляется возможным из-за стохастического характера процесса ее упрочнения. С другой стороны, если учесть равномерность обработки поверхности, можно предположить, что отношение площади следа от инструмента на поверхности заготовки к площади ее поверхности и будет требуемым значением. След на заготовке и инструменте по длине одинаков, а сама заготовка большую часть времени в процессе обработки движется вдоль цилиндрической стенки камеры по окружности. Учитывая характер перемещения заготовки в камере, получена формула для определения среднестатистического числа циклов обработки m :

$$m = \frac{n\tau(R_k - r_u - e)t_{cl}}{120 \cdot r_u^2},$$

где n – скорость вращения инструмента, об/мин;

τ – длительность обработки, с;

R_k – радиус камеры, мм;

r_u – радиус накатываемой сферы, мм;

e – эксцентриситет, мм;

t_{cl} – ширина контактного следа, мм.

Значение деформаций Δe_{icp} для одного цикла обработки сферы были получены в программном комплексе Deform-3D [3] путем моделирования процесса пластического деформирования при накатывании. Для проверки предлагаемой методики был выбран процесс накатывания сферической заготовки из сплава ВТ1-0. Усилие прижима составило 3000 H , а скорость вращения инструмента – 351 об/мин. Обработка производилась без использования охлаждающей жидкости, а время обработки составило 34 с.

Моделирование стохастического процесса накатывания нецелесообразно, так как требует очень большого времени. Для получения распределения деформаций в поверхностном слое после одного цикла обработки можно прибегнуть к упрощенной схеме деформирования по прямолинейной траектории (рисунок 2). Верхний инструмент создает выбранное технологическое усилие, а нижний – обеспечивает заготовке ту же скорость вращения, с которой она перемещается вдоль боковой стенки в ходе экспериментов.

В результате моделирования получено напряженно-деформированное состояние поверхности заготовки после одного цикла взаимодействия с инструментом. Ниже приведен след деформационного упрочнения поверхности (рисунок 3). На изображении приведены поперечный и продольный разрезы полученной модели, на которых хорошо виден характер распределения деформаций, как по глубине слоя (рисунок 4, а), так и по ширине пластической области (рисунок 4, б).

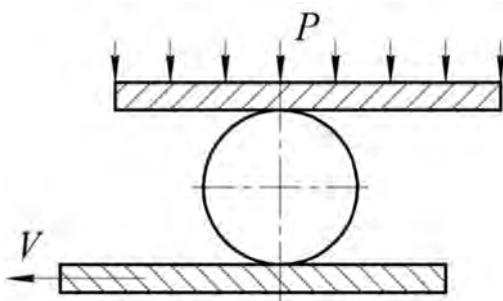


Рисунок 2 – Схема прямолинейного накатывания

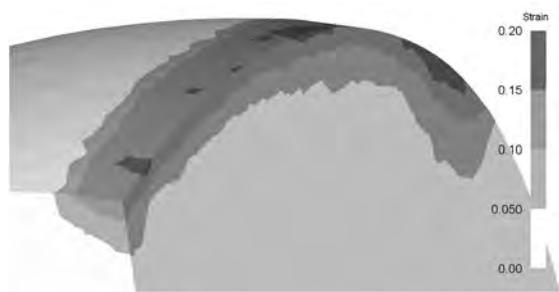


Рисунок 3 – Распределение деформаций в поверхностном слое заготовки после одного цикла обработки

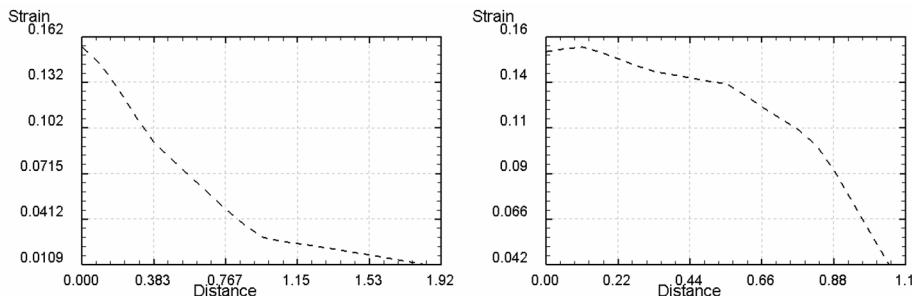


Рисунок 4 – Распределение деформаций по глубине слоя (а)
и распределение деформаций по ширине пластической области (б)

График распределения деформаций по ширине пластической области ограничивает под собой площадь, значение которой соответствует величине всех деформаций, накопленных на этом участке. Усредненное значение деформаций за один цикл тогда можно получить из:

$$\Delta e_{icp} = \frac{S_e}{t_{pl}},$$

где S_e – значение площади под кривой;

t_{pl} – ширина пластической области.

Таким образом, получим необходимые для подстановки в (2) значения усредненных деформаций за один цикл обработки и количество этих циклов. Расчет значений накопленных деформаций за весь период обработки производился, начиная с поверхности заготовки и до глубины затухания деформаций с шагом в 0,2 мм. Дальнейший перерасчет полученных значений деформаций на значения микротвердости с применением тарировочного графика для сплава ВТ1–0 позволил сопоставить экспериментально полученные значения с расчетными (рисунок 5).

Как видно, на самой поверхности значения микротвердости заметно разнятся. Такой эффект возникает за счет динамических нагрузок, появляющихся при искривлении формы сферы сдавливанием и возникновением на ее поверхности наплыва, а так же возможностью проскальзывания заготовки относительно инструмента. Циклическое образование наплыва и последующее сдавливание неровностей поверхности, им вызванных, в ходе обработки также увеличивает значение деформаций в самом тонком поверхностном слое. Начиная с глубины 0,2мм, расчетные и экспериментальные данные имеют незначительные различия, что говорит о возможности применения предложенной методики расчета. При этом, нужно иметь ввиду, что самый тонкий поверхностный слой удаляется финишной операцией полирования.

В результате обработки накатыванием в поверхностном слое заготовки получена мелкодисперсная структура деформационного происхождения. Связанное с этим повышение твердости также повышает износостойкость поверхностного слоя заготовки.

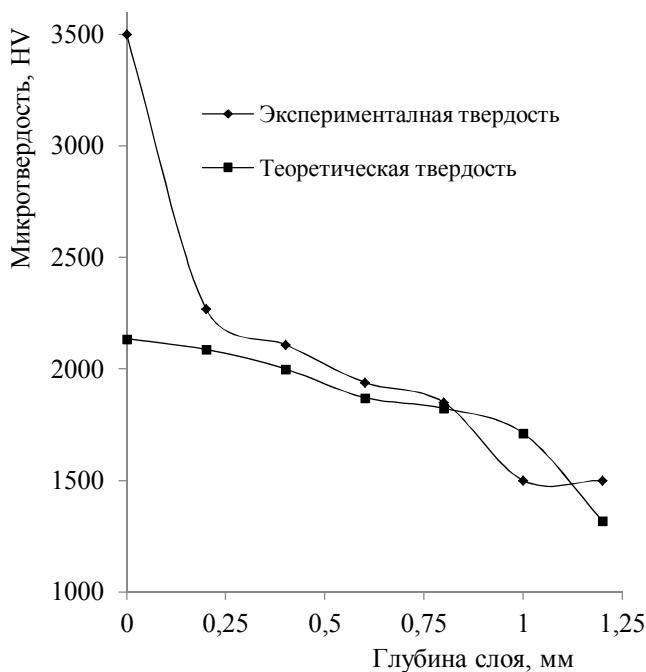


Рисунок 5 – Распределение твердости по глубине упрочнённого слоя заготовки

Дальнейшая обработка уже упрочненной заготовки направлена на снижение шероховатости поверхности и повышения геометрической точности конечной детали. Она заключается в поэтапной алмазной обработке со снижением зернистости инструмента по схеме свободной притирки [4]. Использование при абразивной обработке инструмента, содержащего мелкодисперсный алюмосиликатный наполнитель – монтмориллонит и порошки синтетических алмазов позволило избежать схватывания инструмента с поверхностью титана. Последующее полирование поверхности позволяет получать точность и шероховатость обработанной поверхности соответствующей требованиям ГОСТ Р ИСО 7206–2–2005.

После достижения требуемой геометрической точности производилась термохимическая обработка поверхности полученной детали. Для создания износостойкой поверхности применялась технология термодиффузионного азотирования (ТДА). Модификация структуры поверхностного слоя после накатывания благоприятным образом способствует увеличению глубины насыщения при азотировании.

Таким образом, стоит отметить эффективность предложенной технологии накатывания сферических заготовок плоскими поверхностями. В результате обработки поверхности заготовки образуется слой с субмикрокристаллической структурой деформационного происхождения. За счет этого слоя достигается увеличение твердости поверхности, а его мелкозернистая структура позволяет более эффективно насыщать поверхность азотом [5].

Применение компьютерного моделирования процесса накатывания в программном комплексе Deform-3D позволяет с достаточной точностью получить картину напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки. Использование данных моделирования процесса позволило выявить закономерности упрочнения поверхности сферы. На основе этих закономерностей получены зависимости, позволяющие выбирать оптимальные технологические параметры обработки, подтвержденные экспериментальным накатыванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2407622 Российская Федерация, МПК6 B24B039/00, Способ обработки сферических изделий поверхностным пластическим деформированием / Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А.; заявители и патентообладатели Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А. – 2009126405/02; заявл. 09.07.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. №2. – 1 с.
2. Цеханов, Ю.А. Упрочнение накатыванием шаровой опоры из чистого титана эндопротеза тазобедренного сустава человека / Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е., Карих Д.В., Сергач Д.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 4(100). – С. 21–23.

3. Цеханов, Ю.А. Моделирование деформационного упрочнения при накатывании сферической заготовки методом конченых элементов / Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е., Карих Д.В., Сергач Д.А. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 11–14.
4. Пат. № 61729 А Україна, 7 В 24 В 11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь та пристрій для його реалізації / М.В. Новіков, О.О. Розенберг, С.В. Сохань. Заявл. 09.04.2003; Опубл. 17.11.2003, Промислова власність, Бюл. №11.
5. Белый, А.В. Структура и триботехнические свойства субмикрокристаллического титана, модифицированного ионами азота / Белый А.В., Кукоренко В.А., Кононов А.Г. и др. // Трение и износ. – 2008. – № 6. – С. 571–577.

Цеханов Юрий Александрович

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
E-mail: tsekhanov@yandex.ru

Карих Дмитрий Владимирович

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж
Аспирант кафедры строительной механики
E-mail: karih_dm@mail.ru

Шейкин Сергей Евгеньевич

Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, г. Киев.
Доктор технических наук, профессор
E-mail: sheykin2003@ukr.net

Сергач Дмитрий Анатольевич

Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, г. Киев.
Младший научный сотрудник
E-mail: sergach_89@mail.ru

Yu.A. TSEKHANOV, S.Ye. SHEYKIN, D.V. KARIKH, D.A. SERGACH

MODIFICATION ROLLING SURFACE LAYER STRUCTURE PREPARATIONS BEFORE THERMODIFFUSION NITRIDED

In the article the complete machining of the spherical head of the human femoral endoprosthesis of commercially pure titanium is described. The method of consolidation of the workpiece surface by rolling a flat tool is researched. The method of evaluation of accumulated deformations over the entire surface of the workpiece machining cycle is proposed. The results of simulation rolling by finite element software package Deform-3D are presented.

Keywords: simulation, rolling, microstructure, micro-hardness, spherical workpiece.

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. 2407622 Rossiyskaya Federatsiya, MPK 6 B24B039/00, Sposob obrabotki sfericheskikh izdeliy poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem / Sheykin S.Ye., Tsekhanov YU.A.; zayaviteli i patentoobladateli Sheykin S.Ye., Tsekhanov YU.A. – 2009126405/02; zayavl. 09.07.2009; opubl. 25.01.2010, Byul. №2. – 1 s.
2. Tsekhanov, YU.A. Uprochneniye nakatyvaniyem sharovoy opory iz chistogo titana endoproteza tazobedrennogo sustava cheloveka / Tsekhanov YU.A., Sheykin S.Ye., Karikh D.V., Sergach D.A. // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2013. – № 4(100). – S. 21–23.
3. Tsekhanov, YU.A. Modelirovaniye deformatsionnogo uprochneniya pri nakatyvanii sfericheskoy zagotovki metodom konchenykh elementov / Tsekhanov YU.A., Sheykin S.Ye., Karikh D.V., Sergach D.A. // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 11–14.
4. Pat. № 61729 А Україна, 7 В 24 В 11/10. Спосіб обробки сферичних поверхонь та пристрій для їх реалізації / М.В. Новіков, О.О. Розенберг, С.В. Сохань. Заявл. 09.04.2003; Опубл. 17.11.2003, Промислова власність, Бюл. №11.
5. Belyy, A.V. Struktura i tribotekhnicheskiye svoystva submikrokristallicheskogo titana, modifitsirovannogo ionami azota / Belyy A.V., Kukorenko V.A., Kononov A.G. i dr. // Treniye i iznos. – 2008. – № 6. – S. 571–577.

Tsekhanov Yuriy Aleksandrovich

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Voronezh
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: tsekhanov@yandex.ru

Karikh Dmitriy Vladimirovich

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Voronezh
Post-graduate student of the department of structural mechanics
E-mail: karih_dm@mail.ru

Sheykin Sergey Yevgenyevich

Institute of superhard materials to them. Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev.
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: sheykin2003@ukr.net

Sergach Dmitriy Anatolyevich

Institute of superhard materials to them. Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev.
Junior Researcher
E-mail: sergach_89@mail.ru

В.А. ЛЕБЕДЕВ, Г.В. СЕРГА, А.А. КОЧУБЕЙ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГРАНУЛИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ В ВИБРОУДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Предложен методологический подход к моделированию процессов поверхностного пластического деформирования потоками свободнодвижущихся инденторов при обработке деталей динамическими методами ППД. Установлен критерий эффективной загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру, обеспечивающий стационарные виброударные колебания свободнодвижущихся инденторов в процессе обработки деталей. Показано, что структура принятой модели и введенные упрощения определяют перечень параметров, управляющих процессом ППД.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, свободнодвижущиеся инденторы, виброударная система, колебания, ударный импульс, модель.*

Важнейшим фактором, определяющим интенсивность процесса поверхностного пластического деформирования (ППД) и, следовательно, производительность операций упрочнения динамическими методами, является динамическое состояние обрабатывающей среды. В этой связи разработка методов моделирования и проектирования, эффективных по производительности технологических систем и средств их технологического оснащения является основной задачей при разработке операций упрочнения ППД. Решение этой задачи рассмотрим на примере моделирования наиболее распространенного в машиностроительной практике метода упрочняющей обработки ППД – виброударного упрочнения [1, 2].

Технологическая обработка этим методом может осуществляться как на вибростанках, создающим циркуляцию обрабатывающей среды, так и на вибростанках с возвратно–поступательным движением среды. Однако, как свидетельствует производственная практика, наибольший эффект от применения виброударного упрочнения достигается когда эту технологическую операцию выполняют на станках с возвратно–поступательным движением среды, у которых масса обрабатывающей среды в виде металлических сферических инденторов в один полупериод колебаний отбрасывается на поверхность детали, в другой полупериод отскочившие от детали инденторы возвращаются к активной стенке рабочей камеры. Такая обработка реализуется, например, при виброупрочнении лонжерона лопасти вертолета на станке с однокоординатной вибрацией, возбуждаемой парой движущихся навстречу дебалансных вибраторов. Амплитуда колебаний в подобных станках обычно назначается равной 10–25 мм на частоте 15–25 Гц. Таким образом, главной особенностью вибростанков для поверхностного упрочнения является высокая амплитуда колебаний их рабочей камеры при сравнительно невысокой частоте. На первый взгляд добиться той же скорости движения частиц среды (а большие ударные силы достигаются именно благодаря высокой скорости) можно путем увеличения частоты в соответствии с известным соотношением для амплитуды виброскорости:

$$v_a = 2\pi f A. \quad (1)$$

Это позволило бы значительно улучшить экологические характеристики процесса, т.к. схемы виброзащиты от высокоамплитудных низкочастотных шума и вибрации весьма сложны и дорогостоящи. Поэтому при проектировании операций ППД этим методом очень важно определить то оптимальное соотношение между амплитудой и частотой, при котором удается достичь требуемых высоких скоростей частиц массы загрузки, понизив амплитуду колебаний. Сделать это возможно на основе модельного описания технологического процесса, которое включало бы в себя основные явления, происходящие при обработке.

Причины того, что на практике более эффективны высокоамплитудные станки с разряженной массой загрузки, вытекают из теории виброударных систем. Виброударная система (ВУС) обычно состоит из одной или нескольких ударных пар – масс, периодически взаимодействующих друг с другом. Если движение в системе возбуждается колебаниями одной из масс, например, по закону:

$$X_i(t) = \sin(\omega t + \phi), \quad (2)$$

в системе могут возникнуть стационарные виброударные колебания с частотой, равной или в целое число раз меньшей, чем ω . В последнем случае режим виброударных колебаний называют кратным.

Особенностью виброударных систем является наличие не обязательно одного, а, возможно, нескольких стационарных режимов разной кратности. В результате исследований Я.Г. Пановко [3] установлено, что период устойчивых стационарных колебаний системы мало зависит от характера соударения звеньев, т.к. имеющиеся силы трения стабилизируют их движение. Результатом описания движения элементов ВУС является фазовое уравнение, которое практически всегда при гармоническом возбуждении типа (2) приводится к виду:

$$w_1 \sin \phi + w_2 \cos \phi = w_3, \quad (3)$$

где w_1, w_2, w_3 – функции параметров системы и возбуждения;

ϕ – фаза колебаний возбуждающего элемента, при которой происходит его соударение с соседним звеном.

Из исследованных в настоящее время 3 десятков моделей виброударных систем, рассмотрим модель «столбика шариков» (рисунок 1).

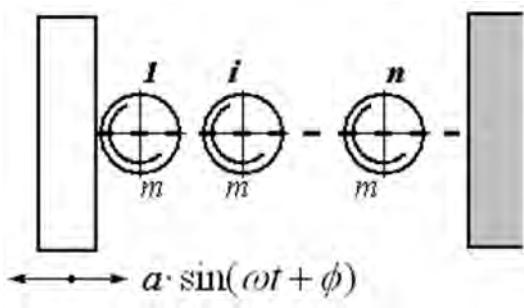


Рисунок 1 – Модель виброударной системы – «столбик шариков»

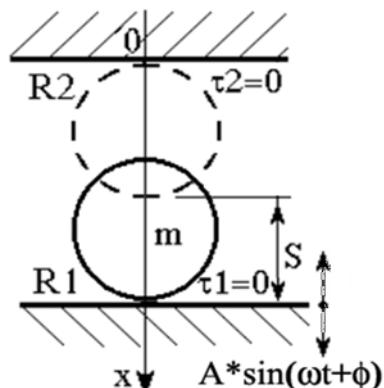


Рисунок 2 – Схема виброударной системы, моделирующей упрочнение закрепленной детали

Эта модель обстоятельно исследована; ее особенности описывают следующие соотношения:

– уравнения движения инденторов в промежутках между соударениями:

$$m\ddot{x}_i = 0; \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4)$$

– коэффициенты фазового уравнения:

$$w_1 = 1; \quad w_2 = \frac{2}{3}\pi l \left(\frac{1+R+R^2}{1-R} - \frac{1-R}{1+R} n^2 \right); \quad w_3 = \frac{S}{a}, \quad (5)$$

где R – коэффициент восстановления, одинаковый для всех ударных пар;

l – кратность режима;

n – число инденторов в столбике;

S – суммарный зазор в системе;

a – амплитуда колебаний ударника.

– ударный импульс, передаваемый преграде:

$$I = \frac{m\omega a}{n} \cdot \frac{1+R}{1-R} \cos \phi. \quad (6)$$

Стационарные виброударные колебания могут существовать при выполнении условия, представляющего собой критерий эффективной загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру:

$$n < \frac{1}{1-R}. \quad (7)$$

Из (6) видно затухание ударного импульса по мере его прохождения вдоль цепочки инденторов. Для стальных сферических инденторов среднее значение коэффициента восстановления составляет около 0,7. Таким образом, при условии оптимальности момента соударения ($\cos\phi = 1$) ударный импульс затухает обратно пропорционально числу слоев инденторов. Рост ударного импульса наблюдается с увеличением амплитуды виброскорости (равной ωa) и массы инденторов. Виброударные колебания полностью затухают при нарушении условия (7), т.е. при $n \geq 1/(1 - 0,7) \approx 3...4$. Это не означает, что в такой системе энергия вообще не будет передаваться препядре. Однако процесс при этом будет носить нестационарный, хаотический характер, и большая часть приходящих ударов будет передавать импульс, существенно меньший, чем в (6).

Однако рассматриваемая модель ВУС будет не полной если в ней не будут учтены силы тяжести. Не учет сил тяжести при анализе движения инденторов обрабатывающей среды в высокоамплитудном вибростанке может привести к совершенно неправильным выводам так как сила тяжести оказывает влияние на возвратное движение инденторов вниз. В связи с тем, что воздействие на деталь производится двумя – тремя упакованными слоями инденторов, основные черты процесса можно выявить при анализе одномассных модельных ВУС. Схемы этих ВУС должны отвечать известным и применяемым на практике схемам процессов высокоамплитудной виброударной обработки ППД, среди которых можно выделить следующие четыре: а) обработка нижней поверхности неподвижной детали; б) деталь прикрепленная к виброплите подбрасывает массу загрузки при этом движение массы загрузки не ограничено сверху; в) движение массы загрузки ограничено сверху отражающей крышкой; г) упрочнение внутренней полости детали, прикрепленной к виброплите (деталь – виброкамера).

Рассмотрим схему виброударной высокоамплитудной обработки, при которой обрабатываемая деталь неподвижна. Основываясь на простейшей схеме процесса, приведенной на рисунке 2 (аналог схемы «а»), выявим минимальный набор параметров, позволяющий связать амплитудно–частотные характеристики возбуждающего воздействия, размер и массу инденторов, а также свойства обрабатываемой поверхности.

В рассматриваемой модели движение обрабатывающей среды возбуждается нижней плитой. После столкновения с нижней вибрирующей платформой отскочивший индентор совершает свободный полет до встречи с верхней плитой. После взаимодействия с верхней плитой, индентор получает импульс отдачи, направленный вниз. После чего ускоренно под действием силы тяжести движется вниз. Согласно стандартной классификации виброударных систем (ВУС) эта модель является одномассовой [4], она похожа на известную модель «прыгающий шарик», но отличается от нее наличием неподвижной верхней препядды с бесконечной массой.

Несмотря на то, что наличие трения моделью не учитывается ее решение позволяет выяснить вопрос существования тех или иных виброударных режимов, и может служить средством тестирования программ для ЭВМ, которыми возможно учесть большинство явлений и факторов процесса.

Упрощающие предположения, свойственные модели, полагают:

- реальная система представляет собой большую совокупность систем (рисунок 2), в которой инденторы располагаются в ряд по горизонтали и синхронно движутся вверх – вниз;

- динамическое возбуждающее воздействие является гармоническим (синусоидальным) с амплитудой A , частотой ω и начальной фазой ϕ , отсчитываемой от момента соударения колеблющейся нижней плиты с индентором, который мы принимаем за начало отсчета времени;

- продолжительность соударений обоих типов принимается равной нулю;

- трение инденторов друг с другом и о стенки отсутствует, – потери энергии в системе имеют место только при соударениях тел и описываются коэффициентами восстановления R_1 и R_2 в обеих ударных парах;

- распределенный в реальном вибростанке между звеньями ВУС зазор заменяется суммарным зазором S . Зазор отсчитывается от положения индентора массой m , в котором он касается верхней плиты до равновесного положения нижней плиты;

- массы верхней и нижней плит приняты бесконечно большими.

Таким образом, сама структура принятой модели и введенные упрощения определяют перечень параметров, управляющих процессом. Адекватность принятой модели может быть оценена после выявления ее способности отражать установленные экспериментально реальные процессы в виброударной технологической системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной обработки / А.П. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1999. – 620 с.
2. Лебедев, В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В.А. Лебедев. Научное издание. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
3. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с.
4. Шевцов, С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / Шевцов С.Н. – Ростов н/Д: Издательство СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.

Лебедев Валерий Александрович
Донской государственный
технический университет,
г. Ростов-на-Дону
кандидат технических наук,
профессор, профессор кафедры
«Технология машиностроения»
Тел. (863)2738–360
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

Серга Георгий Васильевич
Кубанский государственный
аграрный университет,
г. Краснодар
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой НГ и Г
Тел. (863)2738–360
E-mail: serga–georgy@mail.ru

Кочубей Анатолий Алексеевич
Донской государственный
технический университет,
г. Ростов-на-Дону
аспирант кафедры «Технология
машиностроения»
Тел. (863)2738–360
E-mail watchbox@mail.ru

V.A. LEBEDEV, G.V. SERGA, A.A. KOCHUBEY

LAWS OF PROCESS HARDENING OF THE GRANULAR MEDIUM IN VIBRO-TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Methodological approaches to the modeling of surface plastic deformation flows freely moving indenters when handling components dynamic methods PPD. The criterion of the effective load of processing medium to the working chamber, providing stationary vibro-impact swings freely moving indenter during machining. It is shown that the structure of the adopted model and the introduction of a simplified define the list of parameters that control the process of PPD.

Keywords: surface plastic deformation, freely moving indenters. vibro-impact system, vibrations, shock pulse model.

BIBLIOGRAPHY

1. Babichev, A.P. Osnovy vibratsionnoy obrabotki / A.P. Babichev. – Rostov n/D: Izdatelskiy tsentr DGTU, 1999. – 620 s.
2. Lebedev, V.A. Tekhnologiya dinamicheskikh metodov poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya / V.A. Lebedev. Nauchnoye izdaniye. – Rostov n/D: Izdatelskiy tsentr DGTU, 2006. – 183 s.
3. Panovko, YA.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara / YA.G. Panovko. – L.: Politekhnika, 1990. – 272 s.
4. Shevtsov, S.N. Kompyuternoye modelirovaniye dinamiki granulirovannyykh sred v vibratsionnykh tekhnologicheskikh mashinakh / Shevtsov S.N. – Rostov n/D: Izdatelstvo SKNTS VSH, 2001. – 194 s.

Lebedev Valery Aleksandrovich
Don State Technical
University, Rostov-on-Don
Ph.D., professor, professor of
«Mechanical Engineering»
Ph. (863)2738–360
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

Serga Georgy Vasilievich
Kuban State Agrarian
University, Krasnodar
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head. Chair of LH and T
Ph. (863)2738–360
E-mail: serga–georgy@mail.ru

Kochubei Anatoly Alekseevich
Don State Technical
University, Rostov-on-Don
graduate student of «Mechanical
Engineering»
Ph. (863)2738–360
E-mail watchbox@mail.ru

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье приведен общий подход повышения эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов; выполнен анализ основных принципов ориентации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации.

Ключевые слова: функционально-ориентированная технология, деталь, эксплуатационные свойства, технологическое воздействие, эксплуатационная функция, функциональный элемент.

Повышение требований к ресурсу и надежности деталей судовых агрегатов ставит перед технологией машиностроения соответствующую задачу. Решение задачи на новом качественном уровне возможно созданием новых классов технологий. Функционально-ориентированные технологии (ФОТ) являются ярким примером таких технологий, отличительной особенностью которых является разработка технологического процесса более тонко и прецизионно с разбивкой изделия по уровням глубины технологии.

Таким образом, для решения задачи о повышении эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов необходимо сформировать общий подход, который будет базироваться на функционально-ориентированных технологиях.

Целью данной статьи является формирование общего подхода повышения эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов на основе анализа основных принципов, обеспечивающих взаимосвязь между эксплуатационными функциями, технологическими воздействиями и свойствами детали.

В процессе своего существования изделие может быть рассмотрено на трех уровнях: как объект эксплуатации, как объект проектирования и как объект совершенствования. Понятно, что в этом случае первичным является уровень эксплуатации, указывающий на особенности изделия, которые нужно реализовать; уровни проектирования и совершенствования, соответственно, вторичный и третичный, должны обеспечить эксплуатационные свойства детали. Поскольку детали являются главными функциональными единицами в любом агрегате, то необходимы предварительные глубокие исследования особенностей эксплуатации [1].

В процессе работы детали (или системы) возникает большое разнообразие эксплуатационных особенностей, например, неравномерность распространения деформации растяжения или сжатия, наличие концентраторов напряжения, ударных нагрузок, коррозионных процессов и множество других. Исходя из этого, введем понятие эксплуатационных функций, под которыми будем понимать виды и характер возможных нагрузений на деталь при ее эксплуатации.

Отметим, что эффективность ФОТ особенно ярко будет проявляться в тех случаях, когда на деталь воздействуют переменные эксплуатационные функции, приводящие к снижению эксплуатационных свойств, а, иногда, и к быстрой поломке в процессе эксплуатации.

Как уже было отмечено выше, обеспечивая необходимые эксплуатационные свойства обеспечивается нормальная работа деталей, а, значит, и всего агрегата в целом. При этом любая деталь будет обладать различными свойствами – не только теми, которые заданы в процессе проектирования. На рисунке 1 показана классификация свойств [2].

Из всех свойств, которыми обладает деталь, нас, прежде всего, интересуют эксплуатационные свойства, которые проявляются при эксплуатации детали и благодаря наличию которых обеспечиваются заданные параметры работы детали и агрегата в целом.

Т.е. можно говорить о качестве детали – совокупности свойств, обуславливающих пригодность детали выполнять свое функциональное назначение в заданном диапазоне изменения условий эксплуатации [3]. Для реализации заданных эксплуатационных свойств необходима реализация следующих видов обеспечений: обеспечение по свойствам материала, структурное обеспечение, конструкторское обеспечение, технологическое обеспечение, эксплуатационное обеспечение [4].



Рисунок 1 – Способы классификации свойств деталей

В соответствии с особенностями ФОТ свойства изделия должны быть обеспечены на всех этапах жизненного цикла детали (рисунок 2, а) и на различных уровнях (рисунок 2, б). При этом последовательность жизненного цикла изделия должна иметь итерационный характер [5, 6]. А это значит, что должна быть возможность возврата процесса к предыдущим этапам и любым другим этапам для реализации оптимальных параметров изделия с точки зрения его наиболее эффективной эксплуатации в агрегате.

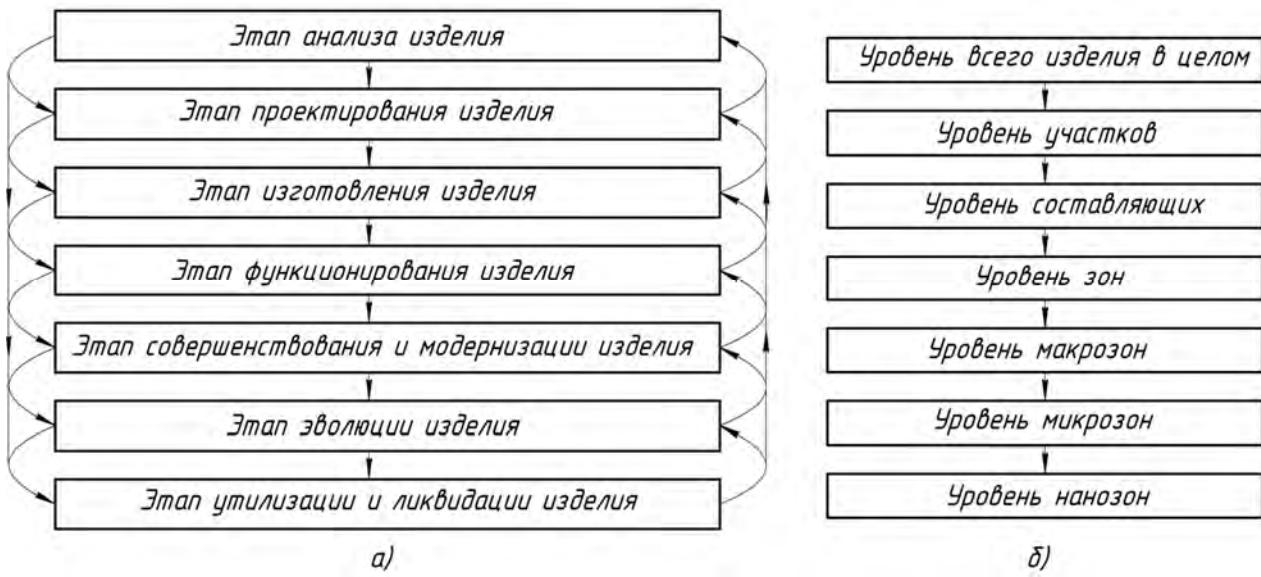


Рисунок 2 – Этапы жизненного цикла детали (а) и уровни изделия (б)

Реализация в деталях эксплуатационных свойств происходит посредством технологических воздействий, которые необходимо выполнять прецизионно. Это позволяет точнее адаптировать деталь при изготовлении к особенностям эксплуатации и создать качественно новую совокупность свойств.

Очевидно, что между свойствами функционального элемента детали, особенностями эксплуатации и техническими воздействиями существуют связи, которые определяются и формируются на базе восьми особых принципов. Формулировка принципов и их характеристика приведены в таблице 1.

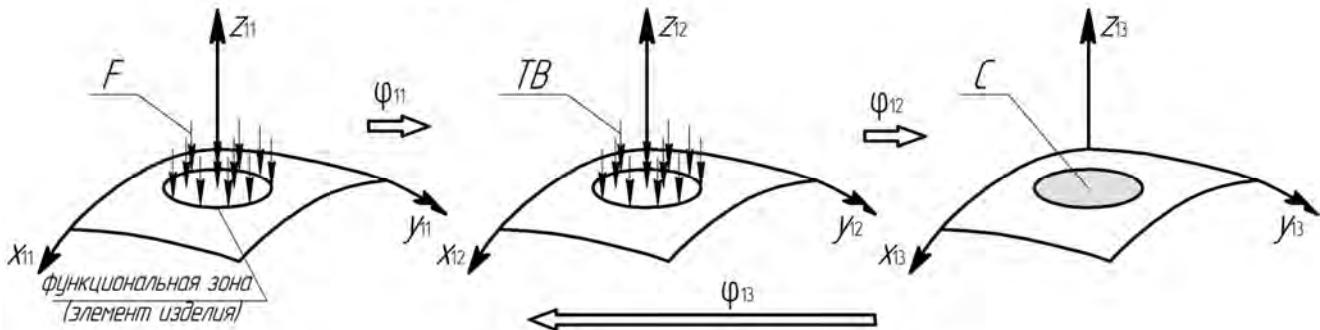
Каждый из принципов можно представить графически и аналитически [1]. Покажем это на примере первого, третьего и шестого принципов.

Машиностроительные технологии и инструменты

Таблица 1 – Принципы ориентации технологических воздействий, потоков материи, энергии и информации.

Формулировка принципа	На какой вопрос отвечает	Что обеспечивает или реализует принцип
Принцип I. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции (ЭФ) в каждом функциональном элементе (ФЭ) изделия характеристикам реализации технологических воздействий (ТВ) и параметров обеспечения необходимых свойств в этом ФЭ изделия на каждом уровне глубины технологии	Какое ТВ нужно выполнить в зависимости от особенностей действия ЭФ? Какое свойство изделия нужно обеспечить в зависимости от особенностей действия ЭФ?	Благодаря первому принципу обеспечивается заданное свойство ФЭ в зоне и участке изделия
Принцип II. Топологического соответствия геометрических параметров ФЭ изделия, в котором действует ЭФ при эксплуатации, геометрических параметров зонального элемента реализации ТВ и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии	Куда нужно реализовывать ТВ и где обеспечивать необходимые свойства изделия?	Второй принцип отвечает за пространственную точность реализации ТВ в заданные функциональные зоны и участки изделия, а также за пространственное расположение в них необходимых свойств изделия.
Принцип III. Количественного соответствия множества ФЭ, в которых действует множество различных ЭФ при эксплуатации, множеству реализации ТВ и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в ФЭ изделия на каждом уровне глубины технологии	Сколько видов, типов или вариантов ТВ нужно реализовать на изделие в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств?	Третий принцип отвечает за количественную точность реализации ТВ и реализуемое при этом соответствующее множество свойств.
Принцип IV. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия ЭФ при эксплуатации, ТВ и эксплуатационных свойств в пространстве каждого ФЭ изделия на каждом уровне глубины технологии	Как изменяются свойства в пространстве каждого ФЭ изделия, и как нужно реализовать ТВ на ФЭ изделия?	Четвертый принцип отвечает за возможность реализации изменения функциональных свойств изделия в пространстве за счет переменных ТВ по заданному закону.
Принцип V. Адекватной зависимости временных особенностей действия ЭФ при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации ТВ и временных эксплуатационных свойств в каждом ФЭ изделия на каждом уровне глубины технологии	Как изменяются свойства ФЭ в пространстве и во времени и какие ТВ нужно обеспечить функциональному элементу изделия?	Пятый принцип обеспечивает возможность изменения функциональных свойств изделия во времени за счет переменных ТВ по заданному закону.
Принцип VI. Структурного соответствия действия множества ЭФ, реализации множества ТВ и выполнения множества свойств в ФЭ изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего изделия на каждом уровне глубины технологии	Какое множество свойств ФЭ нужно реализовать и какое множество ТВ обеспечить?	Шестой принцип обеспечивает возможность реализации множества функциональных свойств за счет соответствующего множества ТВ.
Принцип VII. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого ФЭ заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом на каждом уровне глубины технологии	Какие свойства ФЭ нужно обеспечить, чтобы реализовать заданный, требуемый или предельный потенциал общих свойств всего изделия в целом?	Седьмой принцип реализует процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в функциональных зонах и элементах, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.
Принцип VIII. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого ФЭ в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом на каждом уровне глубины технологии	Какие свойства в окрестностях ФЭ нужно обеспечить, чтобы реализовать заданный, требуемый или предельный потенциал общих свойств всего изделия в целом?	Восьмой принцип реализует процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в окрестностях функциональных зон и элементов, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.

На рисунке 3 показана гипотетическая схема первого принципа, обеспечивающего заданное свойство ФЭ в зоне и участке изделия.



*Рисунок 3 – Схема реализации первого принципа:
F – эксплуатационная функция; TB – технологические воздействия; C – эксплуатационные свойства*

Первый принцип можно математически представить аналитически в виде трех отображений:

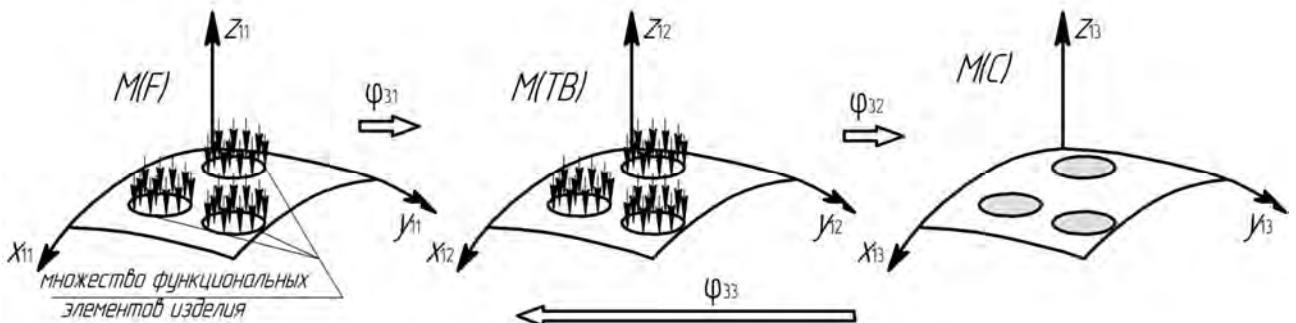
$$\begin{cases} \varphi_{11}: F \rightarrow TB; \\ \varphi_{12}: TB \rightarrow C; \\ \varphi_{13}: C \rightarrow F, \end{cases} \quad (1)$$

где φ_{11} – отображение (преобразование) эксплуатационной функции F изделия в технологические воздействия TB ;

φ_{12} – отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C изделия;

φ_{13} – отображение (преобразование) свойств C в эксплуатационную функцию F .

На рисунке 4 приведена схема реализации третьего принципа, обеспечивающему количественную точность реализации TB и реализуемое при этом соответствующее множество свойств.



*Рисунок 4 – Схема реализации третьего принципа:
M(F) – множество эксплуатационной функции; M(TB) – множество технологических воздействий;
M(C) – множество эксплуатационных свойств*

Третий принцип, по аналогии с первым, можно математически представить аналитически в виде трех отображений:

$$\begin{cases} \varphi_{31}: M(F) \rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32}: M(TB) \rightarrow M(C); \\ \varphi_{33}: M(C) \rightarrow M(F), \end{cases} \quad (2)$$

где φ_{31} – отображение (преобразование) множества зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ изделия в множество зон реализации технологических воздействий $M(TB)$;

φ_{32} – отображение (преобразование) множества зон реализации технологических воздействий $M(TB)$ в множество зон обеспечения свойств $M(C)$ изделия;

φ_{33} – отображение (преобразование) множества зон свойств $M(C)$ в множество зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ изделия.

На рисунке 5 приведена схема реализации шестого принципа, обеспечивающего возможность реализации множества функциональных свойств за счет соответствующего множества TB .

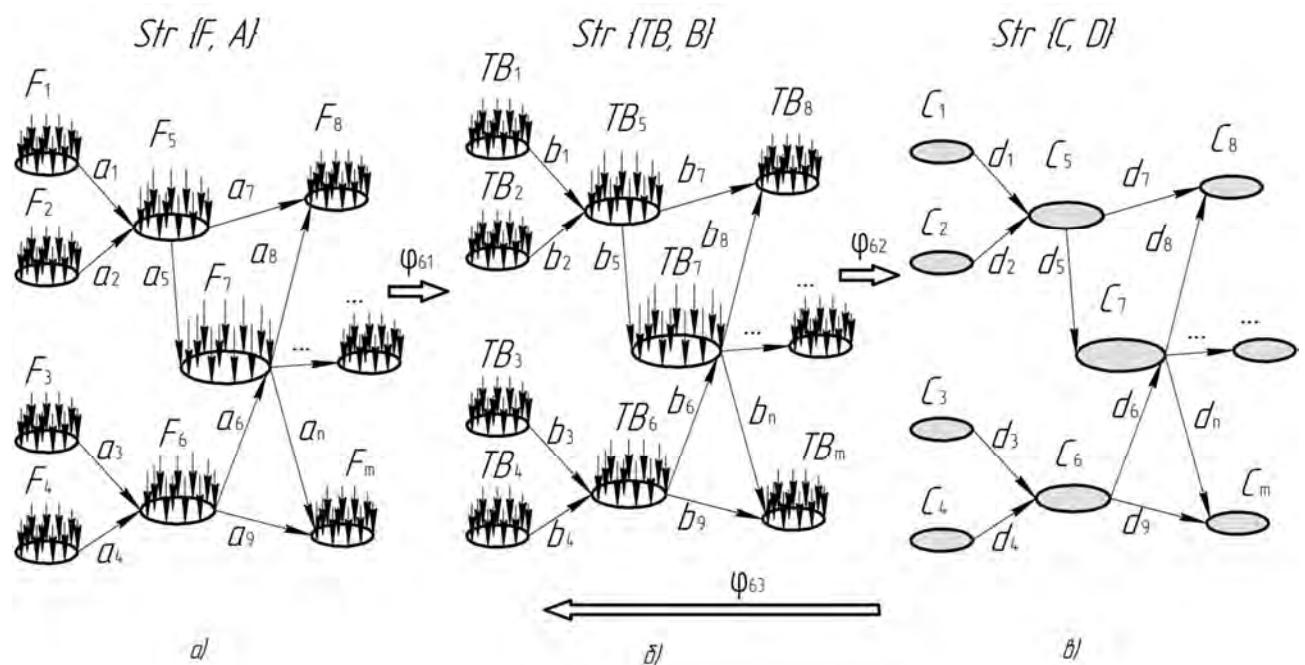


Рисунок 5 – Схема реализации шестого принципа:

а) структура множества ЭФ; б) структура множества TB ; в) структура множества свойств ФЭ

Шестой принцип математически можно представить следующей системой отображений:

$$\begin{cases} \varphi_{61}: Str\{F, A\} \rightarrow Str\{TB, B\}; \\ \varphi_{62}: Str\{TB, B\} \rightarrow Str\{C, D\}; \\ \varphi_{63}: Str\{C, D\} \rightarrow Str\{F, A\}, \end{cases} \quad (3)$$

где φ_{61} – отображение (преобразование) структуры множества эксплуатационной функции $F=\{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$ и множества отношений $A=\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ изделия в структуру множества TB $TB=\{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B=\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_r\}$;

φ_{62} – отображение (преобразование) структуры множества $TB=\{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$ и множества отношений $B=\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ в структуру множества свойств $C=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$ и множества отношений $D=\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ изделия;

φ_{63} – отображение (преобразование) структуры множества свойств $C=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$ в структуру множества эксплуатационной функции $F=\{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$ и множества отношений $A=\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ изделия.

Следует иметь в виду, что системы отображений (1–3), а также аналогичные системы для остальных принципов имеют замкнутую форму, поэтому решение уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов. Кроме того, соответствие может быть изоморфным или гомоморфным, в связи с чем, принципы могут обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Использование приведенных в таблице 1 принципов при проектировании технологий машиностроения позволяет сформировать общий подход для решения задачи повышения эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов, работающих в сложных условиях, что позволит обеспечивать таким деталям заданный, требуемый или предельный потенциал возможностей детали при эксплуатации в судовых агрегатах.

Таким образом, приведенные принципы дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств изделия при реализации функционально-ориентированных технологий в зависимости от особенностей эксплуатации изделия. А это позволяет обеспечивать качественно новую совокупность свойств и меру полезности деталей в судовом агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Хубка, В. Теория технических систем: [пер. с нем.] / В. Хубка. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
3. Суслов, А.Г. Технология машиностроения / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.
4. Михайлов, А.Н. Обеспечение надежности деталей судовых агрегатов при формировании параметров качества функционально-ориентированными технологиями / А.Н. Михайлов, А.В. Костенко, А.В. Лукичев // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXII междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 14 – 19 сентября 2015 г. В 2-х томах – Донецк: МСМ. – 2015. – Т. 2. – С. 20 – 23.
5. Михайлов, А.Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 2. – С. 44–53.
6. Михайлов, А.Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XII междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополь 12–17 сентября 2005 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ. – 2005. – Т. 2. – С. 261–275.

Михайлов Александр Николаевич
Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры «Технология
машиностроения»
83001, г. Донецк ул. Артема, 58
Тел.: +38(062) 342–75–04
E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Костенко Андрей Викторович
Камчатский государственный технический университет,
г. Петропавловск-Камчатский
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Технологические машины и
оборудование»
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
Тел.: 8(984)163–74–36
E-mail: andr13kost@list.ru

A.N. MIKHAYLOV, A.V. KOSTENKO

**GENERAL PRINCIPLES INCREASE OF OPERATIONAL
PROPERTIES DETAILS OF SHIP UNIT ON THE BASIS
FUNCTIONAL-ORIENTED TECHNOLOGY**

This article presents a general approach of increasing the running ability of ship unit details; the analysis of the orientation basic principles of technological impacts flows of matter, energy and information is given.

Keywords: functional-oriented technology, detail, running ability, technological impact, working function, functional element.

BIBLIOGRAPHY

1. Mikhaylov, A.N. Osnovy sinteza funktsionalno-oriyentirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya / A.N. Mikhaylov. – DonNTU, 2009. – 346 s.
2. Khubka, V. Teoriya tekhnicheskikh sistem: [per. s nem.] / V. Khubka. – M.: Mir, 1987. – 208 s.
3. Suslov, A.G. Tekhnologiya mashinostroyeniya / A.G. Suslov. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 400 s.
4. Mikhaylov, A.N. Obespecheniye nadezhnosti detaley sudovykh agregatov pri formirovaniyu parametrov kachestva funktsionalno-oriyentirovannymi tekhnologiyami / A.N. Mikhaylov, A.V. Kostenko, A.V. Lukichev // Mashinostroyeniye i tekhnosfera XXI veka: Sbornik trudov XXII mezdunar. nauch.-tekhn. konf. v g. Sevastopole 14 – 19 sentyabrya 2015 g. V 2-kh tomakh – Donetsk: MSM. – 2015. – T. 2. – S. 20 – 23.
5. Mikhaylov, A.N. Osnovnyye printsyipy i osobennosti sinteza funktsionalno-oriyentirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya / A.N. Mikhaylov // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2007. – № 2. – S. 44–53.
6. Mikhaylov, A.N. Obshchiy podkhod v sozdanii funktsionalno-oriyentirovannykh i integrirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya / A.N. Mikhaylov // Mashinostroyeniye i tekhnosfera XXI veka: Sbornik trudov XII mezdunar. nauch.-tekhn. konf. v g. Sevastopol 12–17 sentyabrya 2005 g. V 5-ti tomakh. – Donetsk: DonNTU. – 2005. – T. 2. – S. 261–275.

Mikhaylov Aleksandr Nikolaevich
Donets National Technical University, Donetsk
Doctor of Technical Science, professor
Professor of department «Manufacturing engineering»
83001, Donetsk, Artema street, 58
Ph.: +38(062) 342–75–04
E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Kostenko Andrey Viktorovich
Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky
Candidate of Technical Science, associate Professor
Associate Professor of department «Technological machinery and equipment»
683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Kluchewskaya street, 35
Ph.: 8(984)163–74–36
E-mail: andr13kost@list.ru

Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ, С.М. БРАТАН, А.О. ХАРЧЕНКО, Д.О. ВЛАДЕЦКИЙ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

Приведены результаты теоретических и практических работ в направлении повышения качества шлифовальной обработки путем поиска оптимальной структуры виброзащитной системы станка, способствующей снижению уровня внешних воздействий на него при работе в условиях плавучей мастерской.

Ключевые слова: плавучая мастерская, шлифовальный станок, качество шлифовальной обработки, виброизолирующая опора, виброизолирующее устройство, морфологическая матрица, графы структурных вариантов, устройство автоматической виброзащиты, автоматическое управление демпфированием, опора с активной виброизоляцией.

Для повышения качества обработки прецизионные станки должны быть защищены от вибраций соседних установок. При монтаже некоторых станков (шлифовальных, точных токарно–винторезных, балансировочных и т.п.) на фундаментах первой группы, когда роль собственно фундамента выполняет станина, ряд заводов практикует в качестве антивибрационного мероприятия установку станков на виброизолирующих опорах. При недостаточно тщательном подборе или при изменении режима работы станка упругие элементы могут вызывать даже усиление вибраций.

Однако, в тех случаях, когда требуется особо малая волнистость и шероховатость обработанной поверхности или когда источник большой вибрации находится поблизости, то вышеуказанный способ виброизоляции является недостаточным.

Повышение качества обработки деталей в условиях плавучей ремонтной мастерской (ПРМ) и плавучей мастерской (ПМ) непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников (рисунок 1), в том числе и от внешней среды – волнений водной поверхности.

Как правило, на палубах плавучих мастерских (ПРМ и ПМ) фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.



Рисунок 1 – Общий вид плавучей ремонтной мастерской и плавучей мастерской, г. Севастополь

Целью данной статьи является поиск путей обеспечения качества шлифовальной обработки на основе оптимизации структуры виброзащитной системы станка, способствующей снижению уровня внешних воздействий на него при работе в условиях

плавучей мастерской. Традиционные виброизолирующие опоры металлорежущих станков [1,2] выполненные на основе виброизоляторов, различающихся упруго-демпфирующими характеристиками, различным сочетанием виброизолирующих и ударно-защитных свойств, долговечностью, способностью функционировать в тех или иных климатических условиях, а также чисто конструктивными особенностями (габаритами, способом монтажа и т.д.), не могут быть использованы на плавучих мастерских по причине невозможности их функционирования в условиях качки плавучего основания и горизонтальных смещений под ее воздействием.

Так как технологический процесс шлифования (в частности, чистового) является сложным многокомпонентным объектом, на который оказывает влияние большое количество изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий, то необходимо рассмотреть его как систему.

Методами системного анализа можно провести декомпозицию воздействий со стороны окружающей среды на технологический процесс: а) измеряемая и управляемая часть – вектор управления $U(\tau)$; б) измеряемая, но неуправляемая часть – вектор входных переменных $X(\tau)$; в) неизмеряемая (и, тем более, неуправляемая часть) – вектор $\Omega(\tau)$.

Внутри каждого из указанных векторов можно выделить компоненты, характеризующие факторы, действующие на технологический процесс (рисунок 2).

Состояние технологического процесса отображается вектором $Z(\tau)$. При этом доступная измерению часть $Z(\tau)$ является вектором выходных переменных $Y(\tau)$. Часть выходных переменных $Y(\tau)$ определяет единичные показатели качества $y_k(\tau)$, по которым целесообразно вести оценку стабильности технологического процесса.

Согласно общепринятым представлениям, под стабильностью понимают свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовления продукции в заданных пределах в течение некоторого промежуточного времени.

Следовательно:

$$|y_k(\tau_0) - y_k(\tau)| \leq \varepsilon_k \text{ при } \tau \in (\tau_0, \tau_f), \quad (1)$$

где ε_k – заданный предел изменения k -го показателя качества;

(τ_0, τ_f) – заданный интервал времени, в течение которого должны сохраняться показатели качества.

Эти показатели должны находиться в пределах заданного поля допуска:

$$y_{k \min} \leq y_k(\tau) \leq y_{k \max}.$$



Рисунок 2 – Системный анализ технологического процесса

Неравенство (1) гарантированно выполняется при условии:

$$\left| \frac{dy_k}{d\tau} \right| \leq \delta_k, \quad (2)$$

где $\delta_k = \frac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – ограничение по скорости изменения параметра y_k .

Причинами, вызывающими изменение y_k являются внешние воздействия на технологический процесс, т.е. векторов воздействий $U(\tau)$, $X(\tau)$, $\Omega(\tau)$ и начальные условия состояния $Z(\tau_0)$. В силу того, что $\Omega(\tau)$ является неизмеряемым, его компоненты могут считаться случайными функциями, результат воздействия которых приводит к случайным отклонениям от номинальных значений y_k и, следовательно, появлению элементов случайности в показателях качества.

В соответствии с ГОСТ 15895–77, для такого случая критерием стабильности служит среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра σ_{y_k} , т.е.:

$$\sigma_{y_k} \leq \sigma_{y_k \text{ max}} \quad (3)$$

Обеспечение стабильности соответствующих показателей производится за счет выбора компонент вектора $U(\tau)$ (рисунок 2).

Считается, что рациональными являются такие параметры управления $U(\tau)$, которые обеспечивают положение центра рассеивания y_k внутри поля допуска $(y_{k \text{ min}}, y_{k \text{ max}})$ на таком уровне y_{k0} , который минимизирует вероятность появления бракованных деталей. Обычно указанную задачу решают путем соответствующей фиксированной настройки станка $U^*_0(\tau_0)$, обеспечивавшей заданные параметры в течение максимально достижимого интервала времени.

Все вышеперечисленные алгоритмы не обеспечивают одновременную стабилизацию параметров качества в условиях случайных возмущений $\Omega(\tau)$, что недопустимо для операций чистового шлифования, для которых допуски ε_k являются малыми величинами.

На операциях чистового шлифования обработка заготовок также выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменяется состояние рабочей поверхности абразивного инструмента, состав и свойства СОТС, параметры жесткости технологической системы, температура окружающей среды и т.д. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода.

Для таких условий $Z(\tau) = \text{var}$, вектор управления $U^*(\tau)$ должен выбираться с учетом изменения $Z(\tau)$, и для каждой детали m необходимо подбирать новое управление $U_m^*(\tau)$.

Применение традиционных методов и средств для обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при шлифовании практически исчерпало свои возможности и требует детализированного изучения этих технологических операций как системы, отражающей взаимодействие состояний $Z(\tau)$.

Необходимое качество обработки изделий в настоящее время чаще всего обеспечивается не адекватным математическим описанием объекта и управлением, а избыточными затратами технологических ресурсов (времени обработки, применением дополнительных доводочных процедур, нерациональным расходованием материала круга и т.п.).

Для повышения эффективности операций чистового шлифования пытаются применять различного рода автоматические системы. При этом в зависимости от уровня априорной и рабочей информации возможно несколько ситуаций:

- состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы можно пренебречь;
- состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя;

- состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы можно пренебречь;
- состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя.

Решение задачи об оценке неизменяемых параметров может быть обеспечено применением подхода, основанного на применении схем со «стохастическим наблюдателем», где оценка неизменяемых компонент производится по результатам моделирования динамики технологической системы, с входным сигналом, соответствующим сигналу управления, поступающему на реальный динамический объект – технологическую систему. Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус–векторов шлифовального круга и заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения радиус–вектора шлифовального круга. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра. Принцип получения случайного процесса с заданными параметрами – спектральной характеристикой (корреляционной функцией) иллюстрируется схемой (рисунок 3).

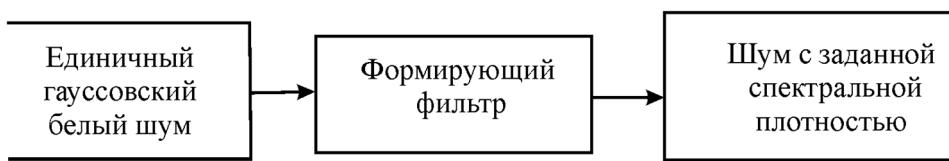


Рисунок 3 – Схема получения шума с заданными параметрами с помощью формирующего фильтра

Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Для настроек формирующего фильтра используются результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга, так называемая схема «динамического наблюдателя». Однако с течением времени значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений радиус–векторов и их моделей. Целесообразно использование блока подстройки состояний наблюдателя в форме фильтра Калмана–Бюсси, который осуществляет необходимую коррекцию входных сигналов, обеспечивая минимально возможное значение среднеквадратического отклонения.

Полученные оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в системах управления по отклонению. Такая система (рисунок 4) должна стабилизировать режимы относительно режимов, задаваемых условиями граничного технологического цикла с минимально допустимыми запасами и учитывать шумы от таких воздействий внешней среды, как волнение водной поверхности, передаваемое через палубу плавучей мастерской технологическому оборудованию.

Таким образом, для решения проблемы обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при чистовом шлифовании на оборудовании, работающем в условиях плавучей мастерской, необходимо на основе полученных динамических моделей и оценок разработать автоматическую систему для стабилизации параметров технологической системы с учетом воздействий внешней среды, в частности волнений водной поверхности.

Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка используем метод морфологического анализа, достаточно полно разработанного для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [3].

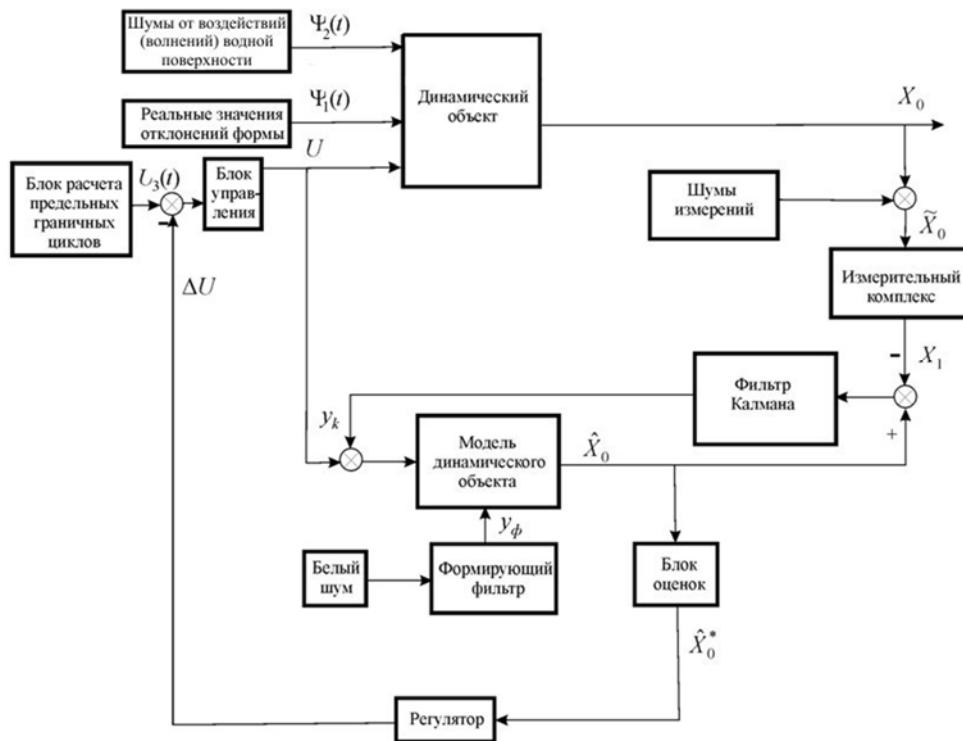


Рисунок 4 – Система управления, обеспечивающая реализацию циклов шлифования с учетом воздействий внешней среды

Однако, для нашего случая этот метод в чистом виде использовать невозможно из-за очевидных недостатков его последнего этапа – выбора рационального варианта, при котором не учитываются реальные условия функционирования виброизолирующих устройств.

Поэтому морфологический анализ, базирующийся на последовательном переборе возможных вариантов элементов виброизолирующего устройства, принимаем в качестве аппарата на этапе создания рациональной технологической системы (ТС) круглошлифовального станка для формирования множества структур системы виброизолирующего устройства (рисунок 5) и оценки этих вариантов по укрупненным показателям. Для этого воспользуемся построением морфологической матрицы (таблица 1), подробно рассматривая признаки и характеристики подсистем и элементов, а также выявляя связи между ними.

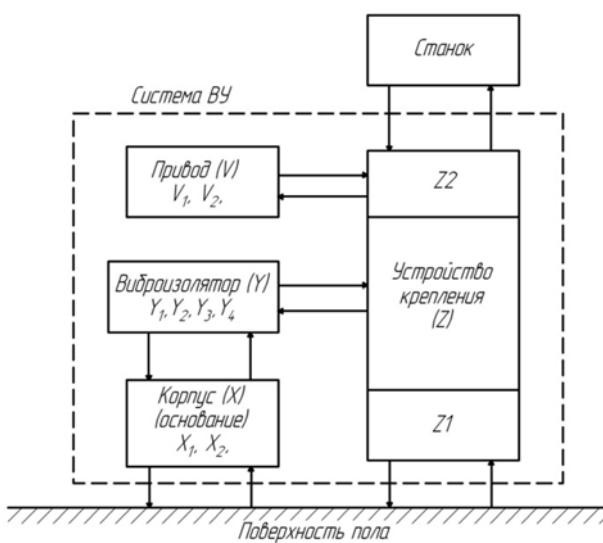


Рисунок 5 – Структурная схема системы виброизолирующего устройства

Таблица 1 – Морфологическая матрица системы виброизолирующего устройства.

Подсистема	Признаки	Элемент/Свойство
1	2	3
Корпус (X) (основание)	X1. Форма	X_{11} Диск
		X_{12} Цилиндр
		X_{13} Квадрат
		X_{14} Призма
		X_{15} Корпус
		X_{16} Пирамида
		X_{17} Комбинированный
	X2. Материал	X_{21} Металл
		X_{22} Пластик
		X_{23} Углеволокно
		X_{24} Другие неметаллы
Виброзолятор (Y)	Y1. Материал	Y_{11} Резина
		Y_{12} Капролон
		Y_{13} Полиуретан
		Y_{14} Эластомер
		Y_{15} Металл
		Y_{16} Другие
	Y2. Форма	Y_{21} Цилиндр
		Y_{22} Тор
		Y_{23} Конус
		Y_{24} Спираль
		Y_{25} Тарелка
		Y_{26} Переменного сечения
	Y3. Рабочее тело	Y_{27} С внутренней полостью
		Y_{28} Усечённой формы
		Y_{29} В виде мембранны
		Y_{210} В виде поршня
		Y_{211} Другие
	Y4. Принцип действия	Y_{31} Масло
		Y_{32} Воздух
		Y_{33} Отсутствует
Устройство крепления (Z)	Z1. К полу	Z_{11} Механическое
		Z_{12} Жёсткая фиксация
		Z_{13} Отсутствует
	Z2. К станку	Z_{21} Механическое
		Z_{22} Жёсткая фиксация
Привод (V)	V1. Вид привода	Z_{23} Упруго–механическая фиксация
		V_{11} Электромагнитный
		V_{12} Гидравлический
		V_{13} Пневматический
		V_{14} Комбинированный
		V_{15} Ручной
	V2. Вид передачи	V_{16} Отсутствует
		V_{21} Непосредственно
		V_{22} Рычажной системой
		V_{23} Другие

После заполнения морфологической матрицы перейдем к синтезу вариантов структуры виброизолирующего устройства. Методика поиска оптимальной структуры системы при заданных требованиях состоит в следующем. Вначале из множества признаков $n = 1, 2, \dots, N$ подсистемы «корпус» (X), который имеет следующие признаки – форма, материал, выделим наиболее приемлемые элементы для создания виброизолирующего устройства (ВУ).

При синтезе варианта, ВУ применимы различные типы перечисленных элементов, которые обеспечат правильное функционирование системы, но имеют различные характеристики (надёжность, габаритные размеры, масса, стоимость).

Пусть имеется M типов n -го узла, причём m –порядковый номер типа данного узла ($m = 1, 2, \dots, M$). Обозначив через X_{nm} совокупность параметров n -го узла M -го типа, множество состояний подсистемы «корпус» выразим в виде матрицы:

$$\|X\| = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{N1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1M} & X_{2M} & \dots & X_{NM} \end{vmatrix}.$$

Совокупность параметров k -го узла l -го типа подсистемы «виброизолятор» обозначим через Y_{kl} . Тогда множество состояний этой подсистемы запишем следующим образом:

$$\|Y\| = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{21} & \dots & Y_{K1} \\ Y_{12} & Y_{22} & \dots & Y_{K2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{1L} & Y_{2L} & \dots & Y_{KL} \end{vmatrix},$$

где $k = 1, 2, \dots, L$.

По аналогии в виде матрицы выражаем множество состояний подсистемы «устройство крепления» ($d = 1, 2, \dots, D$ – порядковый номер признака; $f = 1, 2, \dots, F$ – номер характеристики признака):

$$\|Z\| = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{21} & \dots & Z_{D1} \\ Z_{12} & Z_{22} & \dots & Z_{D2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{1F} & Z_{2F} & \dots & Z_{DF} \end{vmatrix}.$$

Свойства подсистемы «привод» задаём множеством состояний V_{QW} ($Q = 1, 2, \dots, Q$; $W = 1, 2, \dots, W$) и выражаем матрицей:

$$\|V\| = \begin{vmatrix} V_{11} & V_{21} & \dots & V_{Q1} \\ V_{12} & V_{22} & \dots & V_{Q2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{1W} & V_{2W} & \dots & V_{QW} \end{vmatrix}.$$

Обозначение и расшифровка параметров X_{nm} , Y_{kl} , Z_{df} , V_{qw} для виброизолирующего устройства приведены в морфологической матрице, представленной в таблице 1. Характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа на рисунке 6, характеризующего множество возможных вариантов подсистем ВУ, которое равно числу путей в графе.

С учётом большого количества вариантов синтез решения осуществляем, начиная с выбора вариантов подсистем, включая всё более и более существенные признаки. Кроме того, следует руководствоваться списком технических требований, определяющихся в первую очередь свойствами синтезируемой системы.

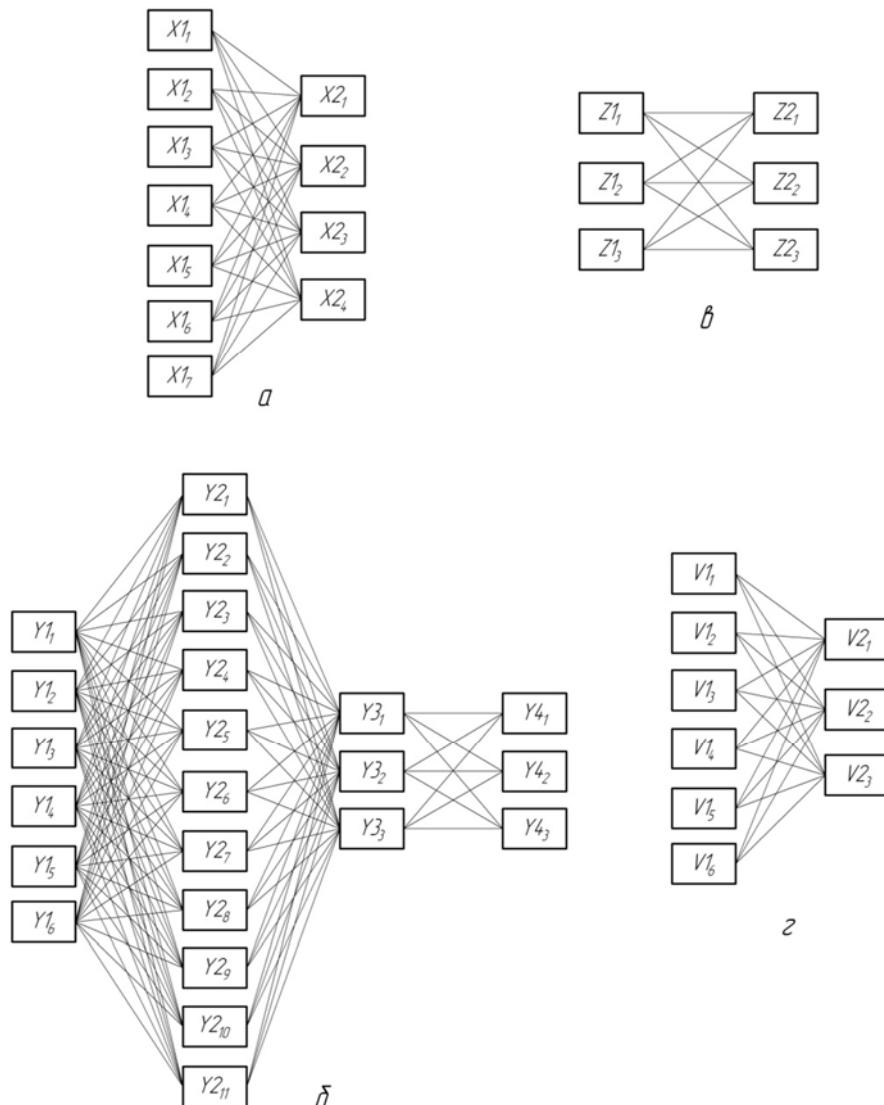


Рисунок 6 – Графы возможных структурных вариантов подсистем виброизолирующего устройства:
а – корпус (Х), б – виброизолятор (Y), в – устройство крепления (Z), г – привод (V)

В качестве примера зададимся конкретными свойствами технологической системы круглошлифовального станка 3М151, эксплуатируемого в условиях ПРМ и ПМ:

- 1) масса – 5600 кг;
- 2) операция – круглое врезное шлифование;
- 3) режимы обработки:
 - частота вращения шпинделя – $40 \dots 400 \text{ мин}^{-1}$
 - частота вращения шлифовального круга – 1590 мин^{-1}
- 4) диапазон частот собственных колебаний – $f_z \leq 20 \text{ Гц}$;
- 5) диапазон частот вынужденных колебаний – $f \leq 10 \text{ Гц}$.

Вначале осуществляем выбор вариантов подсистемы «корпус».

Проводим выбор требований, предъявляемых к корпусу виброизолирующего устройства с учётом его основных функций, а также качественных показателей K_i^I , характеризующих технологичность, прочность, себестоимость.

Такими требованиями являются:

- 1) прочность (повышенная – $K_1^I = 1$, высокая – $K_1^I = 0,75$, средняя – $K_1^I = 0,5$);
- 2) технологичность (высокая – $K_2^I = 1,0$, низкая – $K_2^I = 0,5$);
- 3) себестоимость (высокая – $K_3^I = 0,5$, средняя – $K_3^I = 0,75$, малая – $K_3^I = 1,0$).

По формуле:

$$K_c = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1-K_i}{n}.$$

Определяем суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Наибольшие численные значения ($K_x = 0,93$) принадлежат синтезированному варианту:

$$X' = X1_7 \begin{vmatrix} X1_1 \\ X1_2 \end{vmatrix} \rightarrow X2_1.$$

Выбранный вариант представляет собой металлический корпус комбинированной формы – цилиндр с диском в нижней части.

Качественные показатели K_i^{II} в соответствии со следующими техническими требованиями:

- 1) виброизолирующие свойства (высокие – $K_1^{II} = 1,0$, средние – $K_1^{II} = 0,75$, минимально необходимые $K_1^{II} = 0,5$);
- 2) спектр гашения колебаний (широкий – $K_2^{II} = 1,0$, средний – $K_2^{II} = 0,75$, узкий – $K_2^{II} = 0,5$);
- 3) конструктивная сложность (высокая – $K_3^{II} = 0,5$, средней сложности – $K_3^{II} = 0,75$, простая – $K_3^{II} = 1,0$).

По аналогии с предыдущей подсистемой определим суммарный качественный показатель для «виброизолятора». Наибольшая величина $K_y = 0,84$ принадлежит структуре:

$$Y' = Y1_1 \rightarrow \begin{vmatrix} Y2_1 \\ Y2_7 \\ Y2_{10} \end{vmatrix} \rightarrow Y3_1 \rightarrow \begin{vmatrix} Y4_1 \\ Y4_2 \\ Y4_3 \end{vmatrix}.$$

Виброизолятор выполнен из резинового материала в виде цилиндра с внутренней полостью с поршнем и рабочим телом (масло), использующими принципы растяжения–сжатия, изгибных деформаций, а также перемещения рабочего тела через дросселирующие отверстия.

Устройство крепления (Z) выбирается из заданных условий функционирования и может осуществляться присоединением к полу ($Z1$) и к станку ($Z2$).

По наибольшему качественному показателю K_i^{III} структуру устройства крепления выбираем на основании технических требований:

- 1) надёжность фиксации от горизонтальных перемещений (высокая – $K_1^{III} = 1,0$ средняя – $K_1^{III} = 0,75$, низкая – $K_1^{III} = 0,5$);
- 2) сложность конструкции (высокая – $K_2^{III} = 0,5$; средняя $K_2^{III} = 0,75$, малая – $K_2^{III} = 1,0$);
- 3) возможность переустановки (отсутствует – $K_3^{III} = 0,5$, имеется $K_3^{III} = 1,0$).

Максимальный суммарный показатель $k_z = 0,92$ получил вариант подсистемы «устройство крепления»:

$$Z' = Z1_1 \rightarrow Z2_3$$

Структура Z_1 имеет механическое крепление к полу цеха (к палубе плавучей мастерской) и упруго–механическую фиксацию к станку.

Затем выбираем подсистему «привод» (V). При этом руководствуемся списком технических требований по наибольшему качественному показателю K_i^{IV} :

- 1) демпфирующие свойства (высокие – $K_1^{IV} = 1,0$; средние – $K_1^{IV} = 0,75$; низкие – $K_1^{IV} = 0,5$);
- 2) сложность конструктивной реализации (высокая – $K_2^{IV} = 0,5$; средняя – $K_2^{IV} = 0,75$; малая – $K_2^{IV} = 1,0$);
- 3) возможность компактной и автономной установки (имеется – $K_3^{IV} = 1,0$; отсутствует – $K_3^{IV} = 0,5$).

Максимальный суммарный качественный показатель $K_v = 0,92$ получил следующий вариант подсистемы привода:

$$V^I = V1_2 \rightarrow V2_2.$$

Привод выбран гидравлический с рычажной системой передачи прижимного усилия. На основе проведенного анализа подмножество синтезированных структур системы виброизолирующего устройства представим в виде графа на рисунок 7. Общее сочетание вариантов может быть различным, поэтому с учетом перспективы создания элементов из серийно выпускаемого оборудования путем модернизации и распределения его технологических возможностей, используя оценки качества подсистем, приведенные выше, выбираем рациональный структурный вариант:

$$X^I \rightarrow Y^I \rightarrow Z^I \rightarrow V^I.$$

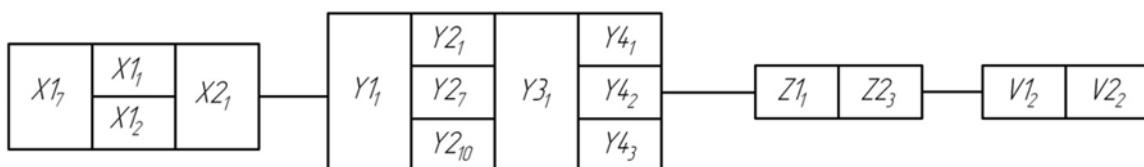


Рисунок 7 – Структура рационального варианта системы виброизолирующего устройства по качественным показателям

Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно–компоновочной оптимизации. Этап параметрического синтеза и проведение дополнительных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском государственном университете, позволили создать новые конструкции виброизолирующей опоры (рисунок 8) [4] и виброизолирующего устройства металорежущего станка плавучей мастерской (рисунок 9) [5].

Виброизолирующая опора (рисунок 8) содержит основание с резиновым элементом, имеющим пазы, ребра жесткости и верхнюю крышку. Нижняя часть регулировочного винта выполнена в виде штока с установленным на нем поршнем с калиброванным отверстием и шариковым клапаном сжатия. Поршень размещен в цилиндре, заполненном рабочей жидкостью. В верхней части цилиндра имеется направляющий узел с уплотнениями, взаимодействующими со штоком. Цилиндр закреплен в осевом отверстии резинового элемента. Установленные регулировочными винтами в отверстиях станины станка, указанные опоры работают следующим образом. Внешние источники колебаний в процессе работы через поверхность пола передают колебательные воздействия основанию с резиновым элементом и цилинду. Цилиндр, перемещаясь относительно поршня со штоком и перемещая жидкость под высоким давлением через клапаны, обеспечивает гашение колебаний, то есть гидравлическое демпфирование. При этом резиновый элемент, сжимаясь и выпучиваясь по свободным поверхностям, взаимодействует с вкладышем верхней крышки опоры, а также с полостями в пазах. В связи с тем, что при работе станка частота его собственных колебаний достаточно велика, в гашении как внешних, так и собственных колебаний принимают участие гидравлический демпфер (цилиндр, рабочая жидкость, поршень со штоком) и резиновый элемент с ребрами жесткости, которые обеспечивают также гашение колебаний в горизонтальной плоскости.



Рисунок 8 – Виброизолирующие опоры новой конструкции

Виброизолирующее устройство (рисунок 9) работает следующим образом. Металлорежущий станок, например, круглошлифовальный, устанавливают на палубе машинообрабатывающего участка плавучей мастерской (ПРМ или ПМ) на виброизолирующих опорах [4], помещая их регулировочные винты 8 в отверстиях станины и фиксируя их. В процессе работы станка внешние источники колебаний (компрессоры, оборудование, вентиляторы, станки) через поверхность палубы передают колебательные воздействия основанию 1 с резиновым элементом 2 и цилинду 3. Цилиндр 3 перемещается при этом относительно поршня 5 со штоком 8 в вертикальном направлении, перепуская рабочую жидкость через калиброванное отверстие 6 и шариковый клапан сжатия 7 из противоположной полости в штоковую и обратно – через калиброванное отверстие 6 при движении цилиндра 3 вниз. Сжимая жидкость под высоким давлением, обеспечивается гашение колебаний, то есть гидравлическое демпфирование. Поскольку плавучие ремонтные мастерские испытывают воздействие колебаний морской (речной) поверхности, находящиеся на палубах технологическое оборудование подвергается опасности смещения из-за отрыва основания опоры от поверхности палубы.

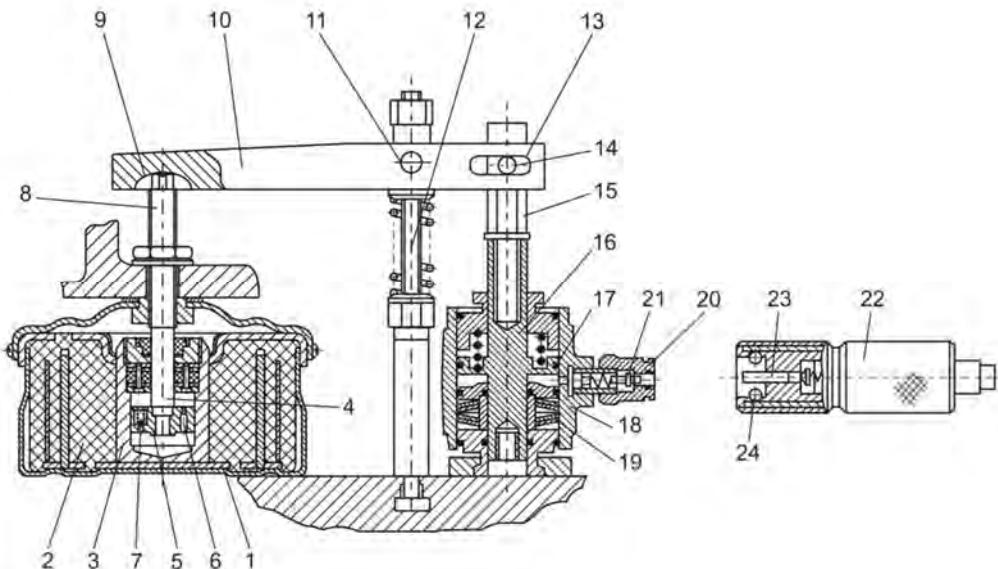


Рисунок 9 – Общий вид виброизолирующего устройства:

- 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие;
- 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось;
- 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр;
- 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта;
- 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

Для предотвращения сдвигов и перекосов станка верхнюю часть регулировочного винта 8 поджимают сферической поверхностью лунки 9 прихватом 10 путем присоединения большой полумуфты 22 с автоматическим запором масла, соединенной шлангом высокого давления с пневмогидравлическим преобразователем давления, к малой полумуфте 20 гидроцилиндра 18. При этом клапанный штырь 23, нажимая на клапан 21, открывает доступ маслу от пневмогидропреобразователя в гидроцилиндр 18. Шарики 24 фиксируют взаимное положение полумуфт 20 и 22. Под действием давления масла поршень 17 перемещается вверх, передавая усилие зажима через опору 15, завинченную в шток 16 поршня 17, прихвату 10, поджимающему посредством поворота на оси 11 опоры 12 регулировочный винт 8 с виброизолирующей опорой к поверхности палубы. Одновременно пружинный аккумулятор 19 перемещается вниз, сжимая пакет тарельчатых пружин. Затем большую полумуфту 22 со шлангом отсоединяют от малой полумуфты 20 гидроцилиндра 18. В дальнейшем давление масла в замкнутой гидросистеме поддерживается пружинным аккумулятором 19. Для предотвращения сдвигов и перекосов станка верхнюю часть регулировочного винта 8 поджимают сферической поверхностью лунки 9 прихватом 10 путем присоединения большой

полумуфты 22 с автоматическим запором масла, соединенной шлангом высокого давления с пневмогидравлическим преобразователем давления, к малой полумуфте 20 гидроцилиндра 18. При этом клапанный штырь 23, нажимая на клапан 21, открывает доступ маслу от пневмогидропреобразователя в гидроцилиндр 18. Шарики 24 фиксируют взаимное положение полумуфты 20 и 22. Под действием давления масла поршень 17 перемещается вверх, передавая усилие зажима через опору 15, завинченную в шток 16 поршня 17, прихвату 10, поджимающему посредством поворота на оси 11 опоры 12 регулировочный винт 8 с виброизолирующей опорой к поверхности палубы. Одновременно пружинный аккумулятор 19 перемещается вниз, сжимая пакет тарельчатых пружин. Затем большую полумуфту 22 со шлангом отсоединяют от малой полумуфты 20 гидроцилиндра 18. В дальнейшем давление масла в замкнутой гидросистеме поддерживается пружинным аккумулятором 19.

Предложенное устройство повышает надежность виброзащиты металлорежущих станков, установленных и работающих в условиях ПРМ, от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности; упрощает возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПРМ; повышает качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних и внутренних колебаний.

Разработанное устройство имеет следующие преимущества:

- повышается надежность виброзащиты металлорежущих станков, установленных и работающих в условиях ПМ, от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности;
- упрощается возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПМ путем применения вместо используемых в настоящее время бетонных фундаментов (даже для легких и средних станков) предлагаемых виброизолирующих устройств на каждой из опор;
- повышается качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних и внутренних колебаний, гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах.

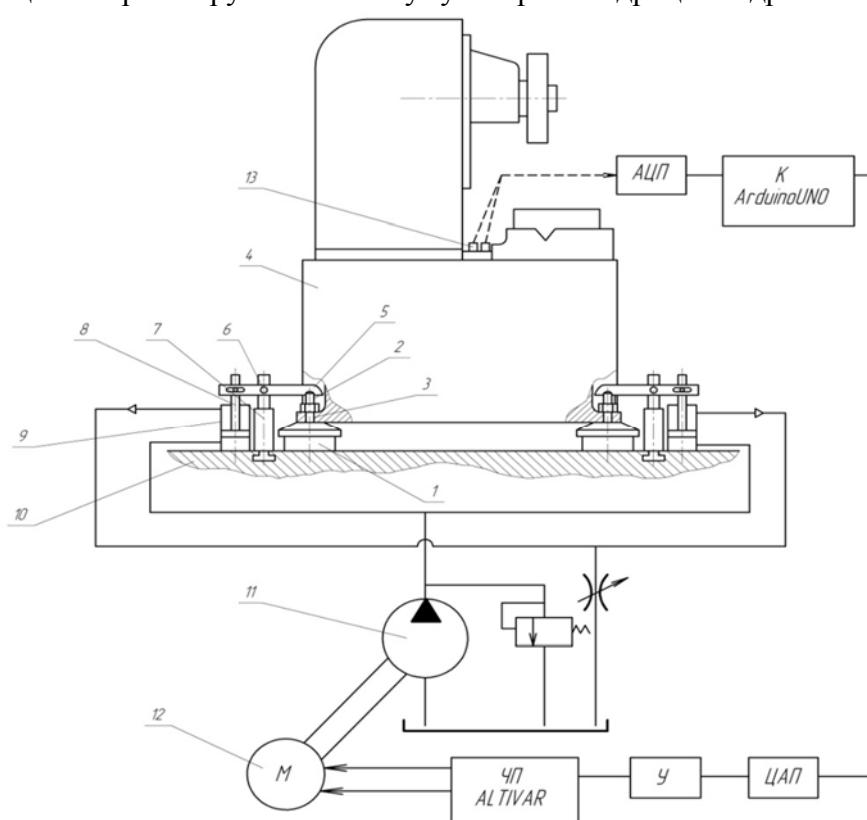


Рисунок 10 – Схема устройства автоматической виброзащиты станка, работающего в условиях плавучей мастерской

С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано устройство (рисунок 10) автоматической виброзащиты шлифовального станка, работающего в условиях плавучей мастерской [8]. Металлорежущий станок устанавливают на общей поверхности палубы механообрабатывающего участка плавучей ремонтной мастерской на четырех виброизолирующих опорах 1 [5], выполненных в виде основания с резиновым элементом и установленным в осевом отверстии цилиндром с рабочей жидкостью, поршнем со штоком 2, размещенным и зафиксированным в отверстиях станины 3 станка 4. В процессе воздействия на станину станка 4 колебаний от внешних источников через поверхность палубы передаются колебательные воздействия через опору 1 и цилиндр со штоком 2, обеспечивая гашение колебаний, то есть механическое и гидравлическое демпфирование. Для предотвращения сдвига и перекоса станка верхнюю часть штока 2 поджимают прижимом 5, размещенным на оси 6 стойки 7. Задней частью прижим 5 взаимодействует со штоком 8 антивибрационного гидроцилиндра 9, закрепленного на поверхности 10 палубы вместе со стойкой 7. Нижняя полость антивибрационного гидроцилиндра 9 связана с гидронасосом 11, работающим от асинхронного электродвигателя 12. Однако внешние воздействия не являются постоянными как по частоте, так и по амплитуде. Для исключения вредного влияния этих колебаний на процесс обработки, в частности, для снижения волнистости при шлифовании деталей установленные на направляющих станины 3 вибродатчики 13 преобразуют вибрации в электрические сигналы, которые через АЦП передаются на вход программируемого логического контроллера ArduinoUNO. Указанный контроллер через ЦАП и усилитель, а также ЧП Altivar, регулируя частоту вращения электродвигателя 12 и насоса 11, соответственно увеличивает или уменьшает давление в бесштоковой полости антивибрационного гидроцилиндра 9, тем самым увеличивая или уменьшая жесткость виброизолирующей опоры воздействием через прижим 5 на шток 2. Контроллер ArduinoUNO настраивается таким образом, что при появлении на выходе вибродатчиков 13 низкочастотных высокомощных вибраций, выходящих за пределы расчетных (нормальных), генерируются соответствующие сигналы на выходе контроллера, позволяющие повысить жесткость вибоопоры путем увеличения давления рабочей жидкости в антивибрационном гидроцилиндре 9 за счет увеличения давления в напорном трубопроводе от насоса 11 с электродвигателем 12 и ЧП Altivar.

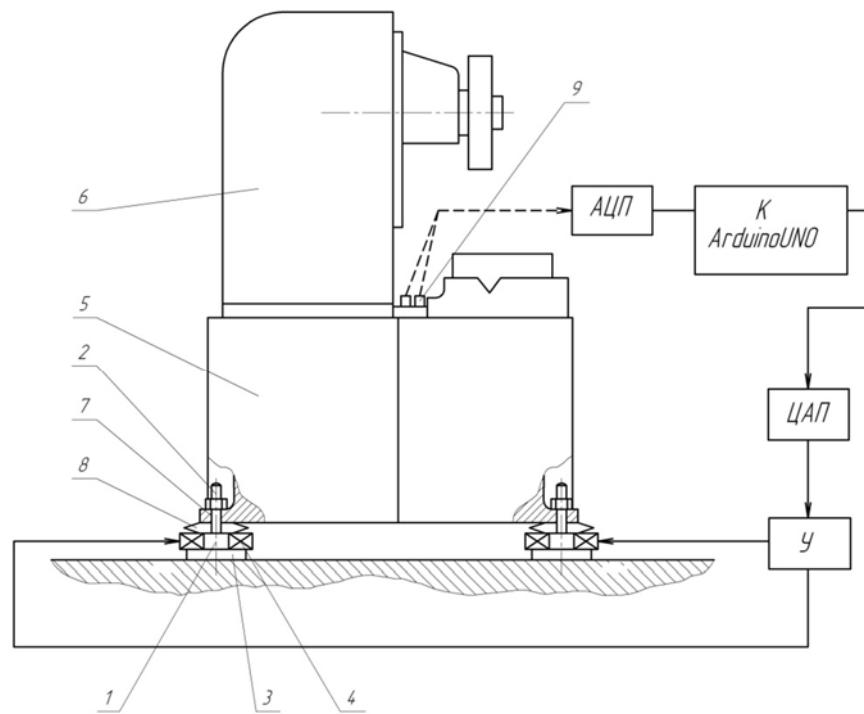


Рисунок 11 – Схема опоры металлорежущего станка с активной виброизоляцией

На рисунке 11 показан общий вид нового устройства опоры металлорежущего станка с активной виброизоляцией [9]. Устройство содержит цилиндрический корпус 1 с гидравлической полостью, заполненной магнитореологической жидкостью (условно не показаны), шток 2 с поршнем, клапанами, уплотнительным и направляющим узлами (условно не показаны). Цилиндрический корпус 1 нижней частью установлен соосно в основании опоры 3 с резиновым элементом. Снаружи на верхней выступающей части цилиндрического корпуса 1 закреплена обмотка электромагнита 4. Между верхним торцом цилиндрического корпуса 1 и опорной поверхностью станины 5 станка 6 на штоке 2, зафиксированном в отверстии 7 станины 5, размещены упругие элементы – тарельчатые пружины 8. Обмотка электромагнита 4 связана с вибродатчиками 9, установленными на станине 5 станка 6 через управляющее устройство. Управляющее устройство включает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), контроллер (К) типа ArduinoUNO, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель (У).

Металлорежущий станок устанавливают на виброизолирующих опорах на общей поверхности пола механообрабатывающего участка. Каждая опора содержит корпус 1, полость которого заполнена магнитореологической жидкостью – коллоидным раствором нанодисперсных ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом, в жидкости–носителе. В полости корпуса 1 также размещены шток 2 с поршнем, клапанами, уплотнительным и направляющим узлами. В процессе воздействия на станину 5 станка 6 колебаний от внешних источников (компрессоры, технологическое оборудование, прессы и др.) через поверхность пола передаются колебательные воздействия через основание опоры 3 с резиновым элементом, корпус 1, упругие элементы – тарельчатые пружины 8 на станину 5 станка 6. Частоты и амплитуда этих воздействий в силу стохастической природы изменяются в широком диапазоне и требуют от демпфирующих элементов постоянной адаптации – поднастройки жесткости, изменений сил сопротивления усилиям растяжения – сжатия поршня со штоком 2 в корпусе 1. Для этого установлены на направляющих станины 5 вибродатчики 9 (например типа СД-21, AP2037, EMD-Vibration или SVAN-954), преобразуя вибрации в электрические сигналы, передают их через АЦП на вход программируемого логического контроллера ArduinoUNO. Указанный контроллер через ЦАП и усилитель передает электрический сигнал в обмотку электромагнита 4, который воздействуя электромагнитным полем на магнитореологическую жидкость в полости корпуса 1, меняет ее вязкость. При этом меняется скорость перетекания ее через клапаны в поршне и, как следствие – изменяются усилия сопротивления растяжению–сжатию в гидравлической полости виброизолирующего устройства, тем самым увеличивая или уменьшая его жесткость. Контроллер ArduinoUNO настраивается таким образом, что при появлении на выходе вибродатчиков 9 вибраций, выходящих за пределы допустимых (с учетом обеспечения требуемых параметров точности деталей при обработке), генерируются соответствующие сигналы на выходе контроллера, позволяющие изменить жесткость опоры путем изменения тока в обмотке электромагнита.

Устройства позволяют обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, в том числе и от колебаний водной поверхности; повысить динамические качества станка и надежность его виброзащиты при работе в условиях плавучих мастерских; обеспечить возможность регулировки управляющих воздействий на жесткость виброизолирующих опор в широком диапазоне путем использования современной платформы ArduinoUNO, имеющей 14 цифровых входов и 6 выходов, кварцевый генератор, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и устройство перезагрузки; повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует виброизолирующая механо–гидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от сигналов с вибродатчиков, размещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка. Второе устройство обеспечивает также высокое быстродействие системы управления за счет уникальных свойств магнитореологической жидкости (реакция системы – 1 миллисекунда). При этом повышается

качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует опора с активной виброизоляцией за счет изменения вязкости магнитореологической жидкости в зависимости от сигналов вибродатчиков.

Такой подход позволил решить задачу на уровне структурно-компонентной оптимизации на основе метода морфологического анализа [6,7] с последующим параметрическим синтезом и создать реальную конструкцию наиболее эффективных вариантов виброизолирующих опор и устройств. Предложены конструктивные решения по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, а также опора с активной виброизоляцией. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской, а также надежности виброизолирующих устройств с целью повышения качества шлифовальной обработки и точности детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братан, С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая. – Вестник НТУ «ХПИ». – Сб. научн. трудов. – 2008. – № 35. – С. 13–22.
2. Владецкая, Е.А. Повышение вибrouстойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 7. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – С. 103–111.
3. Кузнецов, Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н.Кузнецов, Ю.К.Новоселов, И.В. Луцив. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 252 с.
4. Пат. 36389 Україна, МПК В 23Q 1/00. Віброізоляюча опора металорізального верстата / О.О. Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацький. – №200806169; заявл.12.05.2008; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.
5. Пат. №51621 Україна, МПК B23Q 1/00, Віброізоляючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні/ О.О.Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Д.О. Владецький. – №201000394; заявл.18.01.2010; опубл.26.07.2010, Бюл. № 14.
6. Владецкая, Е.А. Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр./ Редкол.:С.М.Братан (відп.ред.) та ін.; Севастоп. нац. техн.. ун-т.–Севастополь: Вид-во СевНТУ. – 2013. – С. 14–20.
7. Владецкая, Е.А. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – 2015. – С. 139–148.
8. Пат. №5464512 Российская Федерация, МПК B23Q 1/25, B23Q 1/44, F16F 9/14, Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка/ Е.А. Владецкая, А.О.Харченко, С.М. Братан и др. – №2015125213/02(039278); заявл.25.06.2015; опубл 27.10.2015.
9. Пат. №8431243 Российская Федерация, МПК B23Q 1/25, B23Q 1/44, F16F 9/14, Опора металлорежущего станка с активной виброизоляцией / Е.А. Владецкая, А.О.Харченко, С.М. Братан и др. – № 2015125862/02, заявл.29.06.2015; опубл 27.10.2015.

Владецкая Екатерина Александровна
Севастопольский государственный университет
Кафедра технологии машиностроения
Ул. Университетская, 33, СевГУ, Севастополь, 299053
Тел. (8692) 54–06–67.
E-mail: vladetska@rambler.ru

Харченко Александр Олегович
Севастопольский государственный университет
Кафедра технологии машиностроения
Ул. Университетская, 33, СевГУ, Севастополь, 299053
Тел. (8692) 54–06–67,
E-mail: khao@list.ru

Братан Сергей Михайлович
Севастопольский государственный университет
Кафедра технологии машиностроения
Ул. Университетская, 33, СевГУ, Севастополь, 299053
Тел. (8692) 54–06–67

Владецкий Дмитрий Олегович
Филиал «Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь
Ул. Героев Севастополя, 7, корп. 8/22, Севастополь, 299009.
E-mail: vladetski@gmail.com

Ye.A. VLADETSKAYA, S.M. BRATAN, A.O. KHARCHENKO, D.O. VLADETSKIY

GRINDING PROCESS QUALITY ASSURANCE ON BOARD OF FLOATING WORKSHOP BY REDUCING IMPACTS OF EXTERNAL DISTURBANCES

The results of theoretical and practical work in the direction of improving the quality of the grinding process by finding the optimal structure of the machine vibration isolation, reduces the level of external influences on it under working in the conditions of a floating workshop.

Keywords: floating workshop, grinding machine, grinding processing quality, anti-vibration mounts, vibration isolator, morphological matrix, graphs of structural variants, automatic vibration protection, automatic damping control, active vibration isolation mounts.

BIBLIOGRAPHY

1. Bratan, S.M. Analiz vliyaniya kolebaniy, peredavayemykh cherez fundament stanka, na kachestvo protsesssa shlifovaniya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya. – Vestnik NTU «KHPI». – Sb. nauchn. trudov. – 2008. – № 35. – S. 13–22.
2. Vladetskaya, Ye.A. Povysheniye vibroustoychivosti shlifovalnykh stankov plavuchikh remontnykh masterskikh / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Suchasni tehnoloži v mashinobuduvanní: zb. nauk. prats. Vip. 7. – Kharkív: NTU «KHPI». – 2012. – S. 103–111.
3. Kuznetsov, YU.N. Teoriya tekhnicheskikh sistem / YU.N.Kuznetsov, YU.K.Novoselov, I.V. Lutsiv. – Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2010. – 252 s.
4. Pat. 36389 Ukraína, MPK V 23Q 1/00. Vibroizolyuyucha opora metalorizalnogo verstata / O.O. Kharchenko, K.O. Vladetska, S.M. Bratan, YU.L. Rapatskiy. – №200806169; zayavl.12.05.2008; opubl. 27.10.2008, Byul. № 20.
5. Pat. №51621 Ukraína, MPK B23Q 1/00, Vibroizolyuyuchiy pristríy metalorízalnogo verstata plavuchoi remontoí maysterní/ O.O.Kharchenko, K.O. Vladetska, S.M. Bratan, D.O. Vladetskiy. – №201000394; zayavl.18.01.2010; opubl.26.07.2010, Byul. № 14.
6. Vladetskaya, Ye.A. Optimizatsiya struktury vibrozashchitnykh sistem shlifovalnogo stanka na osnove morfologicheskogo analiza / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Vísnik SevNTU. Vip.140: Mashinopradobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr./ Redkol.:S.M.Bratan (vidp.red.) ta in.; Sevastop. nats. tekhn.. un-t.–Sevastopol: Vid-vo SevNTU. – 2013. – S. 14–20.
7. Vladetskaya, Ye.A. Povysheniye dinamicheskogo kachestva shlifovalnogo stanka na osnove optimizatsii vibroizoliruyushchikh ustroystv / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, D.O. Vladetskiy // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii. – Sevastopol: FGAOU VO «Sevastopolskiy gosudarstvenny universitet». – 2015. – S. 139–148.
8. Pat. №2464512 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23Q 1/25, B23Q 1/44, F16F 9/14, Ustroystvo avtomaticheskoy vibrozashchity metallorehzhushchego stanka/ Ye.A. Vladetskaya, A.O.Kharchenko, S.M. Bratan i dr. – №2015125213/02(039278); zayavl.25.06.2015; opubl 27.10.2015.
9. Pat. №2431243 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23Q 1/25, B23Q 1/44, F16F 9/14, Opora metallorehzhushchego stanka s aktivnoy vibroizolyatsiyey / Ye.A. Vladetskaya, A.O.Kharchenko, S.M. Bratan i dr. – № 2015125862/02, zayavl.29.06.2015; opubl 27.10.2015.

Vladetskaya Yekaterina Aleksandrovna
Sevastopol State University
Department of Mechanical Engineering
Str. University, 33, SevGU, Sevastopol 299053
Ph. (8692) 54–06–67.
E-mail: vladetska@rambler.ru

Kharchenko Aleksandr Olegovich
Sevastopol State University
Department of Mechanical Engineering
Str. University, 33, SevGU, Sevastopol 299053
Ph. (8692) 54–06–67,
E-mail: khao@list.ru

Bratan Sergey Mikhaylovich
Sevastopol State University
Department of Mechanical Engineering
Str. University, 33, SevGU, Sevastopol 299053
Ph. (8692) 54–06–67

Vladetskiy Dmitriy Olegovich
Branch «State Maritime University. adm. FF Ushakov» in Sevastopol
Str. Heroes of Sevastopol, 7, Bldg. 8/22, Sevastopol 299009.
E-mail: vladetski@gmail.com

АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В РАСЧЕТАХ ГИБКИ ТРУБ

Излагается метод расчета размеров деформированного сечения изогнутой трубы, основанный на подборе параметров аппроксимации, удовлетворяющих условиям статики и принципу минимума полной потенциальной энергии системы внутренних и внешних сил.

Ключевые слова: равновесие элемента трубы, задание функций перемещений, подбор значений неизвестных, вычислительные программы типа MathCAD.

Гибка тонкостенных труб без применения дорнов и наполнителей приводит к значительному изменению формы сечений. Уменьшение их высоты ΔH и увеличение ширины ΔB , регламентируемые отраслевыми стандартами [1, 2], рассчитывают приближенно – с использованием так называемых аппроксимаций. Наиболее значимая из них подчиняет радиальные перемещения u_r точек средней линии сечения (окружности радиуса r в исходном состоянии) априорно заданной зависимости от угловой координаты α . Пример: $u_r = -0,5\Delta H \cos 2\alpha$ из первых публикаций по данной проблематике [3] фактически устанавливает двухосную симметрию поля перемещений u_r и сомнительное, с точки зрения практики, соотношение: $\Delta H = -\Delta B$. Тригонометрический компонент зависимости также вызывает вопросы и заслуживает изучения на предмет адекватности.

Рассмотрим зависимость:

$$u_r = \frac{\Delta H}{2} \left[(\sin(\alpha)^2)^m - (\cos(\alpha)^2)^m \right], \quad (1)$$

эквивалентную приведенной выше при $m = 1$. Данный параметр может принимать любые положительные значения, включая нецелочисленные и меньшие единицы. В дальнейших расчетах правая часть (1) заменяется двумя членами тригонометрического ряда Фурье, что устраняет проблемы дифференцирования и интегрирования при выводе формул деформаций. Значения измененной зависимости (1):

$$\bar{u}_r = \sum c_i \cos 2i\alpha \quad (i = 1, 3; \quad c_i = \frac{2}{\pi} \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} u_r \cos(2i\alpha) d\alpha)$$

отличаются от исходных менее чем на 0,5% во всем диапазоне $0 \leq \alpha \leq 2\pi$.

Для определения неизвестных m и ΔH предлагаемой зависимости используем условия равновесия элемента трубы, изображенного сплошными линиями на рисунке 1.

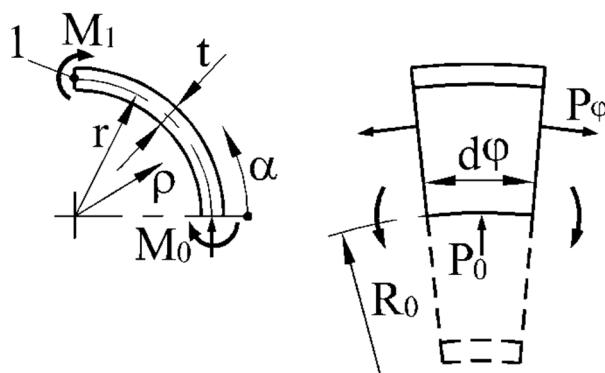


Рисунок 1 – Расчетная схема с равнодействующими напряжениями

При изгибе моментом в площадках элемента действуют лишь нормальные напряжения:

$$\sigma_\alpha = \frac{2K}{3\varepsilon_i^{1-n}}(2\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\varphi); \quad \sigma_\varphi = \frac{2K}{3\varepsilon_i^{1-n}}(2\varepsilon_\varphi + \varepsilon_\alpha). \quad (2)$$

Здесь K и n – константы степенной функции упрочнения жесткопластического материала трубы; $\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_\alpha^2 + \varepsilon_\varphi^2 + \varepsilon_\alpha \varepsilon_\varphi + 0,25 \gamma_{\rho\alpha}^2}$; радиальными напряжениями пренебрегали.

Значения внутренних сил и моментов вычисляет программа MathCAD интегрированием по площадкам элемента без учета изменения толщины стенки трубы и формы ее сечений. Выражения напряжений и деформаций вводим в программу в формате функций полярных координат ρ, α . Равнодействующие P_φ напряжений σ_φ проецируются на плоскость симметрии элемента и создают момент M_φ относительно точки 1, не показанный на рисунке. В уравнениях равновесия:

$$\frac{M_0 - M_1 + M_\varphi}{-P_0 r} = 1; \quad \frac{P_\varphi d\varphi}{-P_0} = 1 \quad (3)$$

учитывается отрицательный знак M_1 и P_0 – равнодействующей напряжений σ_α в площадке с нулевой координатой α . Равенство нулю аналогичных равнодействующих в других площадках задаем выражениями:

$$\frac{R_0 + r}{P_0} \int_{r_2}^{r_1} \sigma_\alpha \left(\rho, \frac{\pi}{2} \right) d\rho = 0; \quad \frac{R_0 - r}{P_0} \int_{r_2}^{r_1} \sigma_\alpha \left(\rho, -\frac{\pi}{2} \right) d\rho = 0. \quad (4)$$

Здесь $r_{1,2} = r \pm 0,5t$; напряжение σ_α записано в формате функции с фиксированной координатой α . Угловой размер элемента $d\varphi$ и константа K функции упрочнения сокращаются в развернутой записи (3) и (4) при вводе в вычислительную программу.

В формулы напряжений (2) входят деформации:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho + u_r}{R_0} \sin \alpha; \quad \varepsilon_\alpha = \frac{\partial u_\alpha}{\rho \partial \alpha} + \frac{u_\rho}{\rho}; \quad \gamma_{\rho\alpha} = \frac{\partial u_\rho}{\rho \partial \alpha} + \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{u_\alpha}{\rho} \right).$$

Радиальное перемещение u_r выражается из условия постоянства объема с использованием функции:

$$\frac{du_\alpha}{\rho d\alpha} = (\rho - r) \Delta \xi + \frac{r^2 + \rho^2}{R_0 \rho} (k_1 \cos 2\alpha + k_2 \sin^2 \alpha + k_3 \sin \alpha). \quad (5)$$

Варьируемые коэффициенты k_1, k_2, k_3 служат регуляторами выполнения условий (3) и (4); изменение кривизны $\Delta \xi$ средней линии сечения выражается точной формулой дифференциальной геометрии [4]. Применение известного приближения

$\Delta \xi_{\text{прибл}} = \frac{-1}{r^2} (u_r + u''_r)$, погрешность которого может достигать десятков процентов, следует ограничивать расчетами слабого искажения сечений, присущего толстостенным трубам, изогнутым на большой радиус.

Тригонометрические компоненты функции (5) подобраны таким образом, что значения k_2 и k_3 влияют преимущественно на соблюдение условий (4). Поэтому сначала подбирали коэффициент k_1 и параметр ΔH функции (1) сообразно с уравнениями (3). Подбор значений всех неизвестных заканчивался, когда отношения (3) отличались от единицы менее, чем на 0,2%, а значения выражений (4) оставались в диапазоне $\pm 0,001$. Соблюдение названных требований обеспечивалось при любых значениях параметра m функции (1) в диапазоне, показанном на рисунке 2.

Четкая визуализация минимумов нижней кривой достигается изображением ее фрагментов с 10-кратным увеличением значений логарифма отношения Π/Π_{\min} , (пунктирные линии). Сплошные линии строили по нескольким десяткам точек, минимальные приращения аргумента порядка 0,01 задавали в окрестностях значений $m = 1$ и $m = 2$. Им соответствуют 2-я и 4-я степени синуса и косинуса в правой части (1), уникальные тем, что приводят к

одинаковым выражениям производных перемещения u_r . При этом практически совпадают результаты вычисления изменения кривизны $\Delta\xi$ средней линии сечения, а также значений ΔH , равных $H - d$.

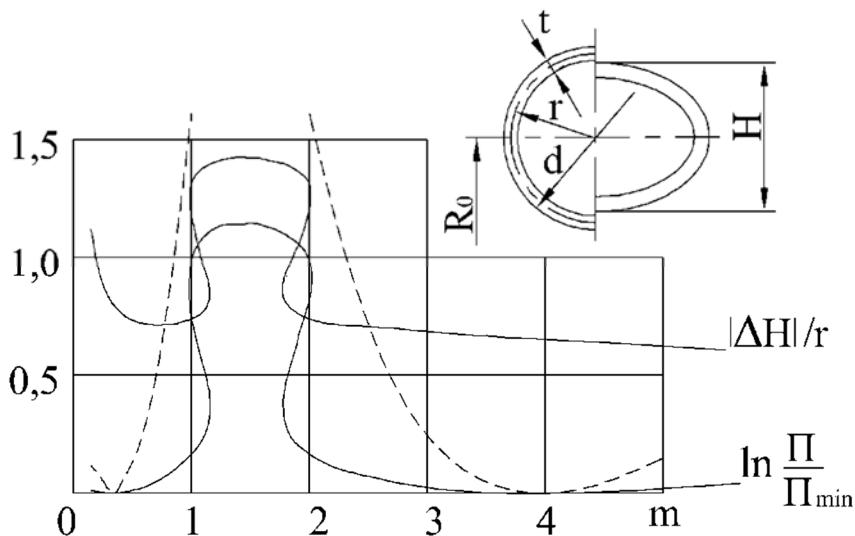


Рисунок 2 – Зависимости рассчитанной высоты сечения и полной потенциальной энергии системы Π от параметра t функции (1): $R_0/r = 8$; $t/r = 0,1$; $n = 0,15$

Положение максимумов кривых на рисунке 2 относительно нижней шкалы объясняется тем, что при $t = 1,5$ и фиксированных значениях ΔH и α абсолютная величина $\Delta\xi$ оказывается минимальной. Поэтому для соблюдения условий (3) и (4) требуется максимальное значение $|\Delta H|$. Пологий участок кривой $|\Delta H|/r$, включающий точку максимума, «нависает» над ее боковыми частями, что стало причиной неоднозначности результатов расчета. Так при t , равном 1 и 2, условиям статики удовлетворяют три значения ΔH : $-11,05$; $-17,95$ и $-19,7$. Эти аномалии не имеют практических последствий, поскольку располагаются в отдалении от минимумов кривой $\ln(\Pi/\Pi_{\min})$.

Согласно принципу Лагранжа из всех кинематически допустимых систем перемещений должна быть выбрана та, что придает потенциальной энергии минимальное значение. Локальные минимумы величины Π на рисунке 2 почти одинаковы, им соответствуют близкие значения $|\Delta H| \approx 0,3d$ при весьма различных значениях аргумента $t = 4$ и $t = 0,35$. Последнее обстоятельство косвенным образом подтверждает адекватный характер используемой аппроксимации перемещений.

Полная потенциальная энергия системы Π выражается суммой $A + W$. Работу внутренних сил W находили интегрированием суммы произведений напряжений на соответствующие деформации по объему элемента, показанного на рисунке 1 сплошными линиями. Работа внешних сил в данном случае равна моменту напряжений σ_ϕ , умноженному на угловой размер элемента $d\varphi$, который сокращается в отношении Π/Π_{\min} .

Изменение параметра n функции упрочнения, а также соотношений размеров изогнутой трубы, содержащихся в подрисуночной надписи к рисунку 2, приводит к смещению рассчитанных минимумов величины Π и соответственно – значений параметра t функции (1).

Расчет размеров деформированного сечения изогнутой трубы включает кинематически допустимую аппроксимацию поля перемещений независимо от метода решения задачи – вариационного или статического. Подбор параметров аппроксимирующих зависимостей позволяет соблюсти условия равновесия и принцип минимума полной потенциальной энергии системы внутренних и внешних сил. Вычисления выполняются в среде программы MathCAD или ее аналога, объем вводимой программы (примерно полторы страницы экрана) многократно уменьшается по сравнению с традиционным решением той же задачи вариационным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марынин, Б.Н. Гидрогазовые системы летательных аппаратов / Б.Н. Марынин, С.Б. Марынин, А.Г. Прохоров и др. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
2. Никитин, В.А. Проектирование станков холодной и горячей гибки труб / В.А. Никитин. – СПб.: ОАО «ЦТСС», – 2011. – 236 с.
3. Билобран, Б.С. Сплющивание тонкостенных труб при холодном пластическом изгибе / Б.С. Билобран // Кузнецко-штамповочное производство. – 1968. – № 7. – С. 20 – 23.
4. Алексеев, Ю.Н. Овальность труб в процессе гибки. В кн.: Вопросы пластического течения металлов / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та. – 1958. – С. 154 – 164.

Вдовин Сергей Иванович

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Автоматизированные процессы и
машины бесстружковой обработки
материалов»
Тел.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

Лунин Константин Сергеевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
Аспирант кафедры
«Автоматизированные процессы и
машины бесстружковой обработки
материалов»
Тел.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

Федоров Тимофей Васильевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК
Кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры
«Автоматизированные процессы и
машины бесстружковой
обработки материалов»
Тел.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

S.I. VDOVIN, K.S. LUNIN, D.V. FEDOROV

**APPROXIMATION OF DISPLACEMENTS
IN CALCULATIONS OF FLEXIBLE PIPES**

A method of calculating the size of the deformed section of the curved pipe, based on the choice of parameters of approximation satisfying static and the principle of minimum total potential energy of the system of internal and external forces.

Keywords: balance pipe element, the job functions of movement, choice of values of the unknowns, computing programs such as MathCAD.

BIBLIOGRAPHY

1. Marin, B.N. Gidrogazovyye sistemy letatelnykh apparatov / B.N. Marin, S.B. Marin, A.G. Prokhorov i dr. – Vladivostok: Dalnauka, 2006. – 459 s.
2. Nikitin, V.A. Proyektirovaniye stankov kholodnoy i goryachej gibki trub / V.A. Nikitin. – SPb.: OAO «TSTSS», – 2011. – 236 s.
3. Bilobran, B.S. Splyushchivaniye tonkostennyykh trub pri kholodnom plasticheskem izgibe / B.S. Bilobran // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. – 1968. – № 7. – S. 20 – 23.
4. Alekseyev, YU.N. Ovalnost trub v protsesse gibki. V kn.: Voprosy plasticheskogo techeniya metallov / YU.N. Alekseyev. – Kharkov: Izd-vo Kharkovskogo un-ta. – 1958. – S. 154 – 164.

Vdovin Sergey Ivanovich

VPO State University – ESPC
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department
«Automated processes and machines
without chip material handling
Ph.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

Lunin Konstantin Sergeyevich

VPO State University – ESPC
Post-graduate student of the
department «Automated processes and
machines without chip material
handling»
Ph.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

Fedorov Timofey Vasilyevich

VPO State University – ESPC
Ph.D., Associate Professor of the
Department «Automated processes
and machines without chip material
handling»
Ph.: 8–905–167–0517
E-mail: vdovostu@mail.ru

ИЕРАРХИЯ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Статья посвящена вопросу совершенствования терминологии в технологии машиностроения на основе упорядочения представлений об иерархической структуре строения процессов. В качестве исходного материала использованы представления о структуре технологического процесса известного отечественного учёного А.П. Соколовского, а также стандартные термины и их определения, используемые в технологии машиностроения в настоящее время. В результате проведённого анализа структура Соколовского существенно скорректирована, после чего стала более согласующейся с представлениями о процессах в технологии машиностроения. В статье наглядно продемонстрирован факт наличия взаимосвязи между структурным строением объекта классификации и расположением конкретных объектов конкретных уровней в самой классификации. Это взаимоподтверждает справедливость как представлений о структуре объекта, так и его классификации. Предложен новый подход к определению терминов процессов.

Ключевые слова: технология машиностроения, технологические процессы, иерархия, термины, определения, наименования.

Анализ строения процессов осуществим на основе представлений об их обобщённой структуре, представленной в работе [1].

В технологии машиностроения чаще всего иерархию построения начинают рассматривать с производственного процесса, хотя имеются процессы и более высоких уровней (ГОСТ 23004–78). Производственный процесс состоит из ряда технологических процессов, отдельный технологический процесс – из ряда операций, операция – из переходов и так далее. Структурное представление о таком построении процессов в технологии машиностроения было дано ещё в 30-ых годах прошлого столетия А.П. Соколовским [2] (рисунки 1 и 2) и не претерпело существенных изменений по настоящее время (см. действующие по сей день ГОСТ 3.1109–82, ГОСТ 14.004–83, ГОСТ 23004–78 и так далее).

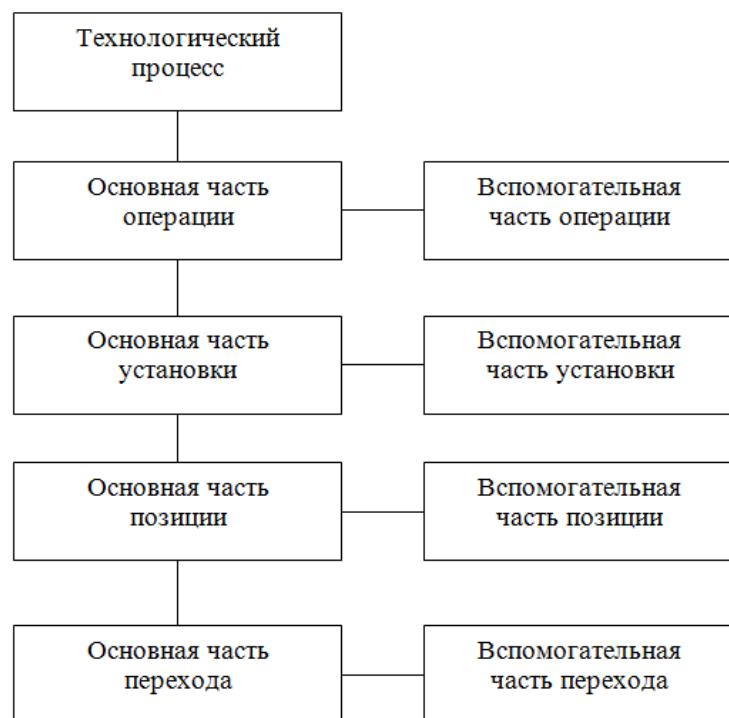


Рисунок 1 – Видоизмененное изображение реального технологического процесса [2]

Рассматривая эти структуры, следует отметить, что изображение А.П. Соколовским процесса двумя структурами может привести к множественному его толкованию, то есть не даёт определенности представления о процессе. Поясняя эти структуры, сам автор говорит о том, что они равносильны. Но ведь они не одинаковы?

Анализируя далее замечаем, что одна из них (рисунок 1) представляет качественный состав различных уровней процесса, другая (рисунок 2) – количественный состав. Учитывая то, что термины «операция», «установка» и так далее обозначают всю совокупность действий, входящих в эти понятия, термины «основная часть операции», «вспомогательная часть операции», «основная часть установки» и так далее являются лишь частями соответствующих понятий. Кроме того, уже само наименование этих частей говорит об их принадлежности. Значит структуру (рисунок 1) нельзя считать правильной, так как, например, основная и вспомогательная части операции являются составными частями операции, а не основной части технологического процесса. Следовательно, основные и вспомогательные части процессов из схемы на рисунке 1 должны быть перенесены на соответствующие места в схеме на рисунке 2 после чего получим схему изображённую на рисунке 3.

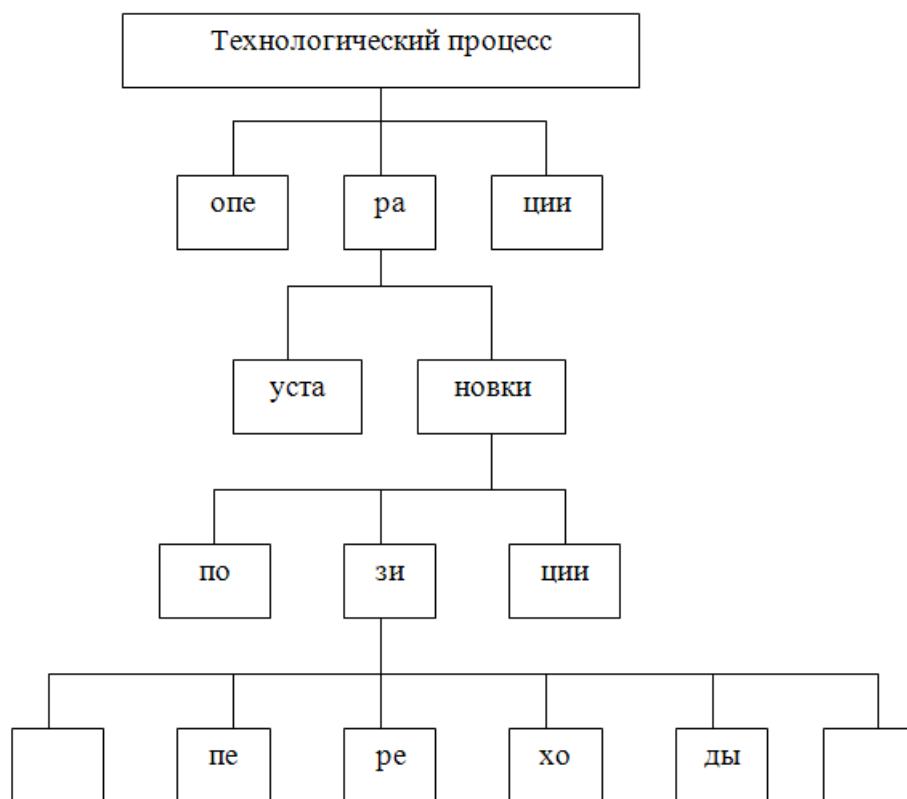


Рисунок 2 – Структура реального технологического процесса [2]

Как видно из полученной схемы количественный состав представлен лишь для основных частей процессов. Совершенно очевидно, что и вспомогательные части процессов имеют такое же количественное многообразие.

Далее рассмотрим определения понятий, представленные в структуре А.П. Соколовского в виде уровней. Выпишем стандартные определения этих понятий и расширим их круг на столько, насколько это позволяют сделать стандарты ГОСТ 3.1109–82 и ГОСТ 14.004–83.

«Производственный процесс это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции». «Технологический процесс это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда». «Технологическая операция это законченная часть технологического процесса, выполняемая

на одном рабочем месте». «Установ это часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы». «Позиция это фиксированное положение, занимаемое неизменно закреплённой обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования при выполнении определённой части операции». «Технологический переход это законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке». «Вспомогательный переход это законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода». «Рабочий ход это законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменения формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки». «Вспомогательный ход это законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, необходимого для подготовки рабочего хода».

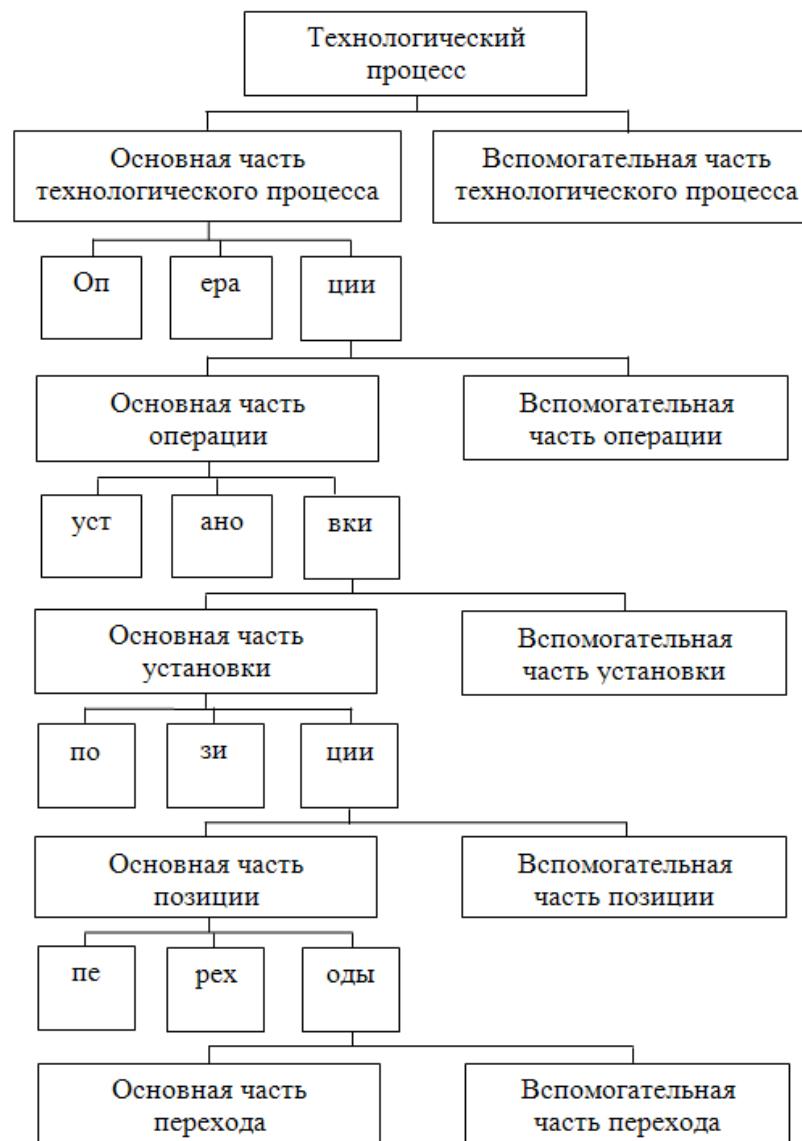


Рисунок 3 – Изображение реального технологического процесса по А.П. Соколовскому после совмещения схем на рисунках 1 и 2

Согласно определений понятий, входящих как уровни в структуру А.П. Соколовского, мы видим, что и «установка», и «позиция», и «переход» являются частями операции. Из самой же структуры (рисунок 2) следует, что установка является частью операции, позиция частью установки и переход частью позиции. Следовательно, здесь наблюдается явное противоречие между определением термина и его расположением в структуре А.П. Соколовского. Это подтверждает правильность осуществлённых нами выше действий по объединению структур, изображённых на рисунках 1 и 2.

Далее из перечисленных определений заключаем, что эти термины существенно разнородны. Наименования и стандартные определения терминов: «производственный процесс», «технологический процесс», «технологическая операция», «технологический переход» и «рабочий ход» – гармоничны и вместе обозначают действия, связанные с преобразованием предмета труда (заготовки) в продукцию (готовое изделие, например, деталь), то есть основные части процессов. Наименования же и стандартные определения терминов «установка» и «позиция» – напротив с разных сторон характеризуют рассматриваемые процессы. Оба наименования характеризуют некоторое положение в пространстве и действия, не связанные с изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки. В определениях же их говорится о тех действиях, которые как раз таки связаны с изменениями этих параметров. То есть имеется явное противоречие между наименованиями и определениями терминов. Как из сказанного следует, по наименованию данные термины это вспомогательные действия и явления. Следовательно, из списка терминов, обозначающих основные части процессов, они должны быть удалены. Кроме того, здесь же отмечаем, что у всех перечисленных терминов вспомогательные части процессов (наименования) появляются лишь на уровнях перехода и хода. Однако, анализируя содержание процессов различных уровней на практике, приходим к выводу, что вспомогательные части присущи процессам всех уровней и, следовательно, должны присутствовать на всех уровнях, как это сделано в структуре А.П. Соколовского (рисунок 1).

Далее видим, что в большинстве определений используется словосочетание «законченная часть», которое по смыслу практически соответствует понятию цикла. Отсутствие данного словосочетания в определениях «производственного процесса» и «технологического процесса» по всей видимости, связано лишь с тем, что эти понятия находятся наверху представленных в стандартах иерархий. Однако с полным основанием можно утверждать, что в определениях данных понятий это словосочетание также должно присутствовать. Следовательно, все понятия, представленные в структуре А.П. Соколовского и стандартах в виде уровней, являются циклами.

Анализируя определения дальше, заметим, что цель существования процесса указана лишь у двух уровней: «производственного процесса» и «технологического процесса». При этом, указанные в определениях цели, имеют принципиальное отличие. У «производственного процесса» это продукция, то есть то, что получается на выходе процесса, у «технологического процесса» это предмет труда, то есть то, что поступает на вход процесса. Сравнивая эти варианты, заключаем, что, конечно же, выход процесса, а точнее та его часть, которая представляет полезный продукт и является целью процесса. Кроме того, здесь следует сказать, что цель у процессов различных уровней различна хотя бы с точки зрения объёма выполняемых действий. Следовательно, цели процессов различных уровней ещё и являются их отличительной особенностью. Поэтому совершенно очевидно, что если в наименовании процесса указать цель (то ради чего процесс существует), то дефинитивность данного термина будет существенно улучшена.

Дополнительным подтверждением правильности такого решения служит пример значительного расхождения при определении понятия операции. Ставшее уже классическим стандартное определение операции ориентирует нас с точки зрения границ операции на все те действия, которые осуществляются на отдельном рабочем месте. То есть здесь помимо признаков, указываемых при определении технологического процесса (частью чего является понятие данного уровня, какие действия и над чем в данном процессе осуществляются) добавлен еще один, определяющий место, на котором эти действия осуществляются. Однако

Г.А.Шаумян пишет [3], что данное определение справедливо лишь для процессов, осуществляемых на универсальных станках в неавтоматизированном производстве. В автоматизированном же производстве, по мнению Г.А.Шаумяна, понятие операции сливаются с понятием перехода, поэтому оно должно ориентировать нас с точки зрения места протекания процесса, его объема, не на отдельное место, а на отдельный целевой механизм. Следовательно, для того, чтобы данная структура и понятия ее уровней были независимы от степени занятости в процессе человека и оборудования, необходимо наименования процессов конкретных уровней структуры давать исходя из их (процессов) конечной цели. То есть отдельные уровни процесса следует представить как определенные этапы – законченные циклы получения определенной части или конечного продукта данного процесса в целом. Таковыми могут быть: цикл изготовления детали, цикл изготовления узла и так далее.

К таким же выводам приводят определения, даваемые уровням перехода, прохода, хода и реза М.И. Юликовым [4].

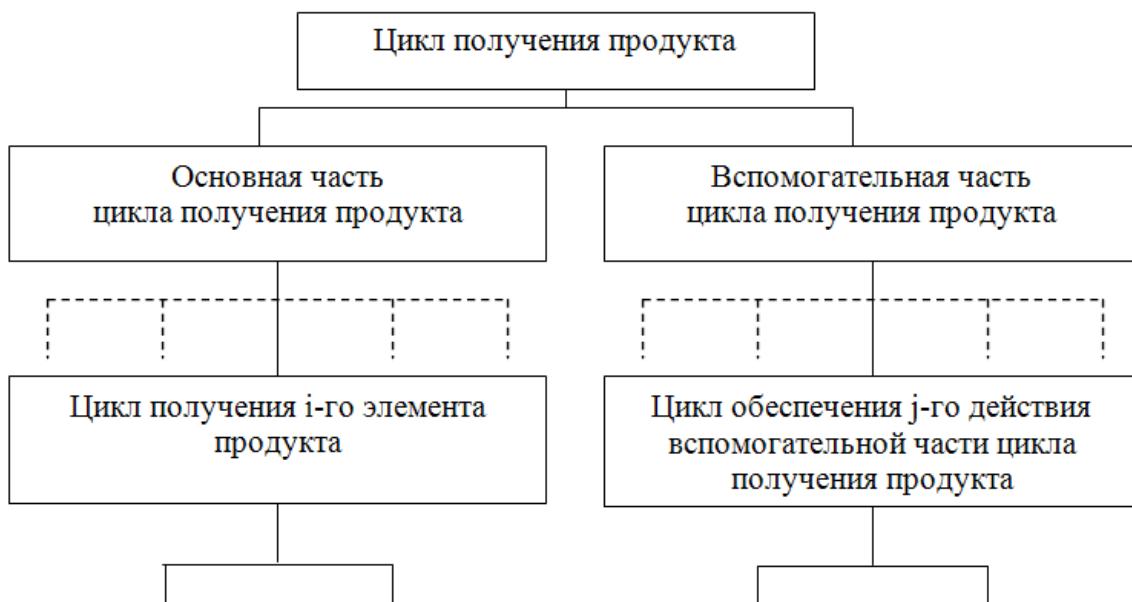


Рисунок 4 – Иерархия строения процессов:
— · · · · (связи, нанесённые пунктиром) означают – один или несколько

Исходя из вышесказанного, иерархия строения процессов в общем случае выглядит так, как это изображено на рисунке 4. То есть это то, что представлено в работе [1] как структурная иерархическая схема процесса.

Полученная иерархическая модель процессов обладает рядом важных особенностей:

1. Иерархия процессов построена таким образом, что при продвижении по ней вверх объемы процессов в пространстве, времени и движении увеличиваются, при продвижении вниз – уменьшаются.
2. Логика получения данной обобщённой иерархии процессов говорит о возможности её использования для классификации процессов.
3. Модель демонстрирует внутри объектную аналогию строения процессов различных уровней.
4. У каждого уровня процесса имеется два подуровня, которые можно различать так:
 - качественный подуровень, на котором возможно лишь качественное изменение процесса, т.е. внутреннего содержания основной или вспомогательной его частей;
 - количественный подуровень, на котором возможно лишь количественное варьирование составом процесса, т.е., например, вместо одного – двух циклов процесса организовать три и более, не изменяя внутреннего их (циклов) содержания.

В заключение следует отметить, что схема, представленная на рисунке 4, не отражает всех свойств процессов, то есть не является их обобщённой структурой. Для этой цели она должна быть дополнена схемой взаимодействия процессов, что осуществлено в работе [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пухальский, В.А. Обобщенные структурные модели процессов и конструкций / В.А. Пухальский // Вестник машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 53–56.
2. Соколовский, А.П. Основы технологии машиностроения / А.П. Соколовский. – М.–Л., ГНТИ Машиностроительной литературы, 1938. –Т. 1. – 680 с.
3. Шаумян, Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов / Г.А. Шаумян. – М., «Машиностроение», 1973. – 640 с.
4. Юликов, М.И. Классификация режущего инструмента / М.И. Юликов. Под ред. Семенченко И.И. – М., ВНИИ, ЦНИИТМАШ, 1960. – 56 с.

Пухальский Владимир Альфредович

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» МГУПИ

кандидат технических наук, доцент

E mail: puhalya@mail.ru

V.A. PUKHALSKY

THE HIERARCHY OF PROCESSES IN MANUFACTURING ENGINEERING

The article is devoted to the development of terminology in engineering technology ordering based on ideas about hierarchy structures processes. Used as source material about the composition of the technological process of the famous domestic scientist A.P. Sokolovsky, as well as standard terms and definitions used in engineering technology in now. As a result of the carried out analysis of the structure of Sokolovsky substantially adjusted, then became more consistent with ideas about the processes in manufacturing engineering. The article demonstrated the existence of the relationship between structural structure object classification and location of specific objects of specific levels in the classification itself. This взаимоподтверждает justice as views on the structure of an object and its classification. A new approach to the definition of the terms processes.

Keywords: mechanical engineering technology, technological processes, hierarchy, terms, definitions, names.

BIBLIOGRAPHY

1. Pukhalskiy, V.A. Obobshchennyye strukturnyye modeli protsessov i konstruktsiy / V.A. Pukhalskiy // Vestnik mashinostroyeniya. – 2007. – № 6. – S. 53–56.
2. Sokolovskiy, A.P. Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya / A.P. Sokolovskiy. – M.–L., GNTI Mashinostroitelnoy literatury, 1938. –T. 1. – 680 s.
3. Shaumyan, G.A. Kompleksnaya avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov / G.A. Shaumyan. – M., «Mashinostroyeniye», 1973. – 640 s.
4. Yulikov, M.I. Klassifikatsiya rezhushchego instrumenta / M.I. Yulikov. Pod red. Semenchenko I.I. – M., VNII, TSNIITMASH, 1960. – 56 s.

Pukhalskiy Vladimir Alfredovich

FGBOU IN «Moscow Technological University» MGUPI

Ph.D., Associate Professor

E mail: puhalya@mail.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 616.12.008.331–073.65.78

Е.В. ЖАРКИХ, А.И. ЖЕРЕБЦОВА, И.Н. МАКОВИК, В.В. ДРЁМИН,
Е.А. ЖЕРЕБЦОВ, Е.В. ПОТАПОВА, А.В. ДУНАЕВ

ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ КОЖНОГО КРОВОТОКА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОККЛЮЗИОННЫХ ПРОБ

В работе показаны возможности применения адаптивного вейвлет-анализа сигналов, регистрируемых методом лазерной доплеровской флюметрии, при исследовании осцилляций параметров системы микроциркуляции крови до и после проведения окклюзионной пробы. Проведена серия экспериментальных исследований на 28 условно здоровых добровольцах, а также на пациенте ревматологического профиля. На основании полученных данных выявлено, что применение адаптивного вейвлет-преобразования позволяет достоверно оценивать функциональное состояние системы микроциркуляции крови и выявлять различные реакции микрососудистого русла на нагрузочный тест в виде окклюзионной пробы по анализу частотных ритмов модуляции кровотока.

Ключевые слова: неинвазивная диагностика, лазерная доплеровская флюметрия, система микроциркуляции крови, окклюзионная пробы, спектральный анализ, адаптивное вейвлет-преобразование.

В настоящее время при диагностике функционального состояния микроциркуляторного русла применяют различные оптические неинвазивные технологии [1]. Наиболее широкое распространение в различных областях медицинской практики получил метод лазерной доплеровской флюметрии (ЛДФ). Данный метод основан на неинвазивном зондировании биоткани низкоинтенсивным лазерным излучением и регистрации отраженного и рассеянного излучения от движущихся в диагностическом объеме эритроцитов [2]. Результатом измерений данным методом является регистрация перфузии в виде показателя микроциркуляции (индекс микроциркуляции крови – I_m) в перфузионных (относительных) единицах (пф.ед.). Несмотря на все достоинства данного метода, в литературе часто встречаются упоминания о большом разбросе и вариабельности параметров, регистрируемых и рассчитываемых при помощи ЛДФ [3].

Как известно, колебательный процесс, регистрируемый с помощью ЛДФ, является результатом наложения колебаний, обусловленных различными активными и пассивными факторами [4]. Для диагностики состояния системы микроциркуляции крови (МЦК) важно определить вклад различных ритмических составляющих фрактально- хаотических. В настоящее время выделяют несколько частотных диапазонов колебаний кровотока: диапазон 0,005–0,0095 Гц отражает влияние эндотелиального гиперполяризующего фактора [5]; 0,0095–0,02 Гц – осцилляции, обусловленные влиянием эндотелиального оксида азота (NO) [6]; 0,02–0,046 Гц – осцилляции, вызванные низкочастотной ритмикой импульсации симпатических адренергических вазомоторных волокон, непосредственно иннервирующих микрососуды кожи [7, 8]; 0,05–0,069 Гц – колебания, зависящие от влияния сенсорных пептидергических нервных волокон [9]; 0,07–0,15 Гц – осцилляции, обусловленные собственной миогенной активностью миоцитов микрососудов [10]; 0,16–0,18 Гц – осцилляции, вызванные парасимпатическими или симпатическими холинергическими влияниями [11]; 0,2–0,4 Гц – дыхательные волны; 0,8–1,6 Гц – пульсовые волны [12]. Для оценки колебательных процессов в перфузии применяют спектральный анализ, который позволяет неинвазивно оценивать большинство регуляторных факторов. Однако традиционный спектральный анализ дает информацию только об усредненных во времени изменениях колебаний кожного кровотока и не позволяет динамично оценивать процессы, происходящие в системе МЦК непосредственно во время проведения функциональных проб [13, 14].

В качестве провокационных воздействий в настоящее время используют различные функциональные нагрузочные пробы, такие, как окклюзионная пробы (ОП) [15], тепловая,

холодовая [16, 17], дыхательная, постуральная, электростимуляционная и др. Они позволяют выявить скрытые нарушения гемодинамики и адаптационные резервы системы МЦК [18].

Целью данной работы явилось оценить возможности применения адаптивного вейвлет-анализа ЛДФ-грамм при проведении окклюзионных проб.

Для реализации поставленной цели проведены экспериментальные исследования, в которых приняли участие 28 условно- здоровых добровольца (средний возраст не превышал 22 года) – 11 парней и 17 девушек.

Окклюзионная пробы проводилась путем пережатия на 3 мин правой руки в области предплечья манжетой тонометра таким образом, чтобы создать условия искусственной ишемии тканей и впоследствии наблюдать за восстановлением кровотока. При проведении окклюзионной пробы резервные возможности системы МЦК оцениваются по приросту показателя микроциркуляции крови, происходящему во время постокклюзионной гиперемии. В процессе ишемии в тканях накапливаются метаболические вазодилататоры, обуславливающие возникновение гиперемии в момент декомпрессии [15, 18, 19].

Испытуемый адаптировался к условиям помещения в течение минимум 10 мин. Исследования проводились на 2-х топографо-анатомических участках кожи, расположенных на центральных поверхностях дистальной и проксимальной фаланг среднего пальца правой руки. Как известно, эти зоны богаты артериоло-венуллярными анастомозами (ABA), исключительно зависимыми от симпатической вазомоторной иннервации [18]. Расположение оптических волокон с помощью специальных манжет на пальцах рук во время проведения экспериментальных исследований представлено на рисунке 1, а. Перед началом исследования на предплечье испытуемого надевали манжету механического тонометра CS Medica CS-106 и фиксировали без пережатия артерий, не накачивая. Одно исследование длилось 13 мин и включало непрерывную регистрацию ЛДФ-грамм в течение следующих периодов: начальная (фоновая) запись (НЗ) (4 мин), артериальная окклюзия с давлением в манжете 200–220 мм рт. ст. (3 мин), постокклюзионный период (3 мин) и период релаксации (3 мин). Все эксперименты проводились в положении сидя, правая рука располагалась на специальной подушке на столе на уровне сердца. Временная диаграмма проведения эксперимента приведена на рисунке 1, б.



Рисунок 1 – Расположение оптических волокон на пальцах рук добровольца во время проведения исследований (а) и временная диаграмма проведения эксперимента (б)

В качестве экспериментального оборудования использовался двухканальный лазерный анализатор капиллярного кровотока «ЛАКК-02» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленный на рисунке 1, а. В данном приборе зондирование биоткани осуществляется на длине волны излучения 1064 нм, мощность на выходе волокон до 1,5 мВт.

Аналогичное исследование было проведено на пациенте (мужчина 21 года) ревматологического отделения Орловской областной клинической больницы с диагнозом системной красной волчанки с сопутствующим заболеванием в виде синдрома Рейно. Применили только 1 канал, оптический зонд в этом случае устанавливали на центральной поверхности дистальной фаланги среднего пальца правой руки. Общая длительность регистрации показателя микроциркуляции составила 10 мин и включала в себя: фоновую запись – 1 мин, окклюзию – 3 мин, постокклюзионный период – 6 мин.

После проведения экспериментов фрагменты ЛДФ–грамм пред– и постокклюзионных периодов подвергались адаптивному вейвлет–анализу с помощью программы LDF 3.0.2.384 (ООО НПП «ЛАЗМА») которая реализует непрерывное вейвлет–преобразование с использованием в качестве анализирующего вейвлета комплекснозначного вейвлета Морле [14]. С помощью данного вейвлет–анализа определялись амплитудные значения колебаний для 5 основных диапазонов – эндотелиального (A_e), нейрогенного (A_n), миогенного (A_m), дыхательного (A_r) и сердечного (A_c). На их основе для оценки колебательного компонента микрососудистого тонуса, согласно [18], рассчитывались показатели эндотелиального (ET), нейрогенного (NT) и миогенного (MT) тонуса. По методике [20, 16], основанной на анализе амплитуд колебаний кровотока, рассчитывали показатель шунтирования (BI) и нутритивный кровоток (I_m).

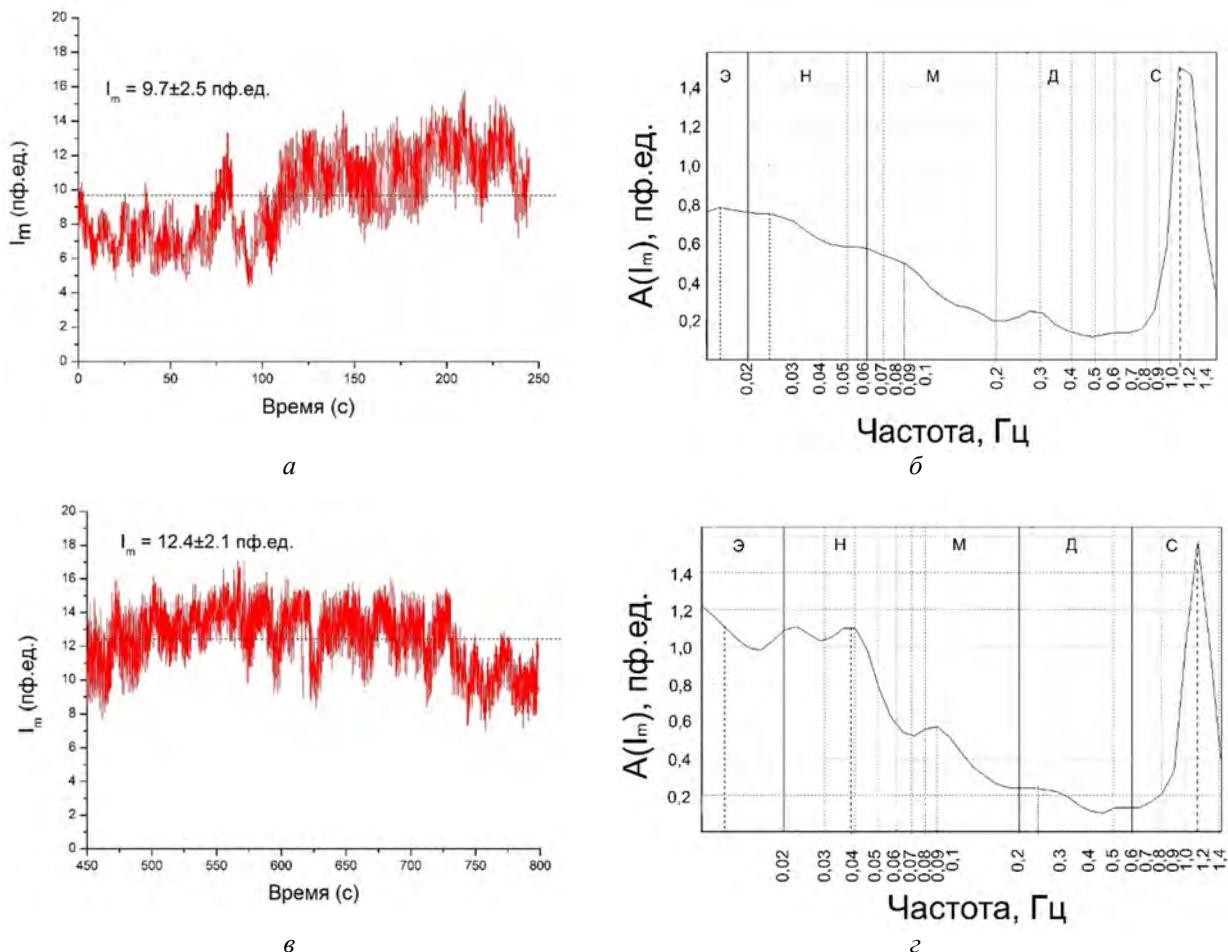


Рисунок 2 – Типовой пример фрагментов ЛДФ–грамм и её амплитудно–частотных спектров до (а, б) и после (в, г) проведения окклюзии:
э – эндотелиальные, н – нейрогенные, м – миогенные, д – дыхательные, с – сердечные колебания

На рисунке 2 представлен типовой пример фрагментов зарегистрированной с условно–здорового добровольца ЛДФ–граммы и её усредненные амплитудно–частотные спектры, а на рисунке 3 – её 3D–анализ соответственно до и после проведения окклюзии. Представленные рисунки наглядно демонстрируют преимущества применения 3D–анализа, позволяющего оценить изменения амплитуд колебаний кожного кровотока в каждый момент времени проведения окклюзионной пробы.

Для сравнения амплитуд осцилляций у разных испытуемых и анализа регуляторных механизмов, по мнению некоторых авторов, например [14], более корректно применять величины нормированных амплитуд осцилляций, вследствие чего производился анализ их амплитуд, нормированных на среднеквадратическое отклонение (σ) и среднее значение показателя микроциркуляции (I_m). Величина A/σ позволяет оценить вклад колебаний определенного частотного диапазона относительно средней модуляции кровотока, в то время как A/I_m характеризует напряженность регуляции кровотока со стороны отдельных регулятивных факторов [18].

Полученные в результате экспериментальных исследований на 28 условно-здоровых добровольцах данные анализа осцилляций кожного кровотока статистически обработаны и сведены в итоговую таблицу 1. При помощи критерия Манна–Уитни оценено различие значений анализируемых параметров до и после проведения окклюзии.

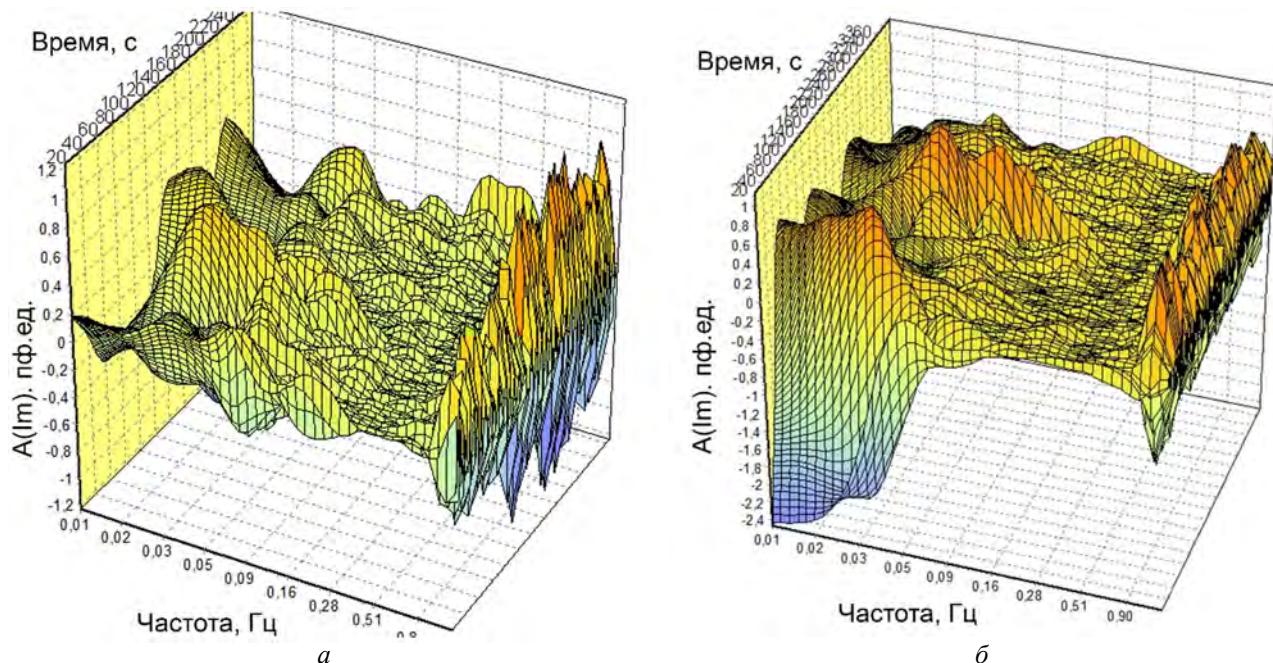


Рисунок 3 – Пример 3D-анализа ЛДФ-граммы до (а) и после (б) проведения окклюзии

Таблица 1 – Результаты анализа колебаний кожного кровотока.

№	Параметр	1 канал		2 канал	
		до окклюзии	после окклюзии	до окклюзии	после окклюзии
1	I_m , пф.ед.	9,4±3,1	10,6±2,9	11,1±3,9	11,3±3,7
2	I_{mn} , пф.ед.	3,6±1,4	3,8±1,6	3,9±1,5	4,1±1,8
3	A_e , пф.ед.	0,9±0,5	1,1±0,6	1,0±0,6	1,3±0,5*
4	A_n , пф.ед.	0,9±0,6	1,0±0,5	1,1±0,6	1,2±0,5
5	A_m , пф.ед.	0,7±0,4	0,8±0,5	0,8±0,5	0,9±0,4
6	A_r , пф.ед.	0,2±0,1	0,2±0,1	0,2±0,1	0,3±0,2
7	A_c , пф.ед.	0,5±0,3	0,5±0,3	0,6±0,2	0,6±0,2
8	$A_e / 3\sigma$, отн.ед.	15,7±4,6	14,7±3,9	17,6±4,6	14,0±3,3*
9	$A_n / 3\sigma$, отн.ед.	16,7±4,7	14,3±4,6	18,6±4,5	12,4±4,1*
10	$A_m / 3\sigma$, отн.ед.	13,4±3,5	10,7±4,0*	14,3±3,5	10,3±4,4*
11	$A_r / 3\sigma$, отн.ед.	4,8±2,5	3,3±1,5*	4,5±2,2	3,3±2,2*
12	$A_c / 3\sigma$, отн.ед.	10,9±5,7	7,9±4,2*	11,8±6,2	6,8±2,4*
13	A_e / I_m , отн.ед.	9,8±9,9	11,5±8,5	12,3±7,8	13,4±6,1
14	A_n / I_m , отн.ед.	9,9±9,0	10,1±6,0	12,9±7,9	11,6±4,8
15	A_m / I_m , отн.ед.	7,6±6,4	7,5±4,3	9,3±4,8	9,4±4,0
16	A_r / I_m , отн.ед.	2,1±1,2	2,1±0,8	2,7±1,6	2,9±1,4
17	A_c / I_m , отн.ед.	5,6±4,5	5,7±4,6	6,4±1,7	5,8±1,3
18	BI , отн.ед.	2,8±0,9	3,1±1,2	3,0±0,7	3,0±1,1
19	ET , отн.ед.	3,2±2,2	3,9±3,4	1,9±0,9	2,0±0,8
20	NT , отн.ед.	2,9±1,9	4,3±4,8	1,8±0,9	2,4±1,5
21	MT , отн.ед.	3,5±1,8	5,2±3,1*	2,4±1,5	3,1±2,4

* – статистическая значимость различий значений показателей после проведения окклюзии по отношению к значениям до воздействия с $p < 0,05$ по критерию Манна–Уитни.

Анализ полученных данных выявил различия в адаптационных изменениях у всех добровольцев в обеих областях исследования. Так, сразу после проведения окклюзии наблюдаются статистически значимые различия некоторых параметров. Например, у

большинства добровольцев во 2-й точке (дистальная фаланга пальца) происходит уменьшение нормированных на среднеквадратическое отклонение амплитуд всех пяти исследуемых колебаний, в то время как для 1-й точки (проксимальная фаланга пальца) уменьшение амплитуд колебаний зафиксировано только для миогенного, дыхательного и сердечного диапазонов.

Кроме того, предлагаемая методика позволяет оценивать процессы адаптации системы МЦК в динамике. Например, для одного из волонтеров (девушка, 21 год) в точке 1 на 11 с после окклюзии амплитуда миогенных колебаний (A_m) составила 0,8 пф. ед., а к 43 с амплитуда уменьшилась до 0, а затем к 5 мин 42 с увеличилась до 1,3 пф. ед. В точке 2 на 14 с после окклюзии A_m соответственно составила 0,8 пф. ед., а к 26 с амплитуда уменьшилась до 0, а затем к 3 мин 34 с составила 0,9 пф. ед. Таким образом, в начале постокклюзионного периода наблюдается резкое нарастание миогенных колебаний с последующим их спадом и далее восстановлением до исходного уровня, что может свидетельствовать о резком увеличении метаболической активности тканей исследуемой области сразу после окончания окклюзии и дальнейшем восстановлении ее нормального функционального состояния [18, 15].

Для другого волонтера (парень, 21 год) в точке 1 через 1 мин после прекращения окклюзии амплитуда миогенных колебаний (A_m) достигла своего максимального значения и составила 1,0 пф.ед., а еще через 3 минуты составила 0,2 пф.ед. В точке 2 наблюдаются другие процессы: через 1 мин 23 с после окклюзии максимального значения достигла амплитуда нейрогенных колебаний, а еще через 4 мин она составила уже 0,3 пф.ед., что может свидетельствовать об увеличении количества вырабатываемых NO-эндотелием вазодилататоров после проведения окклюзии, и о восстановлении нормального функционального состояния к концу исследования [6, 16, 18].

На рисунке 4 представлены примеры 3D-анализа результатов исследования кожного кровотока пациента ревматологического профиля с сопутствующим заболеванием в виде синдрома Рейно на пальцах рук.

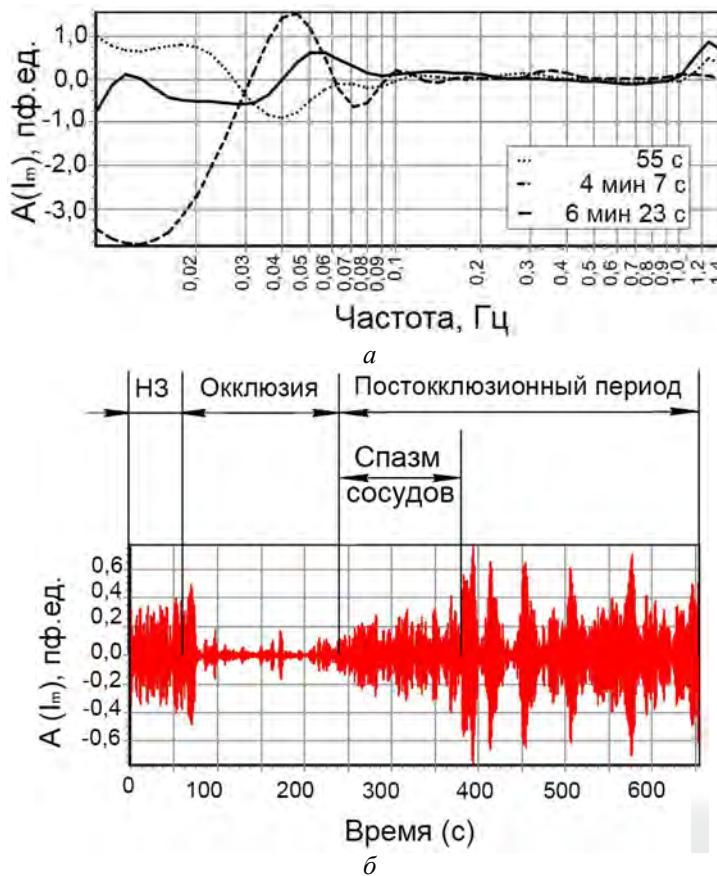


Рисунок 4 – Временные (а) и частотный (б) срезы 3D-анализа колебаний кожного кровотока пациента ревматологического профиля: временные срезы соответственно для фоновой записи (55 с), начала постокклюзионного периода (4 мин 7 с) и в конце периода релаксации (6 мин 23 с); частотный срез для частоты сердечных колебаний 1,133 Гц

Анализ полученных на пациенте данных показал, что после проведения окклюзии амплитуды колебаний кровотока в сердечном частотном диапазоне некоторое время (1 мин 35 с) остаются на сниженном уровне (по сравнению с уровнем колебаний в фоновой записи), что может свидетельствовать о спазме резистивных сосудов и о неадекватности реакции системы микроциркуляции крови на прекращение стрессового воздействия. Кроме того, из полученных во время исследования данных следует, что сразу после прекращения окклюзии наблюдалось резкое увеличение миогенного тонуса, что может свидетельствовать о вазоконстрикторных процессах. В то же время увеличение амплитуд низкочастотных колебаний при отсутствии изменений миогенных осцилляций может свидетельствовать о слабом восстановлении микроциркуляторного русла (снижение адаптационных резервов системы МЦК), а увеличение амплитуд нейрогенных колебаний при уменьшении величины нутритивного кровотока является индикатором активации путей ненутритивного кровотока.

Таким образом, применение аддитивного вейвлет-преобразования при анализе ЛДФ-грамм позволяет качественно оценивать динамику изменений амплитуд осцилляций кожного кровотока в исследуемых частотных диапазонах, что повышает информативность функциональной диагностики периферических сосудов при проведении окклюзионных проб. Данный подход может быть использован для выявления возможных нарушений в системе микроциркуляции крови на ранних стадиях заболеваний.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК» (№310) и внутривузовского гранта Госуниверситета–УНПК (ВК-3-2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2-х т.: учебное издание / В.В. Тучин. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 559 с.
2. Козлов, В.И. Метод лазерной допплеровской флуориметрии. Пособие для врачей / В.И. Козлов, Э.С. Мач, Ф.Б. Литвин и др. – М. – 2001. – 22 с.
3. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно–тканевых систем / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, и др. // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44–53.
4. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by Doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H. D. Kvernlmo // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1999. – V. 46. – P. 1230–1239.
5. Kvandal, P. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin / P. Kvandal // Microvascular Research. – 2006. – V. 72(3). – P. 120–127.
6. Kvandal, P. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. / P. Kvandal [et al.] // Microvascular Research. – 2003. – V. 65. – P. 160–171.
7. Крупаткин, А.И. Влияние симпатической иннервации на тонус микрососудов и колебания кровотока кожи / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2006. – Т. 32. – № 5. – С. 95–103.
8. Kastrup J., Buhlow J., Lassen N.A. Vasomotion in human skin before and after local heating recorded with laser Doppler flowmetry. A method for induction of vasomotion / J. Kastrup, J. Buhlow, N.A. Lassen // International Journal of Microcirculation, Clinical and Experimental. – 1989. – V. 8. – P. 205–215.
9. Крупаткин, А.И. Влияние сенсорной пептидергической иннервации на осцилляции кровотока кожи человека в диапазоне 0,047–0,069 Гц / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2007. – Т. 33. – № 3. – С. 48–54.
10. Крупаткин, А.И. Колебания кровотока частотой около 0,1 Гц в микрососудах кожи не отражают симпатическую регуляцию их тонуса / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2009. – Т. 35. – № 2. – С. 60–69.
11. Silverman, D.G. Distinction between atropine-sensitive control of microvascular and cardiac oscillatory activity / D.G. Silverman, R.G. Stout // Microvascular Research. – 2002. – V. 63. – P. 196–208.
12. Крупаткин, А.И. Пульсовые и дыхательные осцилляции кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека. // Физиология человека, 2008. – Т. 34. – № 3. – С. 70–76.
13. Tikhonova, I.V. Time-amplitude analysis of skin blood flow oscillations during the post-occlusive reactive hyperemia in human / I.V. Tikhonova, A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Microvascular Research. – 2010. – V. 80(1). – P. 58–64.
14. Tankanag, A.V. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin/ A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Physics in Medicine and Biology. – 2013. – V. 53. – P. 5967–5976.
15. Жеребцова, А.И. Оценка взаимосвязи параметров микроциркуляции крови и накожной температуры при окклюзионной пробе / А.И. Жеребцова // Биотехносфера. – 2015. – № 2. – С.15–21.
16. Новикова, И.Н. Возможности холодовой пробы для функциональной оценки микроциркуляторно–тканевых систем / И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2015. – № 2 (14). – С.47–55.
17. Белых, П.М. Контроль эффективности применения ортопедического средства по анализу изменений параметров микроциркуляторно–тканевых систем биотканей / П.М. Белых, И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, Е.В. Шураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 1(309). – С. 99–107.
18. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно–тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛБРОКОМ», 2013. – 496 с.
19. Жеребцова, А.И. Метод диагностики функционального состояния периферических сосудов пальцев рук для пациентов ревматологического профиля / А.И. Жеребцова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 4(312). – С.113–121.

20. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev [et al.] // Physiological Measurement. – 2014. – № 35(4). – P. 607–621.

Жарких Елена Валерьевна
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия
Студентка кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация» учебно–научно–
исследовательского института
информационных технологий,
сотрудник студенческого
конструкторского бюро
биомедицинских инженерных
исследований (СКБ БМИИ)
научно–образовательного центра
«Биомедицинская инженерия»
Тел. +7 (4862) 41–98–76
E-mail: loread@mail.ru

Дрёмин Виктор Владимирович
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия
Аспирант кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», стажер–
исследователь научно–
образовательного центра
«Биомедицинская инженерия»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия
Ведущий научный сотрудник научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат
технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

Жеребцова Ангелина Ивановна
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орел
Стажер–исследователь научно–
образовательного центра
«Биомедицинская инженерия»,
соискатель кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация» учебно–научно–
исследовательского института
информационных технологий
Тел. +7 (4862) 41–98–76
E-mail: angelina.zherebtsova@yandex.ru

Жеребцов Евгений Андреевич
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия
Доцент кафедры
«Приборостроение. метрология и
сертификация», кандидат
технических наук, научный
сотрудник научно–
образовательного центра
«Биомедицинская инженерия»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E-mail: zherebzow@gmail.com

Маковик Ирина Николаевна
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орел
Аспирант кафедры
«Приборостроение, метрология и
сертификация», инженер–
исследователь научно–
образовательного центра
«Биомедицинская инженерия»
Тел.: +7–4862–41–98–76
E-mail: i.n_novikova@mail.ru

Потапова Елена Владимировна
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия
Доцент кафедры
«Приборостроение. метрология и
сертификация», кандидат
технических наук
Тел.: +7–4862–41–98–76
E-mail: elenasweet2007@gmail.com

E.V. ZHARKIKH, A.I. ZHEREBTSOVA, I.N. MAKOVIK, V.V. DREMIN,
E.A. ZHEREBTSOV, E.V. POTAPOVA, A.V. DUNAEV

THE POSSIBILITIES OF INVESTIGATING THE OSCILATION AMPLITUDE CHANGES IN SKIN BLOOD FLOW THROUGH ADAPTIVE WAVELET ANALYSIS DURING OCCLUSION TEST

The article shows the possibility of using an adaptive wavelet analysis of signals recorded by laser Doppler flowmetry during the study of the oscillation parameters of the system of blood microcirculation before and after the occlusion test. It was conducted a series of experimental studies at 28 apparently healthy volunteers, as well as with the patient of rheumatological profile. Based on these received data we can to conclude that the use of adaptive wavelet transform can reliably assess the functional state of the microcirculation and to identify the different blood flow response to stress test in the form of occlusion test on the analysis of the frequency rhythms modulation of blood flow.

Keywords: non-invasive diagnostics, laser Doppler flowmetry, system of blood microcirculation, occlusion test, spectral analysis, adaptive wavelet filtering.

BIBLIOGRAPHY

1. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika: v 2-kh t.: uchebnoye izdaniye / V.V. Tuchin. – M.: FIZMATLIT. – 2007. – 559 s.
2. Kozlov, V.I. Metod lazernoy dopplerovskoy floumetrii. Posobiye dlya vrachey / V.I. Kozlov, E.S. Mach, F.B. Litvin i dr. – M. – 2001. – 22 s.
3. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / A.V. Dunayev, I.N. Novikova, A.I. Zherebtsova, i dr. // Biotehnosfera. – 2013. – № 5. – S. 44–53.
4. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by Doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H. D. Kvernlmo // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1999. – V. 46. – P. 1230–1239.
5. Kvandal, P. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin / P. Kvandal // Microvascular Research. – 2006. – V. 72(3). – P. 120–127.

6. Kvandal, P. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. / P. Kvandal [et al.] // Microvascular Research. – 2003. – V. 65. – P. 160–171.
7. Krupatkin, A.I. Vliyaniye simpaticheskoy innervatsii na tonus mikrososudov i kolebaniya krovotoka kozhi / A.I. Krupatkin // Fiziologiya cheloveka. – 2006. – T. 32. – № 5. – S. 95–103.
8. Kastrup J., Buhlow J., Lassen N.A. Vasomotion in human skin before and after local heating recorded with laser Doppler flowmetry. A method for induction of vasomotion / J. Kastrup, J. Buhlow, N.A. Lassen // International Journal of Microcirculation, Clinical and Experimental. – 1989. – V. 8. – P. 205–215.
9. Krupatkin, A.I. Vliyaniye sensornoy peptidergicheskoy innervatsii na ostsillyatsii krovotoka kozhi cheloveka v diapazone 0,047–0,069 Gts. / A.I. Krupatkin // Fiziologiya cheloveka. – 2007. – T. 33. – № 3. – S. 48–54.
10. Krupatkin, A.I. Kolebaniya krovotoka chastotoj okolo 0,1 Gts v mikrososudakh kozhi ne otrazhayut simpaticheskuyu reguljatsiyu ikh tonusa / A.I. Krupatkin // Fiziologiya cheloveka. – 2009. – T. 35. – № 2. – S. 60–69.
11. Silverman, D.G. Distinction between atropine-sensitive control of microvascular and cardiac oscillatory activity / D.G. Silverman, R.G. Stout // Microvascular Research. – 2002. – V. 63. – P. 196–208.
12. Krupatkin, A.I. Pulsovyje i dykhatelnyje ostsillyatsii krovotoka v mikrotsirkulyatornom rusle kozhi cheloveka. // Fiziologiya cheloveka, 2008. – T. 34. – № 3. – C. 70–76.
13. Tikhonova, I.V. Time-amplitude analysis of skin blood flow oscillations during the post-occlusive reactive hyperemia in human / I.V. Tikhonova, A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Microvascular Research. – 2010. – V. 80(1). – P. 58–64.
14. Tankanag, A.V. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Physics in Medicine and Biology. – 2013. – V. 53. – P. 5967–5976.
15. Zhrebtsova, A.I. Otsenka vzaimosvyazi parametrov mikrotsirkulyatsii krovi i nakozhnay temperatury pri okklyuzionnoy probe / A.I. Zhrebtsova // Biotekhnosfera. – 2015. – № 2. – S. 15–21.
16. Novikova, I.N. Vozmozhnosti kholodovoy proby dlya funktsionalnoy otsenki mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem / I.N. Novikova, A.V. Dunayev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin // Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya. – 2015. – № 2 (14). – S. 47–55.
17. Belykh, P.M. Kontrol effektivnosti primeniya ortopedicheskogo sredstva po analizu izmeneniy parametrov mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem biotkaney / P.M. Belykh, I.N. Novikova, A.V. Dunayev, Ye.V. Shurayeva // Fundamentalnyje i prikladnyje problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 1(309). – S. 99–107.
18. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013. – 496 s.
19. Zhrebtsova, A.I. Metod diagnostiki funktsionalnogo sostoyaniya perifericheskikh sosudov paltsev ruk dlya patsiyentov revmatologicheskogo profilya / A.I. Zhrebtsova // Fundamentalnyje i prikladnyje problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 4(312). – S. 113–121.
20. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev [et al.] // Physiological Measurement. – 2014. – № 35(4). – P. 607–621.

Zharkikh Elena Valerievna
Prioksky State University, Oryol,
Russia

Student of the Department
«Instrumentation, metrology and
certification», a member of the
Student Design Bureau of Biomedical
Engineering Research (SDB BMER)
scientific and educational center
«Biomedical Engineering»
Ph.: (4862) 41 98 76
E-mail: loread@mail.ru

Dremin Victor Vladimirovich
Prioksky State University, Oryol,
Russia

Post graduate student degree of the
Department «Instrumentation,
metrology and certification» of
Educational and Research Institute of
Information Technology, Early stage
researcher of scientific-educational
center «Biomedical Engineering»
Ph.: +7-4862-41-98-76
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Dunaev Andrey Valerievich
Prioksky State University, Oryol, Russia

Leading Research Fellow of scientific-educational center «Biomedical Engineering», PhD, Docent of the Department
«Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology
E-mail: dunaev@bmccenter.ru
Ph.: +7-4862-41-98-76

Zherebtsova Angelina Ivanovna
Prioksky State University, Oryol,
Russia

Early stage researcher of scientific-
educational center «Biomedical
Engineering», applicant for doctoral
degree of the Department
«Instrumentation, metrology and
certification» of Educational and
Research Institute of Information
Technology
Ph. +7 (4862) 41-98-76
E-mail: angelina.zherebtsova@yandex.ru

Zherebtsov Evgeniy Andreevich
Prioksky State University, Oryol,
Russia

PhD, Docent of the Department
«Instrumentation, metrology and
certification» of Educational and
Research Institute of Information
Technology, researcher of scientific-
educational center «Biomedical
Engineering»
Ph.: +7-4862-41-98-76
E-mail: zhrebzow@gmail.com

Makovik Irina Nikolaevna
Prioksky State University, Oryol,
Russia

Post graduate student degree of the
Department «Instrumentation,
metrology and certification» of
Educational and Research Institute of
Information Technology, Engineer-
researcher of scientific-educational
center «Biomedical Engineering»
Ph.: +7-4862-41-98-76
E-mail: i.n_novikova@mail.ru

Potapova Elena Vladimirovna
Prioksky State University, Oryol,
Russia

PhD, Docent of the Department
«Instrumentation, metrology and
certification» of Educational and
Research Institute of Information
Technology
Ph.: +7-4862-41-98-76
E-mail: elenasweet2007@gmail.com

А.Н. ШУТКИН

МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ ГИБРИДНЫХ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ, ПРОВОЦИРУЕМЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ

В работе рассматривается методология синтеза нечетких гибридных решающих правил как совокупности методов получения частных нечетких решающих правил на основе логики Л. Заде, Е. Шортлифа, секвенциальной процедуры А. Вальда, интерактивных систем распознавания, метода группового учета аргументов и модели Г. Раши агрегирующихся в зависимости от исследуемой структуры данных. Показывается, что исследование предполагаемой методологии позволяет решать задачи прогнозирования заболеваний студентов, вызываемых факторами риска, порождаемыми учебным процессом.

Ключевые слова: гибридные решающие правила, методология синтеза, нечеткая логика, прогнозирование заболеваний студентов.

Работами многочисленных исследователей и собственными исследованиями было установлено, что одним из факторов риска появления и развития заболеваний, которым способствуют интенсивный процесс обучения, являются длительные психоэмоциональное напряжение (ПЭН) и утомление [2, 3, 14, 16, 18]. К другим существенным факторами риска появления и развития заболеваний этого типа относятся образ жизни и экологическая обстановка в сочетании с индивидуальными особенностями организма [8, 12, 16].

Учитывая особенности развития заболеваний, провоцируемых образовательным процессом, а также особенности формирование пространства информативных признаков для их диагностики, и сложность формализованного описания исследуемого класса состояний, для решения задач прогнозирования и ранней диагностики таких заболеваний предлагается концептуальная информационно-аналитическая модель принятия решений о состоянии здоровья обучающихся, приведенная на рисунке 1.

В соответствии с этой моделью, используя решающие правила оценки уровней ПЭН и утомления, синтез которых описан в работах [2, 12, 14, 18]. В качестве индивидуальных факторов риска (ИФР) используются технологически легко получаемые признаки по результатам опроса, осмотра и простейших лабораторных и инструментальных исследований. Например, употребление алкоголя, табакокурение, наследственность, прием лекарственных средств, артериальное давление и т.д. Процесс синтеза нечетких решающих правил для этой группы признаков описан в работах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (БМИ ЮЗГУ) [2, 8, 12, 16]. Известно, что организм человека активно противодействует внешним вредным факторам, включая условия труда и обучения. Учесть сопротивляемость организма можно анализируя его защитные свойства, рассчитываемые с помощью моделей, приведенных в работах [2, 13, 19].

Основной моделью оценки уровня защиты организма в этих работах является модель вида:

$$UZ = F_{UZ}(\bar{A}\bar{I}, \bar{D}\bar{Y}) \quad (1)$$

где $A\bar{I}$ – адаптационный потенциал организма, рассчитываемый по индексу функциональных изменений Р. Баевского [1];

$\bar{D}\bar{Y}$ – энергетический разбаланс общесистемных биологически активных точек организма, определяемый по методике, описанной в работах [2, 12, 19];

F_{UZ} – функция агрегации защитных свойств организма.

Механизм определения UZ и встраивания математической модели (1) в обобщенные нечеткие решающие правила подробно приведен в работах [2, 12]. В ряде регионов страны процесс обучения проводится на площадках с экологически неблагоприятной обстановкой, характеризующейся экологическими факторами риска (ЭФР). Относительно этой группы синтезируются частные решающие правила (модели), позволяющие определять уверенности в возникновении и развитии исследуемых классов заболеваний. Механизм синтеза этой группы моделей описан в работах [8, 12, 16]. Коллективный нечеткий агрегатор решает задачи

объединения результатов работы частных нечетких решающих правил в финальные решающие правила прогнозирования и ранней диагностики заболеваний студентов (классы ω_r).

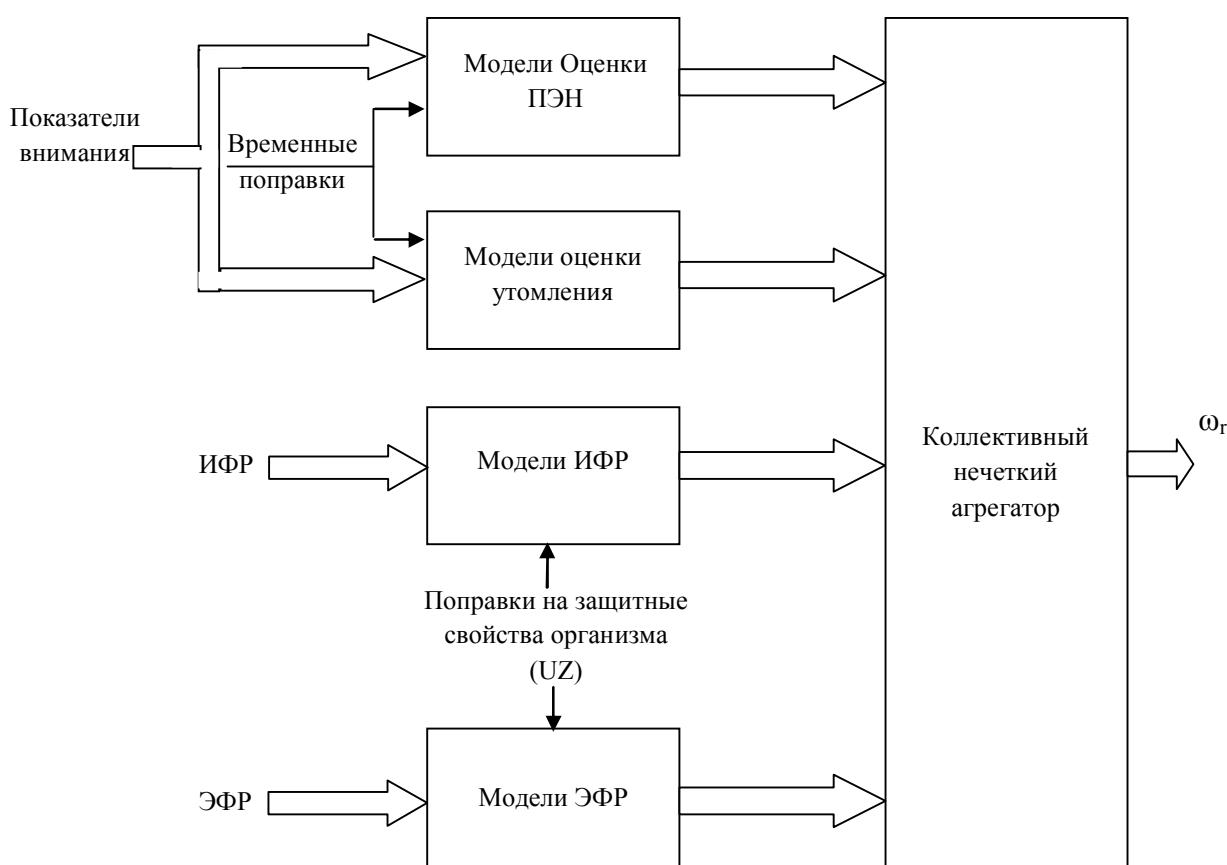


Рисунок 1 – Информационно–аналитическая модель принятия решений о состоянии здоровья обучающихся

Учитывая, что на выходе коллективного нечеткого агрегатора формируется шкала принятия решений, получаемая на основании измеряемых признаков, выходной сигнал этого блока можно рассматривать как нечеткую латентную переменную, а, следовательно, состав входных информативных признаков и частных решающих правил может быть оптимизирован с использованием модели Г. Раша по методике, описанной в работах [2, 15].

В работах [2, 3, 8, 16] было показано, что задачи прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, включая заболевания учащейся молодежи, относятся к классу плохоформализуемых задач, которые целесообразно решать, используя технологию мягких вычислений.

Однако, синтез решающих правил, основанных на технологии мягких вычислений, не является тривиальной задачей. Одной из основных проблем является выбор типов решающих правил, адекватных структуре данных, характеризующих исследуемые состояния сложных систем. Кроме этого в технологии мягких вычислений часто задействуются эксперты, внося определенную долю субъективности, что может снижать потенциально допустимое качество принимаемых решений.

С целью повышения эффективности использования технологии мягких вычислений было организовано изучение структуры данных, описывающих различные типы систем в биологии, медицине, экологии и социологии. Изучались: типы шкал, информативность и взаимосвязь признаков, описывающих состояние исследуемых систем; геометрическая структура, динамичность, области пересечений, казуистические ситуации и другие особенности исследуемых классов состояний.

Для различных структур данных исследовалась эффективность применения различных методов, ориентированных на работу плохоформализуемыми данными. При этом учитывались сложность и время синтеза решающих правил, точность получаемых

результатов, требуемые затраты (время, стоимость, доступность) на получение требуемого набора информативных признаков.

В ходе проведенных исследований было установлено, что в условиях плохой формализации при сложной структуре данных и в отсутствии репрезентативного статистического материала хороших результатов удается достичь при использовании нечеткой логики принятия решений, диалоговых систем распознания образов, метода группового учета аргументов, теории измерения латентных переменных и последовательной секвенциальной процедуры А. Вальда [6–11, 17, 21–23]. Кроме того было установлено, что ряд задач со сложной неоднородной структурой данных целесообразно решать используя различные модели описания различных классов состояний и (или) различных блоков информативных признаков для одной и той же сложной системы. [6, 21].

Таким образом, ряд практических задач по оценке состояния сложных систем требует для своего решения коллектива разнородных (гетерогенных) моделей, для объединения которых в единое решающее правило необходимо разработать: механизмы изучения структуры данных; рекомендации по выбору адекватных этой структуре математических моделей и механизмы агрегации разнородных моделей в рамках технологии мягких вычислений.

Для проведения разведочного анализа ориентированного на технологию мягких вычислений на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ разработан специальный пакет прикладных программ [6–8, 11].

Анализ различных структур данных с учетом квалификации экспертов групп позволил сформировать ряд рекомендаций по выбору типов математических моделей для решения задач оценки состояния сложных систем, включая организм человека.

1. В условиях наличия обучающей выборки, когда имеются затруднения в выборе функций принадлежности к исследуемым классам состояний, целесообразно проверить возможность использования последовательной секвенциальной процедуры А. Вальда с расчетом диагностического коэффициента DK [4, 6–8]. При переходе к нечеткому Вальдовскому классификатору уверенность в классификации определяется функцией принадлежности к ω_r с базовой переменной, определяемой по шкале DK , то есть:

$$UGV_r = \mu_{\omega_r}(\tilde{A}\tilde{E}). \quad (2)$$

2. Если в ходе проведения разведочного анализа по изучению структуры данных с применением отображающих пространств находятся двумерные пространства с приемлемым разделением классов в отображающем пространстве, то удобно использовать метод диалогового конструирования двумерных классификационных пространств [2, 9]. В соответствии с этим методом, двумерное отображающее пространство $\Phi = Y_1 \cdot Y_2$ определяется как декартово произведение двух отображающих функций вида:

$$Y_1 = \varphi_1(A, X) \text{ и } Y_2 = \varphi_2(B, X), \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 – функции отображения многомерных объектов в двумерное пространство Φ ; A и B – вектора настраиваемых параметров;

$X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – вектора объектов многомерного пространства информативных признаков.

На объектах обучающей выборки в пространстве Φ в полуавтоматическом режиме с привлечением экспертов предметной области формируются границы разделения альтернативных классов ω_s и ω_r из условий минимального количества ошибок классификаций в виде уравнений $Gsr=Fsr(Y_1, Y_2)$.

При переходе к нечеткой классификации в двумерном отображающем пространстве четкий вывод метода диалогового конструирования двумерных классификационных пространств трансформируется в нечеткое решение путем определения функций принадлежности $\mu_{\omega_r}(D_r)$ к классу ω_r с базовой переменной, определяемой как расстояние D_r от отображения в Φ исследуемого объекта до двумерных границ класса ω_r , описываемых уравнением вида $G_r=F_r(Y_1, Y_2)$.

Уверенность в ω_r , полученную при диалоговом конструировании двумерных классификационных пространств определим соотношением:

$$UGD_r = \mu_{\omega_r}(D_r). \quad (4)$$

3. Если в ходе проведения разведочного анализа выясняется возможность построения разделяющих поверхностей между классами и (или) формирования некоторых эталонных

структур (точки, гиперсфера, гиперпараллелепипеды и т.д.), то используются классические методы теории распознания образов, осуществляется синтез разделяющих поверхностей и (или) эталонных структур. Переход к нечетким классификаторам осуществляется через функции принадлежности $\mu_{\omega_r}(D_{kr})$ с базовыми переменными по расстояниям D_{kr} до разделяющих поверхностей и (или) эталонных структур с номерами k . Уверенность в принимаемых решениях определяется по максимальным значениям соответствующих функций принадлежности [2, 7, 8, 21, 23].

$$UGR_r = \mu_{\omega_r}(D_{rk}). \quad (5)$$

4. Если, в условиях п.3 выясняется целесообразность нечеткой аппроксимации многомерных областей нечеткими многомерными гиперпараллелипидами, то, каждый из гиперпараллелепипедов определяется выражением $\mu_{\omega_{rk}} = \min_i [\mu_{kr}(x_i)]$, где k – номер нечеткого гиперпараллелипипеда в многомерном пространстве признаков. Множество аппроксимирующих гиперпараллелипипедов для класса ω_r , объединяется выражением:

$$UGR_r = \max_k (\mu_{\omega_{rk}}). \quad (6)$$

5. Если, в условиях отсутствия обучающих выборок, врачи-эксперты способны строить функции принадлежности к исследуемым классам заболеваний, то рекомендуется использовать классический аппарат нечеткой логики принятия решений, в котором в качестве базовых элементов используются функции принадлежности $\mu_{\omega_r}(x_i)$ и (или) $\mu_{\omega_r}(Y_j)$ к исследуемым классам состояний ω_r с базовыми переменными, определяемыми по шкалам информативных признаков x_i и (или) комплексных показателей Y_j , вычисляемых по информативным показателям $Y_j = f_j\{x_1, x_2, \dots\}$, где f_j – функциональная зависимость, «связывающая» все или часть информативных признаков с Y_j , [6–8, 21–23, 25].

Наиболее популярными формулами агрегации при использовании функций принадлежностей являются выражения вида:

$$UGN_r = \min_i [\mu_{\omega_r}(x_i)]; \quad (7)$$

$$UGN_r = \max_i [\mu_{\omega_r}(x_i)]; \quad (8)$$

$$UGN_r = \max_j \min_i [\mu_{\omega_j}(x_i)]. \quad (9)$$

6. Если в условиях отсутствия обучающих выборок клиницисты способны выбрать систему признаков, подтверждающих и (или) опровергающих гипотезы ω_r и для них определить условия подтверждения и (или) опровержения соответствующих гипотез, то предпочтение отдается итерационным процедурам Е. Шортлифа:

$$UGN_r(q+1) = UGN_r(q) + KY_r(Z_p)[1 - UGN_r(q)], \quad (10)$$

где $KY_r(Z_p)$ – уверенность в гипотезе ω_r от свидетельства (признака, интегрального показателя) Z_p .

Часто уверенность $KY_r(Z_p)$ представляется как функция принадлежности к классу ω_r с базовой переменной x_i .

7. Метод группового учета аргументов (МГУА) характеризуется использованием моделей структурно параметрической идентификации представляемых полиномами Колмогорова–Габора [5].

В ходе процесса обучения для каждого из исследуемых классов состояний ω_r в пространстве информативных признаков с использованием обучающих алгоритмов МГУА получаются наборы моделей взаимосвязей между различными информативными признаками:

$$x_{rj} = F_{jr}(X_{kr}, A_{kr}), \quad (11)$$

где x_{rj} – признак с номером j , рассчитанный по объектам обучающей выборки класса ω_r ;

X_{kr} – вектор группы признаков с номером k пространства информационных признаков, причем признак с номером j не входит в группу k ;

F_{jr} – функция связи x_{rj} с X_{kr} , A_{kr} – вектор настраиваемых параметров.

Для нечеткого представления исследуемых классов состояний вводится функция принадлежности $\mu_{kr}(D_{kr})$ к классу ω_r с базовой переменной D_{kr} , определяемой как расстояние от точки многомерного пространства до модели с номером k класса ω_r [6, 21].

Уверенность в классификации при использовании нечеткого МГУА определяется выражением:

$$UMG_r = \frac{1}{L_k} \sum_{k=1}^{L_k} \mu_{kr}(D_{kr}), \quad (12)$$

где L_k – количество уравнений (12) в классе ω_r .

8. В теории измерения латентных переменных реализуется положение о том, что информативные признаки, с помощью которых оценивается состояние исследуемых систем, получают путем прямого измерения либо вычисляют по результатам прямых измерений. Результат оценки состояния сложных систем (подсистем) определяется не прямыми измерениями, а в ходе анализа исходных признаков и (или) комбинированных показателей получаемых расчетным путем. Это позволяет сделать вывод о том, что теория латентных переменных является адекватной по отношению к решаемому классу задач [2, 15].

В терминологии теории измерения латентных переменных исходные медицинские признаки и четко вычисляемые параметры определяются как индикаторные переменные, а неопределенные априори результаты – как латентные (скрытые) переменные.

Исследование роли индикаторных переменных в измерении латентных переменных удобно производить с помощью стандартного пакета диалоговых прикладных программ RUMM2020 (Raschunidimensional Measurement Models). Используя значения индикаторных переменных переведённых в логиты, пакет RUMM2020 строит теоретические кривые модели Г. Раша, по которым судят о соответствии индикаторных переменных моделями Г. Раша и в ходе итерационных процедур формируют пространство информативных признаков [2, 24].

В пакете RUMM 2020 предусмотрена возможность определения функциональной связи между латентной переменной L и выбранным набором индикаторных переменных S_j :

$$L=f_L(S_j), \quad (13)$$

где f_L – вид функциональной зависимости L от S_j .

При оценке состояния сложных систем в качестве латентной переменной могут выступать уверенность в прогнозе перехода системы из одного состояния в другое; уверенность в том, что система находится в одном из классов состояний ω_r ; уверенность в эффективности выбранной схемы управления и т.д.

При переходе к принятым в работе механизмам нечеткой классификации целесообразно использовать функции принадлежности к исследуемым классам состояний $\mu_{\omega_r}(L)$ с базовой переменной L определяемой в логитах. Для перехода от L к $\mu_{\omega_r}(L)$ удобно использовать такую обобщенную характеристику, определяемую пакетом RUMM2020, как гистограмма распределения объектов исследования на шкале латентной переменной L . При этом функции $\mu_{\omega_r}(L)$ строят, используя рекомендации работ [6–8].

Таким образом, модель Г. Раша может быть использована для нечеткой оценки состояния объекта исследования с расчетом уверенности в классификации в соответствии с выражением:

$$UGR_r = \mu_{\omega_r}(L). \quad (14)$$

Получение частных моделей осуществляется “своим” оригинальным методом синтеза, совокупность использования которых можно рассматривать как методологию, финальным этапом которой является агрегация частных решающих правил.

В общем виде при агрегации рассмотренных решающих правил в их гибридные коллективы могут использоваться известные методы теории распознавания образов, где показатели, получаемые по формулам (2) – (14), используются как пространство информативных признаков.

При использовании технологии мягких вычислений такой синтез целесообразно производить с учетом особенностей решаемых задач. Например, различные по своей природе группы признаков агрегируются «своими» типами решающих правил.

В другом варианте все информативные признаки обрабатываются каждым из правил входящих в коллектив. Возможен смешанный вариант, при котором различные решающие правила используют смешанные, возможно пересекающиеся, группы информативных признаков. Такие группировки могут создаваться по различному принципу: по стоимости получения информации; по времени измерения; по информативности; по особенности структуры данных и т.д.

Один из возможных методов синтеза коллектива рассмотренных выше нечетких решающих правил может быть представлен следующим образом [6, 21].

При осторожной стратегии, когда решение должно приниматься при обязательном учете «мнения» всех участков коллектива, с учетом возможных «сомнений» в направлении альтернативы (к классу ω_r) целесообразно использовать агрегатор типа:

$$UG_r = \min(UGN_r, UGV_r, UGP_r, UGD_r, UGG_r, UGM_r, UGR_r). \quad (15)$$

Если ставится задача «не пропустить» объекты класса ω_r или если степень доверия к каждому из решающих правил примерно одинакова, целесообразно проверить применимость (качество работы) решающего правила типа:

$$UG_r = \max(UGN_r, UGV_r, UGP_r, UGD_r, UGG_r, UGM_r, UGR_r). \quad (16)$$

Если использование каждого из правил добавляет уверенность в принятии решений относительно гипотезы ω_r , то целесообразно использовать итерационные накопительные процедуры, например, Е. Шортлифа:

$$UG_r = F_r(UGN_r, UGV_r, UGP_r, UGD_r, UGG_r, UGM_r, UGR_r), \quad (17)$$

где F_r – накопительная итерационная функция.

Рассматривая результаты работы коллективного решающего правила как латентные переменные, а результаты работы частных решающих правил $UGN_r, UGV_r, UGP_r, UGD_r, UGG_r, UGM_r, UGR_r$ как индикаторные переменные и используя логистическую модель Г. Раша определяется целесообразность включения частных моделей в коллективное выражение вида:

$$UG_r = \frac{a_1 * UGN_r + a_2 * UGV_r + a_3 * UGP_r + a_4 * UGD_r + a_5 * UGG_r + a_6 * UGM_r + a_7 * UGR_r}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7}, \quad (18)$$

где значения весовых коэффициентов a_j ($j=1, \dots, 7$) определяются по величинам местоположения индикаторных переменных Location [15].

Рассмотренная методология синтеза коллективов гибридных нечетких решающих правил была использована для решения задач прогнозирования заболеваний желудка, системы дыхания и нервной системы студентов ряда высших учебных заведений Курской и Воронежской областей. В ходе приведенных контрольных испытаний установлено, что качество принимаемых решений находится на уровне 0,9, что является хорошим результатом для выбранного класса задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский, Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. – М.: Медицина, 1997. – 235 с.
2. Бойцов, А.В. Синтез коллективов решающих правил прогнозирования и диагностики патологии студентов с исследованием латентных переменных и моделей Раша / дисс. канд. техн. наук: 05.11.17, защищена 20.02.2015 / А.В. Бойцов. – Курск, 2015. – 176 с.
3. Бойцов, А.В. Оценка риска заболеваемости студентов на основе комбинированных нечетких моделей / А.В. Бойцов, Л.В. Стародубцева, В.Н. Гадалов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2012. – Т. 11. – № 1. – С. 188–195.
4. Генкин, Я.Я. Новая информационная технология анализа медицинских данных / Я.Я. Генкин. – СПб: Политехника, 1999. – 191 с.
5. Ивахненко, А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачевский. – М.: Радио и связь, 1987. – 118 с.
6. Кореневский, Н.А. Использование нечеткой логики принятие решений для медицинских экспертных систем / Н.А. Кореневский // Медицинская техника. – 2015. – № 1(289). – С. 33–35.
7. Кореневский, Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем / Н.А. Кореневский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 2. – С. 99–103.
8. Кореневский, Н.А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах / Н.А. Кореневский, А.С. Башир, С.А. Горбатенко // Известия Юго-Западного государственного университета. – Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 69–73.
9. Кореневский, Н.А. Интерактивный метод классификации в задачах медицинской диагностики / Н.А. Кореневский, С.В. Дегтярев, С.П. Серегин, А.В. Новиков // Медицинская техника. – 2013. – № 4. – С. 1–3.
10. Кореневский, Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных для медицинских экспертных систем / Н.А. Кореневский, Р.А. Крупчанников, С.А. Горбатенко // Медицинская техника. – 2008. – № 2. – С. 18–24.
11. Кореневский, Н.А. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких решающих правил / Н.А. Кореневский, Р.В. Руцкой, С.Д. Долженков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах – 2013. – Т. 12. – № 4. – С. 905–909.

12. Кореневский, Н.А. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей // Н.А. Кореневский, В.И. Серебровский, Н.А. Коптева, Т.Н. Говорухина. – Курск: Изд-во Курск.гос. с.-х. академии, 2012. – 231 с.
13. Кореневский, Н.А. Метод оценки защитных свойств организма на основе нечеткой модификации модели Г. Раша / Н.А. Кореневский, А.Н. Шуткин, В.В. Федягин, Е.А. Бойцова // Известия ЮЗГУ. – 2014. – № 6. – С. 70–74.
14. Лукашов, М.И. Нечеткая оценка степени психоэмоционального напряжения и её роль в прогнозировании и диагностике заболеваний / М.И. Лукашов, В.А. Буняев, В.В. Буняев, В.И. Афанасьев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2009. – № 5. – С. 27–31.
15. Маслак, А.А. Измерение латентных переменных в социально-экономических системах / А.А. Маслак. – Славянск-на-Кубани: Издательский центр СГПИ, 2006. – 334 с.
16. Медникова, О.В. Методы, модели и алгоритмы принятия решений о состоянии здоровья студентов в зоне действия неблагоприятных экологических факторов // дисс. канд. техн. наук: 05.13.10, защищена 05.05.2008. / О.В. Медникова, Курск, 2008. – 161 с.
17. Шуткин, А.Н. Оценка состояния здоровья человека на основе метода нечеткой классификации в двумерных отображающих пространствах / А.Н. Шуткин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8. – С. 538–542.
18. Шуткин, А.Н. Использование гибридных нечетких моделей для оценки степени утомления / А.Н. Шуткин, Е.А. Бойцова, А.В. Бойцов, С.Н. Кореневская // Известия ЮЗГУ. Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2015. – № 2. – С. 107–108.
19. Шуткин, А.Н. Использование технологии мягких вычислений для защитных механизмов организма / А.Н. Шуткин, Е.А. Бойцова, Л.П. Лазурина // Известия ЮЗГУ. Серия: управление, вычислительная техника, медицинское приборостроение. – 2015. – № 2. – С. 62–72.
20. Buchanan, Bruce G. Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project / Bruce G. Buchanan, Edward H. Shortliffe. – The Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. – Jun, 1984. – 748 p.
21. Korenevskiy, N.A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems/ N. A. Korenevskiy // Biomedical Engineering. – May 2015. – Volume 49, Issue 1. – pp. 46–49.
22. Korenevskiy, N.A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems / N. A. Korenevskiy, R.A. Krupchatnikov, S.A. Gorbatenko // Biomedical Engineering Journal. – Vol. 42. – №. 2. – pp. 67–72.
23. Korenevskiy, N.A. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support system / N.A. Korenevsky, S.A. Gorbatenko, R.A. Krupchatnikov, M.I. Lukashov // Biomedical Engineering. – 2009. – V. 43. – №. 4. – pp. 187–190.
24. Rasch, G. Probabilistic models for some intelligence agent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). – Chicago: University of Chicago Press, 1980. – 199 p.
25. Zadeh, L.A. Adyances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory/ L.A. Zadeh. – Beijing: Beijing Normal University Press, China, 2005.

Шуткин Александр Николаевич

Воронежский институт ГПС МЧС России

Кандидат физико-математических наук

заместитель начальника института по учебной работе

Россия, Воронеж, 394052, ул. Краснознаменная, д. 231

Тел. (473) 236-33-05

E-mail: vigps@mail.ru

A.N. SHUTKIN

METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF HYBRID FUZZY DECISION RULES FOR THE SOLVING PROBLEMS OF PREDICTION AND EARLY DIAGNOSTICS OF DISEASES CAUSED BY EDUCATIONAL PROCESS

The paper considers the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules as a set of private methods for fuzzy decision rules based on logic L.A Zadeh, Edward H. Shortliffe, procedures A. Wald, interactive recognition systems, the method of group account of arguments and models G Rasch aggregating depending on the data structure of the investigated. Is shown that research of estimated methodology allows to solve problems of forecasting of diseases of the students caused by the risk factors generated by educational process.

Keywords: hybrid fuzzy decision rules, the methodology of synthesis, fuzzy logic, forecasting of diseases students.

BIBLIOGRAPHY

1. Bayevskiy, R.M. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i risk razvitiya zabolевaniy / R.M. Bayevskiy, A.P. Berseneva. – M.: Meditsina, 1997. – 235 s.
2. Boytsov, A.V. Sintez kollektivov reshayushchikh pravil prognozirovaniya i diagnostiki patologii studentov s issledovaniem latentnykh peremennykh i modeley Rasha / diss. kand. tekhn. nauk: 05.11.17, zashchishchena 20.02.2015 / A.V. Boytsov. – Kursk, 2015. – 176 s.

3. Boytsov, A.V. Otsenka risika zabollevayemosti studentov na osnove kombinirovannykh nechetkikh modeley / A.V. Boytsov, L.V. Starodubtseva, V.N. Gadalov // Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh. – 2012. – T. 11. – № 1. – S. 188–195.
4. Genkin, YA.YA. Novaya informatsionnaya tekhnologiya analiza meditsinskikh dannykh / YA.YA. Genkin. – SPb: Politekhnika, 1999. – 191 s.
5. Ivakhnenko, A.G. Modelirovaniye slozhnykh sistem po eksperimentalnym dannym / A.G. Ivakhnenko, Y.U.P. Yurachevskiy. – M.: Radio i svyaz, 1987. – 118 s.
6. Korenevskiy, N.A. Ispolzovaniye nechetkoy logiki prinyatiye resheniy dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem / N.A. Korenevskiy // Meditsinskaya tekhnika. – 2015. – № 1(289). – S. 33–35.
7. Korenevskiy, N.A. Metod sinteza geterogenykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniyem biotekhnicheskikh sistem / N.A. Korenevskiy // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitelnaya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye. – 2013. – № 2. – S. 99–103.
8. Korenevskiy, N.A. Sintez gibrnidnykh nechetkikh pravil dlya prognozirovaniya, otsenki i upravleniya sostoyaniyem zdorovya v ekologicheski neblagopriyatnykh regionakh / N.A. Korenevskiy, A.S. Bashir, S.A. Gorbatenko // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – Seriya upravleniye, vychislitelnaya tekhnika, informatika. Mediinskoye priborostroyeniye. – 2013. – № 4. – S. 69–73.
9. Korenevskiy, N.A. Interaktivnyy metod klassifikatsii v zadachakh meditsinskoy diagnostiki / N.A. Korenevskiy, S.V. Degtyarev, S.P. Seregin, A.V. Novikov // Meditsinskaya tekhnika. – 2013. – № 4. – S. 1–3.
10. Korenevskiy, N.A. Sintez nechetkikh setevykh modeley, obuchayemykh po strukture dannykh dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem / N.A. Korenevskiy, R.A. Krupchatnikov, S.A. Gorbatenko // Meditsinskaya tekhnika. – 2008. – № 2. – S. 18–24.
11. Korenevskiy, N.A. Metod prognozirovaniya i diagnostiki sostoyaniya zdorovya na osnove kollektivov nechetkikh reshayushchikh pravil / N.A. Korenevskiy, R.V. Rutskoy, S.D. Dolzhenkov // Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh – 2013. – T. 12. – № 4. – S. 905–909.
12. Korenevskiy, N.A. Prognozirovaniye i diagnostika zabollevaniy, vyzyvayemykh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogenykh modeley // N.A. Korenevskiy, V.I. Serebrovskiy, N.A. Kopteva, T.N. Govorukhina. – Kursk: Izd-vo Kursk.gos. s.-kh. akademii, 2012. – 231 s.
13. Korenevskiy, N.A. Metod otsenki zashchitnykh svoystv organizma na osnove nechetkoy modifikatsii modeli G. Rasha / N.A. Korenevskiy, A.N. Shutkin, V.V. Fedyanin, Ye.A. Boytsova // Izvestiya YUZGU. – 2014. – № 6. – S. 70–74.
14. Lukashov, M.I. Nechetkaya oyenka stepeni psikhoemotsionalnogo napryazheniya i yevo rol v prognozirovaniyu i diagnostike zabollevaniy / M.I. Lukashov, V.A. Bunyayev, V.V. Bunyayev, V.I. Afanasyev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. – 2009. – № 5. – S. 27–31.
15. Maslak, A.A. Izmereniye latentnykh peremennykh v sotsialno-ekonomiceskikh sistemakh / A.A. Maslak. – Slavyansk-na-Kubani: Izdatelskiy tsentr SGPI, 2006. – 334 s.
16. Mednikova, O.V. Metody, modeli i algoritmy prinyatiya resheniy o sostoyanii zdorovya studentov v zone deystviya neblagopriyatnykh ekologicheskikh faktorov // diss. kand. tekhn. nauk: 05.13.10, zashchishchena 05.05.2008. / O.V. Mednikova, Kursk, 2008. – 161 s.
17. Shutkin, A.N. Otsenka sostoyaniya zdorovya cheloveka na osnove metoda nechetkoy klassifikatsii v dvumernykh otobrazhayushchikh prostranstvakh / A.N. Shutkin // Fundamentalnyye issledovaniya. – 2015. – № 8. – S. 538–542.
18. Shutkin, A.N. Ispolzovaniye gibrnidnykh nechetkikh modeley dlya otsenki stepeni utomleniya / A.N. Shutkin, Ye.A. Boytsova, A.V. Boytsov, S.N. Korenevskaya // Izvestiya YUZGU. Seriya upravleniye, vychislitelnaya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye. – 2015. – № 2. – S. 107–108.
19. Shutkin, A.N. Ispolzovaniye tekhnologii myagkikh vychisleniy dlya zashchitnykh mehanizmov organizma / A.N. Shutkin, Ye.A. Boytsova, L.P. Lazurina // Izvestiya YUZGU. Seriya: upravleniye, vychislitelnaya tekhnika, meditsinskoye priborostroyeniye. – 2015. – № 2. – S. 62–72.
20. Buchanan, Bruce G. Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project / Bruce G. Buchanan, Edward H. Shortliffe. – The Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. – Jun, 1984. – 748 p.
21. Korenevskiy, N.A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems/ N. A. Korenevskiy // Biomedical Engineering. – May 2015. – Volume 49, Issue 1. – pp. 46–49.
22. Korenevskiy, N.A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems / N. A. Korenevskiy, R.A. Krupchatnikov, S.A. Gorbatenko // Biomedical Engineering Journal. – Vol. 42. – № 2. – pp. 67–72.
23. Korenevskiy, N.A. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support system / N.A. Korenevsky, S.A. Gorbatenko, R.A. Krupchatnikov, M.I. Lukashov // Biomedical Engineering. – 2009. – V. 43. – № 4. – pp. 187–190.
24. Rasch, G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). – Chicago: University of Chicago Press, 1980. – 199 p.
25. Zadeh, L.A. Adyances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory / L.A. Zadeh. – Beijing: Beijing Normal University Press, China, 2005.

Shutkin Alexander Nikolayevich

Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia
Ph.D. in Physics and Mathematics
Deputy Chief of the Institute on Educational Work
Russia, Voronezh, Krasnoznamennaya St., 231
Ph.: (473) 236-33-05,
E-mail: vigps@mail.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ

УДК 624

В.И. КОРОБКО, М.О. КАЛАШНИКОВ, О.В. КАЛАШНИКОВА

КОНТРОЛЬ ЖЕСТКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕМЫЧЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ – КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований железобетонных балок двух типов: с переменным начальным модулем упругости бетона при постоянной площади продольной рабочей арматуры; с переменной площадью рабочей арматуры при постоянном начальном модуле упругости бетона. Показано, что новый для строительных конструкций динамический параметр – коэффициент нелинейных искажений может служить самостоятельным критерием для оценки качества железобетонных балок. Этот параметр оказался намного чувствительнее к дефектам и повреждениям, чем основная частота колебаний балок.

Ключевые слова: железобетонные балки, модуль упругости бетона, площадь продольной рабочей арматуры, контроль качества, коэффициент нелинейных искажений.

В большинстве работ последнего времени, посвященных диагностике состояния и контролю жесткости строительных конструкций балочного типа с помощью вибрационного метода, в качестве интегрального динамического критерия используется основная (или первая резонансная) частота колебаний [1–8]. Как показали наши исследования, проведенные в «Приокском государственном университете», точность получаемых оценок максимального прогиба для железобетонных балок при этом невысокая. Разница между основными частотами колебаний эталонной конструкции и этой же конструкции, доведенной до разрушения (после снятия статической нагрузки) колеблется от 9 до 11%, а в зоне упругих деформаций (до появления первых трещин) этот диапазон сужается и составляет (4...5)%. Другими словами основная частота колебаний не очень чувствительна к дефектам строительных конструкций.

В работах [9, 10] для оценки жесткости балок был предложен новый интегральный динамический критерий – коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$, который определяется по формуле:

$$K_{\text{ни}} = 100 \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \approx \frac{100}{A_1} \sqrt{A_2^2 + A_3^2}, \quad (1)$$

где A_i – амплитуда составляющих гармоник свободных затухающих колебаний балок с частотами ηf (n – номер гармоники).

$K_{\text{ни}}$ является мерой искажений простых гармонических колебаний и представляет собой отношение эффективных значений гармонических колебаний к эффективному значению суммарного выходного сигнала.

Проведенные пробные испытания балок небольшой длины (железобетонных перемычек типа 8ПБ–13–1) показали достаточно высокую эффективность этого критерия при оценке жесткости балок [10]. В этих испытаниях разница $K_{\text{ни}}$ для добрых конструкций и пришедших в негодность достигала более чем в два раза. Это означает, что чувствительность этого критерия к дефектам контролируемых конструкций существенно выше, чем основная частота колебаний балок.

Для более глубокого изучения связи коэффициента нелинейных искажений с различными параметрами, характеризующими качество железобетонных балок, была проведена серия экспериментов на большеразмерных железобетонных моделях, изготовленных в опалубке перемычек марки 2ПБ–26–4.

Были изготовлены две серии железобетонных балок длиной 2,59 м, сечением $b \times h = 120 \times 140$ мм. Первая серия (6 балок Б–1...Б–6 по две штуки каждого типа) была изготовлена с одним и тем же классом бетона В15 и различными процентами армирования продольной рабочей арматурой (одним стержнем $d_s = 8, 10, 12, 14, 16$ и 18 мм). Вторая серия (5 балок Б–7...Б–11 по две штуки каждого типа) была изготовлена с одним и тем же процентом армирования (одним стержнем $d_s = 12$ мм) и различными классами бетона (В7,5, В15, В20, В22,5 и В30). Балки с классом бетона В15 и рабочей арматурой $d_s = 12$ мм были общими для обеих серий.

Балки готовились на заводе ЖБИ ОАО «Агропромстрой» (г. Орел) по техническим условиям изготовления перемычек типа 2ПБ–26–4 с полным и тщательным контролем всех технологических операций службой ОТК завода. Класс бетона контролировался путём испытания кубиков, забетонированных при изготовлении балок в возрасте 28 суток. После изготовления балок до их испытаний прошло 1,5 года.

Испытания проводились на типовом стенде, предназначенном для статических и динамических испытаний конструкций балочного типа. Концы балок опирались по шарнирной схеме. Был осуществлен полный комплекс необходимых статических испытаний балок с определением их жесткости, трещиностойкости и прочности по методике ГОСТ 8829–94 [11]. Одновременно со статическими проводились и динамические испытания при возбуждении в балках путем механического удара свободных поперечных колебаний с измерением основной частоты колебаний. Контроль частоты колебаний балок на разных этапах загружения осуществлялся с помощью виброанализатора «Вибран–2.0». Загружение балок производилось силикатным кирпичом ступенями в соответствии с требованиями ГОСТ 8829–94 [11].

Помимо указанных испытаний проводилось определение коэффициента нелинейных искажений балок в ненагруженном состоянии при свободных поперечных колебаниях. Амплитуды соответствующих гармоник свободных колебания исследуемой механической системы определялись с помощью виброанализатора спектра «Вибран–2.0». Этот прибор имеет запоминающее устройство и связь с компьютером. Поэтому обработка всех виброграмм и спектrogramм осуществлялась на компьютере. Примеры спектrogramм для балок Б–2–1 и Б–6–1 приведены на рисунке 1.

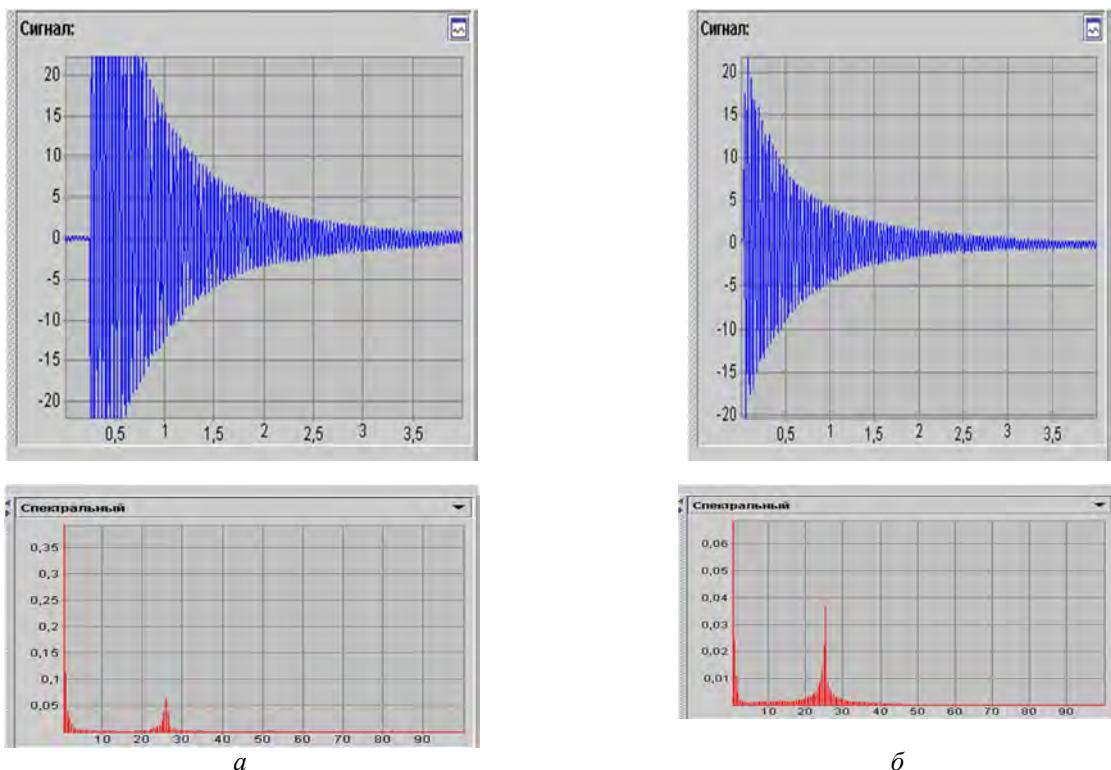


Рисунок 1 – Виброграммы и спектrogramмы свободных поперечных колебаний железобетонных балок Б–2–1 и Б–6–1: а – балка Б–2–1, б – балка Б–6–1

При проведении экспериментов за эталонную конструкцию принимались новые балки, не подвергшиеся ещё воздействию статической нагрузкой, а за дефектную конструкцию принимались балки после доведения их до разрушения и снятия статической нагрузки.

Экспериментальные данные после статистической обработки результатов измерения амплитуд трех первых гармоник и подсчета значений коэффициента нелинейных искажений приведены в таблице 1 (колонки 2 и 5). На рисунке 2 представлены графики зависимостей $K_{nu} - d_s$, построенные по табличным данным.

Таблица 1 – Экспериментальные зависимости $K_{nu} - d_s$ для железобетонных балок с различными диаметрами рабочей арматуры при классе бетона B15.

Эталонное изделие, K_{nu}			Дефектное изделие, K_{nu}		
d_s	эксперимент	расчет по (2)	d_s	эксперимент	расчет по (3)
8	0,369	0,369/0,0	8	1,280	1,282/0,15
10	0,335	0,334/0,30	10	1,026	1,011/1,36
12	0,311	0,309/0,64	12	0,898	0,906/0,89
14	0,286	0,289/1,05	14	0,844	0,854/1,18
16	0,270	0,273/1,11	16	0,816	0,824/0,84
18	0,260	0,260/0,0	18	0,799	0,802/0,38

Примечание – В колонках 3 и 6 результат, указанный в знаменателе, показывает отклонение в % экспериментальных данных от значений, полученных с помощью аппроксимирующих функций.

По экспериментальным данным построены аппроксимирующие функции:

– для эталонного изделия:

$$K_{nu} = \sqrt{0,01264 + 0,9917/d_s}; \quad (2)$$

– для дефектного изделия после потери прочности и снятия нагрузки:

$$K_{nu} = 1/(1,361 - 37,20/d_s^2). \quad (3)$$

Результаты расчета по этим функциям приведены в таблице 1 (колонки 3 и 6). Как видно из сопоставления экспериментальных данных с результатами, полученными по аппроксимирующим функциям, разница между ними не превышает 1,5%.

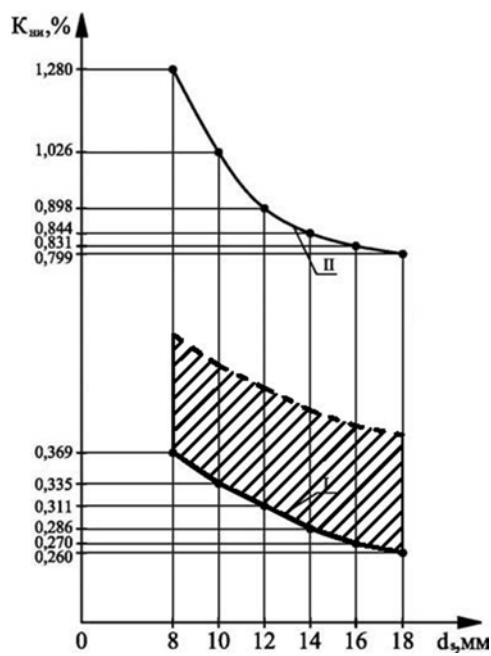


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости $K_{nu} - d_s$ для эталонных и дефектных балок при B15 и разных диаметрах продольной арматуры:
I – добротное (эталонное) изделие;
II – дефектное изделие

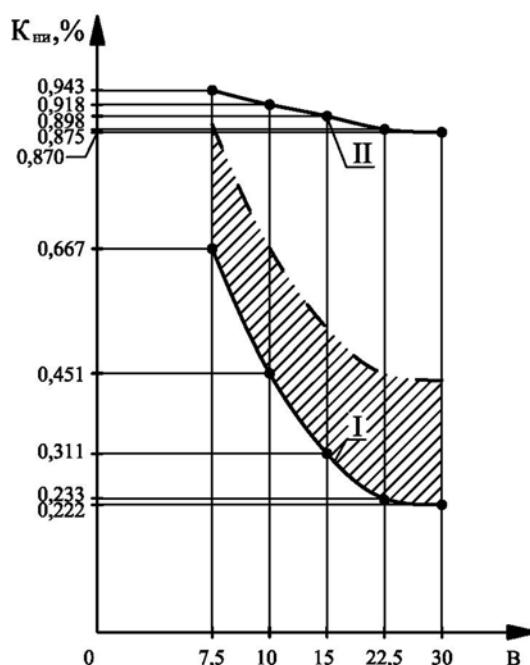


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости $K_{nu} - B$ для эталонных и дефектных балок при $d_s = 12$ мм и разных модулях упругости бетона:
I – добротное (эталонное) изделие;
II – дефектное изделие

Анализ графиков на рисунке 2 показывает:

- с ростом диаметра (площади) рабочей арматуры значения K_{hu} уменьшаются (чем добротнее конструкция, тем K_{hu} ниже);
- для конструкций с дефектами и повреждениями значения K_{hu} увеличиваются;
- разница между значениями K_{hu} для добротного и дефектного изделий весьма существенная, что свидетельствует о высокой чувствительности этого параметра к различного рода нелинейностям, вызванных появлением дефектов и повреждений.

В таблице 2 приведены данные эксперимента, отражающие зависимость коэффициента нелинейных искажений от класса бетона, а на рисунке 3 – графики зависимостей K_{hu} – В. По экспериментальным данным таблицы 2 построены аппроксимирующие функции:

- для эталонного изделия:

$$K_{hu} = 0,1738 + 27,854/B^2; \quad (4)$$

- для дефектного изделия после потери прочности и снятия нагрузки:

$$K_{hu} = \sqrt{0,7247 + 1,2326/B}. \quad (5)$$

Результаты расчета по этим функциям приведены в таблице 2 (колонки 3 и 6). Как видно из сопоставления экспериментальных данных с результатами, полученными с помощью аппроксимирующих функций, разница не превышает 2,6%.

Таблица 2 – Экспериментальные зависимости K_{hu} – В для железобетонных балок с различными классами бетона при $d_s = 12$ мм.

Эталонное изделие, K_{hu}			Дефектное изделие, K_{hu}		
B	эксперимент	расчет по (4)	B	эксперимент	Расчет по (5)
1	2	3	4	5	6
7,5	0,667	0,668/0,15	7,5	0,943	0,943/0,00
10	0,451	0,455/0,89	10	0,918	0,921/0,33
15	0,311	0,303/2,60	15	0,898	0,898/0,00
22,5	0,233	0,236/1,29	22,5	0,875	0,882/0,80
30	0,222	0,225/1,35	30	0,870	0,878/0,91

Примечание – В колонках 3 и 6 результат, указанный в знаменателе, показывает отклонение в % экспериментальных данных от значений, полученных с помощью аппроксимирующих функций.

Анализ графиков на рисунке 3 показывает:

- с ростом класса (марки) бетона значения K_{hu} уменьшаются;
- для конструкций с дефектами и повреждениями значения K_{hu} увеличиваются;
- разница между значениями K_{hu} для добротного и дефектного изделий, как и в предыдущем случае, существенная, что также свидетельствует о высокой чувствительности этого параметра к различного рода нелинейностям, вызванных появлением дефектов и повреждений. Например, для балки Б–3–1 (класс бетона В = 15 и $d_s = 12$ мм (таблица 1)) значения коэффициента нелинейных искажений для добротного изделия равен 0,311, а для дефектного – 0,898, то есть они отличаются в 2,89 раза. Такое разительное отличие говорит в пользу коэффициента нелинейных искажений. Поскольку диапазон изменения K_{hu} значительно больше, то его чувствительность к дефектам значительно выше и точность оценок контролируемых параметров качества конструкций существенно повышается.

В рассмотренном примере использования коэффициента нелинейных искажений для диагностики состояния конструкции дефекты балок моделировались изменением диаметра рабочей арматуры и изменением класса бетона. В качестве контролируемого параметра могут быть использованы и другие физические и геометрические характеристики, например, максимальный прогиб балки, контролируемая нагрузка, соответствующая появлению трещин или их раскрытию на заданную нормами величину.

При использовании коэффициента нелинейных искажений для контроля качества конструкций балочного типа область допустимых значений K_{hu} должна быть ограничена некоторой кривой, которая устанавливается экспериментально для каждого типа конструкций при освоении её выпуска на заводе–изготовителе. На рисунках 2 и 3 такие

кривые показаны условно пунктирной линией. Область на графике, лежащая между этими и нижними кривыми, является областью допустимых значений K_{hi} . Если измеренное значение K_{hi} попадает в эту область, конструкция считается пригодной для эксплуатации, если это значение лежит выше пунктирной кривой – конструкция непригодна для нормальной эксплуатации. Для конструкции конкретного типа может быть указано одно единственное значение K_{hi} . Если этот показатель выше этого значения, то конструкция должна быть забракована.

Исходя из вышесказанного, новый динамический параметр для строительных конструкций балочного типа – коэффициент нелинейных искажений – может служить самостоятельным критерием для интегральной оценки качества железобетонных конструкций, который учитывает влияние всех дефектов и повреждений конструкции, полученные при её изготовлении, и приобретённые в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: Вибраакустические технологии / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: Изд–во АСВ, 2003. – 285.
2. Коробко, В.И. Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и вибрационные воздействия / В.И. Коробко, Р.В. Алдушкин, О.В. Калашникова // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2. – С. 39–43.
3. Подмастерьев, К.В. Вибрационный метод оценки жесткости горизонтального шва составных балок / К.В. Подмастерьев, О.В. Калашникова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2. – С. 147–150.
4. Калашникова, О.В. Экспериментальные исследования двухслойных деревянных балок с переменной жесткостью и толщиной соединительного шва / П.А. Гвоздков, О.В. Калашникова и др. // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 30–34.
5. Колчунов В.И. Контроль жесткости конструкций балочного типа, изготовленных из физически нелинейного материала / В.И. Колчунов, О.В. Калашникова // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 6. – С. 21–27.
6. Пат. № 2408864 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ определения жесткости горизонтального шва в двухслойных конструкциях балочного типа / В.И. Коробко, А.В. Коробко, О.В. Бояркина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». – № 2009101870/28; заявлен 21.01.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 8 с.
7. Пат. № 2406075 Российской Федерации. МПК G01N 3/32. Способ определения жесткости горизонтального шва в двухслойных конструкциях балочного типа / В.И. Коробко, Р.В. Алдушкин, О.В. Калашникова; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». – № 200913687/28; заявлен 11.08.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 10 с.
8. Пат. № 2538361 Российской Федерации. МПК G01N 3/32. Способ контроля жесткости однопролетных балок из физически нелинейного материала / В.И. Колчунов, О.В. Калашникова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – учебно– научно–производственный комплекс». – № 2013123496/28; заявлен 22.05.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. – 9 с.
9. Калашников, М.О. Диагностика и контроль качества строительных конструкций вибрационными методами: дисс. ... кандидата технических наук: 05.23.11 / Калашников Михаил Олегович. – Орел, 2011. – 154 с.
10. Слюсарев, Г.В. Оценка качества железобетонных конструкций балочного типа вибрационным методом с использованием коэффициента нелинейных искажений / Г.В. Слюсарев, М.О. Калашников, О.В. Бояркина // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 11. – С. 14–17.
11. ГОСТ 8829–94. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Методы испытания нагружением и оценка прочности, жёсткости и трещиностойкости. – М.: Изд–во стандартов, 1994. – 26 с.

Коробко Виктор Иванович
Приокский государственный
университет,
доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
«Строительные конструкции и
материалы»
Тел. 8(8462)54–03–95
E-mail: vikor10@mail.ru

Калашников Михаил Олегович
Администрация Орловской области,
кандидат технических наук,
инспектор отдела государственного
строительного надзора,
Тел. 8(8462)54–03–95
E-mail: x-mak@mail.ru

Калашникова Ольга Владимировна
Приокский государственный
университет,
кандидат технических наук,
специалист учебного управления,
Тел. 8(8462)54–03–95
E-mail: x-mak@mail.ru

V.I. KOROBKO, M.O. KALASHNIKOV, O.V. KALASHNIKOVA

RIGITY CONTROL OF REINFORCED–CONCRETE CONNECTION ELEMENTS USING DYNAMIC CRITERION – NONLINEAR DISTORTION COEFFICIENT

Article describes the results of tests of reinforced-concrete beams of two types: with variable initial tangent modulus of elasticity of reinforced-concrete at fixed area of lateral working reinforcement; with variable area of working reinforcement at fixed initial tangent modulus of elasticity of reinforced-concrete. It is proved that new for the building constructions dynamic parameter – nonlinear distortion coefficient can be examined as independent criterion for reinforced-concrete beams evaluation quality. This parameter is considered to be much more sensitive to defects and damages, than basic frequency of beam vibrations.

Keywords: reinforced-concrete beams, concrete modulus of elasticity, area of lateral working reinforcement, quality control, coefficient of nonlinear distortions.

BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Kontrol kachestva stroitelnykh konstruktsiy: Vibroakusticheskiye tekhnologii / V.I. Korobko, A.V. Korobko. – M.: Izd-vo ASV, 2003. – 285.
2. Korobko, V.I. Eksperimentalnyye issledovaniya stalnykh ferm s parallelnymi poyasami na staticheskiye i vibratsionnyye vozdeystviya / V.I. Korobko, R.V. Aldushkin, O.V. Kalashnikova // Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii». – 2009. – № 2. – S. 39–43.
3. Podmasteriyev, K.V. Vibratsionnyy metod otsenki zhestkosti gorizontálnogo shva sostavnykh balok / K.V. Podmasteriyev, O.V. Kalashnikova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 2. – S. 147–150.
4. Kalashnikova, O.V. Eksperimentalnyye issledovaniya dvukhsloynykh derevyannyykh balok s peremennoy zhestkostyu i tolshchinoy soyedinitelnogo shva / P.A. Gvozgov, O.V. Kalashnikova i dr. // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2012. – № 4. – S. 30–34.
5. Kolchunov V.I. Kontrol zhestkosti konstruktsiy balochnogo tipa, izgotovlenyykh iz fizicheski nelineynogo materiala / V.I. Kolchunov, O.V. Kalashnikova // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2013. – № 6. – S. 21–27.
6. Pat. № 2408864 Rossiyskaya Federatsiya. MPK G01N 3/32. Sposob opredeleniya zhestkosti gorizontálnogo shva v dvukhsloynykh konstruktsiyakh balochnogo tipa / V.I. Korobko, A.V. Korobko, O.V. Boyarkina; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO «Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». – № 2009101870/28; zayavljen 21.01.2009; opubl. 10.01.2011, Byul. № 1. – 8 s.
7. Pat. № 2406075 Rossiyskaya Federatsiya. MPK G01N 3/32. Sposob opredeleniya zhestkosti gorizontálnogo shva v dvukhsloynykh konstruktsiyakh balochnogo tipa / V.I. Korobko, R.V. Aldushkin, O.V. Kalashnikova; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO «Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». – № 200913687/28; zayavljen 11.08.2009; opubl. 10.12.2010, Byul. № 34. – 10 s.
8. Pat. № 2538361 Rossiyskaya Federatsiya. MPK G01N 3/32. Sposob kontrolya zhestkosti odnoproletnykh balok iz fizicheski nelineynogo materiala / V.I. Kolchunov, O.V. Kalashnikova; zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO «Gosuniversitet – uchebno–nauchno–proizvodstvennyy kompleks». – № 2013123496/28; zayavljen 22.05.2013; opubl. 27.11.2014, Byul. № 33. – 9 s.
9. Kalashnikov, M.O. Diagnostika i kontrol kachestva stroitelnykh konstruktsiy vibratsionnymi metodami: diss. kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.11 / Kalashnikov Mikhail Olegovich. – Orel, 2011. – 154 s.
10. Slyusarev, G.V. Otsenka kachestva zhelezobetonnykh konstruktsiy balochnogo tipa vibratsionnym metodom s ispolzovaniyem koefitsiyenta nelineynykh iskazheniy / G.V. Slyusarev, M.O. Kalashnikov, O.V. Boyarkina // Kontrol. Diagnostika. – 2007. – № 11. – S. 14–17.
11. GOST 8829–94. Konstruktsii i izdeliya betonnyye i zhelezobetonnyye sbornyye. Metody ispytaniya nagruzeniyem i otsenka prochnosti, zhrostnosti i treshchinostoykosti. – M.: Izd-vo standartov, 1994. – 26 s.

Korobko Viktor Ivanovich
Prioksky State University
doctor of technical Sciences,
Professor, Professor of the
Department «Building constructions
and materials»
Ph.: 8(8462)54–03–95
E-mail: vikor10@mail.ru

Kalashnikov Mikhail Olegovich
The administration of the Orel region,
candidate of technical Sciences,
the inspector of the division for state
construction supervision,
Ph.: 8(8462)54–03–95
E-mail: x-mak@mail.ru

Kalashnikova Olga Vladimirovna
Prioksky State University
candidate of technical Sciences,
specialist of educational management,
Ph.: 8(8462)54–03–95
E-mail: x-mak@mail.ru

И.Г. КАРПОВ, Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, А.Н. ГРИБКОВ

МОДИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОРДА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ОДНОСТОРОННИХ ДИСКРЕТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В работе предложена модификация распределений Орда для аппроксимации дискретных распределений экспериментальных данных, принимающих только положительные значения, которая позволяет значительно упростить процедуру аппроксимации. На основе модификации уравнения Орда получен обобщенный односторонний закон распределения дискретных случайных величин. Разработана топографическая классификация модифицированных распределений Орда. Показано, что частными случаями полученного обобщенного распределения являются известные дискретные законы распределения, такие как равномерный, биномиальный, Пуассона, отрицательный биномиальный, гипергеометрический, отрицательный гипергеометрический. Рассмотрены основные числовые характеристики обобщенного закона распределения, а также на его основе разработан метод идентификации основных видов дискретных законов распределения. Для основных частных случаев обобщенного закона распределения получены выражения для характеристических функций, первого начального момента и основных коэффициентов.

Ключевые слова: распределения Орда, закон распределения, аппроксимация законов распределения, плотность распределения вероятностей, случайная величина.

Этапы проектирования и производства аппаратуры различного назначения предполагают получение информации о ее качестве на всех стадиях жизненного цикла – от начала проектирования до изготовления в серийном производстве и последующей ее эксплуатации. Существенная роль в этом процессе отводится испытаниям. Результаты испытаний являются основой решений по использованию аппаратуры, усовершенствованию ее конструкции и технологии изготовления. При решении целого ряда практических задач, например в задачах синтеза оптимальных методов приема и обработки информации в системах связи и оптической локации применяются дискретные законы распределения, которые находят широкое применение в качестве вероятностных моделей флуктуаций сигналов. Обычно при моделировании и испытаниях используют законы распределения Пуассона, Лагерра, биномиальный, отрицательный биномиальный [1–6]. Однако каждый из этих законов распределения в отдельности зачастую не дает необходимой степени обобщения данных по флуктуациям оптических сигналов, а некоторые из них дублируют друг друга. Кроме того, большинство применяемых в настоящее время дискретных законов распределения описываются сложными аналитическими зависимостями с использованием специальных функций. В связи с чем, очень сильно усложняется практическая реализация синтезированных алгоритмов обработки сигналов и экспериментальных данных.

Дж.К. Орд в своих работах [7, 8] в качестве источника дискретных распределений рассматривал разностное уравнение первого порядка с переменными коэффициентами:

$$\frac{\Delta p(x-1)}{p(x-1)} = \frac{p(x) - p(x-1)}{p(x-1)} = \frac{x-a}{b_2x(x-1) + b_1x + b_0}, \quad (1)$$

где a, b_0, b_1, b_2 – параметры дискретных законов распределения;

x – целочисленная дискретная переменная, принимающая значения на интервале $(-\infty, \infty)$ либо $[0, \infty)$ либо на конечном интервале $[l_1, l_2]$.

В результате решения разностного уравнения (1) Орд получил семейство дискретных распределений. В частности, распределения биномиальное, гипергеометрическое, Пуассона, отрицательное биномиальное, отрицательное гипергеометрическое и еще несколько других распределений. Однако, из-за сложности идентификации распределений этого семейства по сравнению с непрерывными распределениями Пирсона, распределения Орда используются

на практике редко [9,10]. Поэтому в работе [11] была произведена модернизацию разностного уравнения Орда (1):

$$\frac{\Delta p(x)}{p(x)} = \frac{a_1(x - m_1) - a_0}{b_2(x + 1 - m_1)^2 + b_1(x + 1 - m_1) + b_0}, \quad (2)$$

где $\Delta p(x) = p(x+1) - p(x)$;

a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 – параметры дискретных распределений;

m_1 – начальный момент 1-го порядка.

В результате решения уравнения (2) был получен обобщенный закон распределения двухсторонней дискретной случайной величины (СВ), а на его основе разработан метод идентификации дискретных распределений.

Модификация разностного уравнения Орда (2) заключается в следующем. Во–первых, в уравнении (2) параметр b_0 полагается равным нулю, а начальный момент m_1 не учитывается; во–вторых, предполагается, что соответствующее распределение $p(x)$ является односторонним. Тогда уравнение (2) принимает вид:

$$\frac{\Delta p(x)}{p(x)} = \frac{a_1 x - a_0}{b_2 (x + 1)^2 + b_1 (x + 1)}. \quad (3)$$

Впервые уравнение (3) было рассмотрено в работах [12, 13]. Используя общие свойства вероятностей возможных значений $p(x)$, установим правила определения параметров a_0, a_1, b_1, b_2 , входящих в уравнение (3). Для этого запишем уравнение (3) в следующем виде:

$$x^n(b_1(x+1) + b_2(x+1)^2) \Delta p(x) = x^n(a_1 x - a_0) p(x). \quad (4)$$

Пусть допустимые значения дискретной СВ ξ с конечным множеством значений заключены в интервале $[0, N]$ либо $[M, N]$, а со счетным множеством значений на неограниченном интервале $[0, \infty)$ либо $[M, \infty)$, где M – параметр ограничения СВ снизу. Просуммируем левую часть равенства (4) по частям, используя формулу [14, 15]:

$$\sum_{x=d_1}^{d_2} u(x) \Delta f(x) = [u(x) f(x)]_{d_1}^{d_2+1} - \sum_{x=d_1}^{d_2} f(x+1) \Delta u(x),$$

в результате получим:

$$\begin{aligned} & \left\{ (x-1)^n (b_1 x + b_2 x^2) p(x) \right\}_{d_1}^{d_2+1} - \\ & - \sum_{x=d_1}^{d_2} \left[b_1 (x^n (x+1) - (x-1)^n x) + b_2 (x^n (x+1)^2 - (x-1)^n x^2) \right] p(x) = \\ & = \sum_{x=d_1}^{d_2} x^n (a_1 x - a_0) p(x). \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение в фигурных скобках в формуле (5) обращается в нуль на верхней границе интервала суммирования, так как $p(d_2+1) = 0$, а на нижней границе интервала суммирования в общем случае равно:

$$(d_1 - 1)^n (b_1 d_1 + b_2 d_1^2) p(d_1) = (d_1 - 1)^n (b_1 d_1 + b_2 d_1^2) C,$$

где C – коэффициент нормировки.

Рассмотрим, при каких условиях оно равно нулю. Если допустимые значения дискретной СВ ξ имеют конечное множество значений в интервале $[0, N]$ либо счетное множество значений на неограниченном интервале $[0, \infty)$, то $d_1 = 0$. При этом выражение в фигурных скобках обращается в нуль. При всех других интервалах допустимых значений дискретной СВ, когда $d_1 = M$, будем полагать, что

$$b_2 M^2 + b_1 M = 0. \quad (6)$$

Используя определение начальных моментов для дискретной СВ и полагая, что выполняется условие (6), имеем:

$$a_0 m_n - b_1 \vartheta_{n1} - b_2 \vartheta_{n2} = a_1 m_{n+1}, \quad (7)$$

где $\vartheta_{n1} = \langle x^n(x+1) - (x-1)^n x \rangle$; $\vartheta_{n2} = \langle x^n(x+1)^2 - (x-1)^n x^2 \rangle$;

$m_n = \langle x^n \rangle$ – начальный момент n -го порядка.

Уравнение (7) позволяет получить рекуррентные соотношения для определения моментов более высокого порядка по моментам более низкого порядка. Последовательно полагая в (7) $n = 0, 1, 2, 3$ и учитывая, что $m_0 = 1$, $\vartheta_{01} = 1$, $\vartheta_{02} = 2m_1 + 1$, $\vartheta_{11} = 2m_1$, $\vartheta_{12} = 3m_2 + m_1$, $\vartheta_{21} = 3m_2 - m_1$, $\vartheta_{22} = 4m_3$, $\vartheta_{31} = 4m_3 - 3m_2 + m_1$, $\vartheta_{32} = 5m_4 - 2m_3 + m_2$, получим:

$$\begin{aligned} a_0 - b_1 - b_2 &= (a_1 + 2b_2)m_1; \\ (a_0 - 2b_1 - b_2)m_1 &= (a_1 + 3b_2)m_2; \\ (a_0 - 3b_1)m_2 + b_1 m_1 &= (a_1 + 4b_2)m_3; \\ (a_0 - 4b_1 + 2b_2)m_3 + (3b_1 - b_2)m_2 - b_1 m_1 &= (a_1 + 5b_2)m_4. \end{aligned} \quad (8)$$

Найдем решение разностного уравнения (3) с переменными коэффициентами при начальном условии $p(0) = C$. Для этого запишем его в виде:

$$p(x) = A(x-1)p(x-1),$$

где $A(x) = 1 + \frac{a_1 x - a_0}{b_2(x+1)^2 + b_1(x+1)}$.

При $x = 1, 2, 3$:

$$p(1) = A(0)p(0), \quad p(2) = A(1)A(0)p(0), \quad p(3) = A(2)A(1)A(0)p(0)$$

или в общем случае:

$$p(x) = [A(0)A(1)\cdots A(x-1)]p(0) = C \prod_{k=1}^x A(k-1), \quad (9)$$

так что общее решение уравнения (3) с учетом (9) равно:

$$p(x) = \begin{cases} C, & x = d_1, \\ C \prod_{k=d_1+1}^x \left(1 + \frac{a_1(k-1) - a_0}{b_2 k^2 + b_1 k} \right), & x > d_1, \end{cases} \quad (10)$$

где $C = \left[1 + \sum_{x=d_1+1}^{d_2} \prod_{k=d_1+1}^x \left(1 + \frac{a_1(k-1) - a_0}{b_2 k^2 + b_1 k} \right) \right]^{-1}$.

Решение уравнения (3) можно представить также в рекуррентной форме:

$$p(x) = \left(1 + \frac{a_1(x-1) - a_0}{x(b_2 x + b_1)} \right) p(x-1), \quad x \geq 1 + d_1. \quad (11)$$

Таким образом, обобщенный односторонний закон распределения дискретной СВ определяется выражением (10) либо (11). Из системы уравнений (8) следует, что моменты распределения (10) определяются выражениями [16]:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{a_0 - b_1 - b_2}{a_1 + 2b_2}; \quad m_2 = m_1 \frac{a_0 - 2b_1 - b_2}{a_1 + 3b_2}; \\ m_3 &= m_1 \left[\frac{(a_0 - 3b_1)(a_0 - 2b_1 - b_2)}{(a_1 + 3b_2)(a_1 + 4b_2)} + \frac{b_1}{a_1 + 4b_2} \right]; \\ m_4 &= \frac{(a_0 - 4b_1 + 2b_2)m_3 + (3b_1 - b_2)m_2 - b_1 m_1}{a_1 + 5b_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Выразим параметры распределения (10) через его моменты (12). В результате решения первых трех уравнений системы (8) относительно интересующих нас параметров b_1, b_2, a_1, a_0 , получим:

$$\begin{aligned} b_2 &= 1 - K_2; \quad b_1 = b_2(k_1 - m_1) + k_1; \quad a_1 = -4b_2 - 1; \\ a_0 &= b_2(1 + k_1 - 3m_1) + k_1 - m_1, \end{aligned} \quad (13)$$

где коэффициент K_2 определяется соотношением:

$$K_2 = 1 - \frac{\mu_3/\mu_2 + 1 - 2\mu_2/m_1}{2(m_1 - 1 + \mu_2/m_1)} = 1 - \frac{k_2 + 1 - 2k_1}{2(m_1 - 1 + k_1)}, \quad (14)$$

а коэффициенты k_1 и k_2 выражениями:

$$k_1 = \frac{\mu_2}{m_1}; \quad k_2 = \frac{\mu_3}{\mu_2}. \quad (15)$$

В соотношениях (14) и (15) μ_2, μ_3 – центральные моменты 2–го и 3–го порядков.

Как следует из формул (13)–(15), параметры распределения (10) либо (11) определяются в конечном итоге коэффициентами k_1 и k_2 , а также начальным моментом m_1 .

Рассмотрим основные частные случаи обобщенного распределения вероятностей (10) либо (11), чтобы выяснить, каким образом оно связано с известными уже дискретными законами распределения. Оценку потенциальных возможностей обобщенного распределения (10) будем производить с помощью коэффициентов L_1 и L_2 , связанных с коэффициентами k_1 и k_2 соотношениями:

$$L_1 = k_1/(1 + k_1); \quad L_2 = k_2 + 1 - 2k_1. \quad (16)$$

Когда $L_2 \leq 0$, то нижняя граница области существования дискретной СВ $d_1 = 0$. Если $L_2 > 0$, то $d_1 = 0$ при $b_1 \geq 0$.

Распределение I (бета–биномиальное распределение). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 , определяемых формулами (16), выполняются неравенства $0 < L_1 < 1, L_2 < 0$. При этом (10) с учетом $d_1 = 0$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{(c)_N (N+1-x)_x (b)_x}{(b+c)_N (N+c-x)_x x!}, \quad x = 0, 1, 2 \dots N, \quad (17)$$

где $c > 0, b > 0, N \geq 2$ – параметры распределения;

$a_k = a(a+1)\dots(a+k-1)$ – символ Похгаммера [17].

Частными случаями распределения (17) являются дискретный равномерный закон при $b=1, c=1$ и отрицательное гипергеометрическое распределение при $b=m, c=M+1-m$ [5, 6]. На рисунке 1 представлена область существования распределения (17) в координатах L_1-L_2 . Для нее справедливы неравенства $0 < L_1 < 1, L_2 < 0$.

Распределение II (биномиальное распределение). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 выполняются соотношения $0 < L_1 < 0,5; L_2 = 0$. Тогда (10) с учетом $d_1 = 0$ сводится к биномиальному распределению [5, 6]:

$$p(x) = \frac{(N+1-x)_x p^x}{x! (1-p)^{x-N}}, \quad x = 0, 1, 2 \dots N, \quad (18)$$

где $0 < p < 1, N \geq 1$ – параметры распределения.

Частным случаем распределения (18) при $N = 1$ является закон Бернулли. На рисунке 1 представлена область существования распределения (18). Ей соответствует отрезок прямой II.

Распределение III (распределение Пуассона). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 выполняются соотношения $L_1 = 0,5; L_2 = 0$. При этом (10) с учетом $d_1 = 0$ сводится к распределению Пуассона [5, 6]:

$$p(x) = \frac{\lambda^x}{x!} \exp(-\lambda), \quad x = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (19)$$

На рисунке 1 области существования распределения (19) соответствует точка с координатами $L_1 = 0,5; L_2 = 0$.

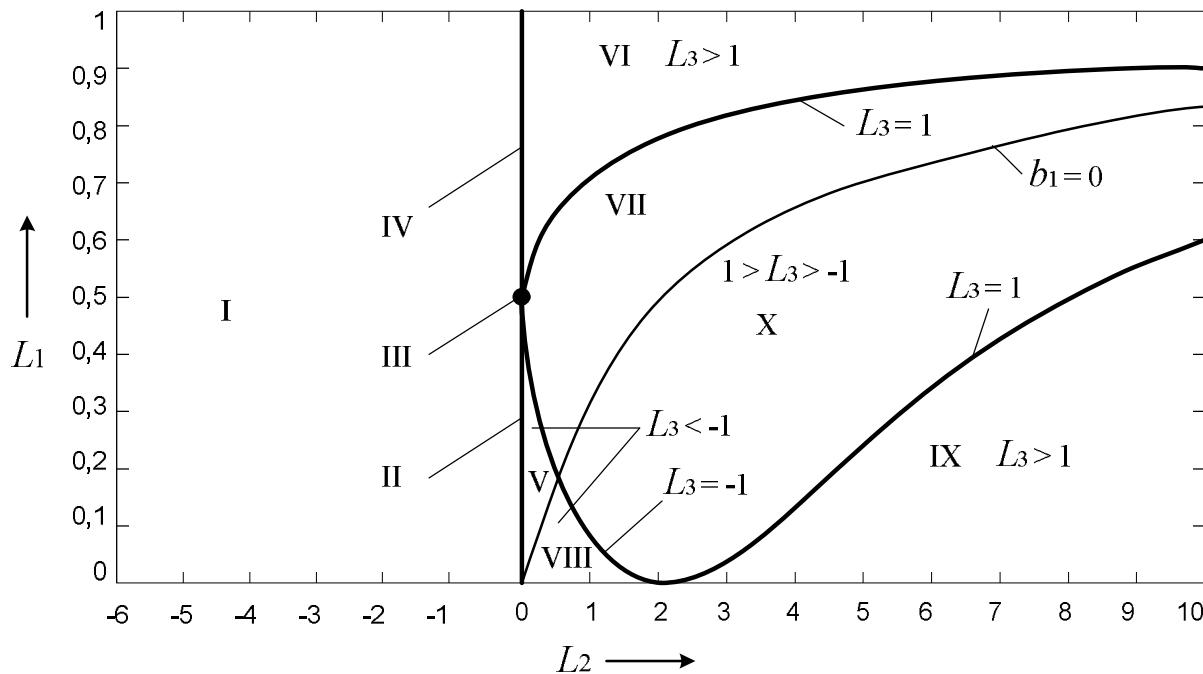


Рисунок 1 – Диаграмма основных односторонних законов распределения

Распределение IV (отрицательное биномиальное распределение). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 выполняются соотношения $0,5 < L_1 < 1, L_2 = 0$. При этом (10) с учетом $d_1 = 0$ сводится к отрицательному биномиальному распределению [5, 6]:

$$p(x) = \frac{(\alpha)_x}{x!} q^x (1-q)^\alpha, \quad x = 0, 1, 2, \dots, \infty, \quad (20)$$

где $0 < q < 1, \alpha > 0$ – параметры распределения.

Частным случаем распределения (20) при $\alpha = 1$ является геометрическое распределение. На рисунке 1 представлена область существования распределения (20). Ей соответствует отрезок прямой IV.

Распределение V (гипергеометрическое распределение). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 выполняются неравенства $0 < L_1 < 0,5; 0 < L_2 < 0,5$. Введем вспомогательный коэффициент L_3 , связанный с параметрами распределения (10) соотношением:

$$L_3 = \frac{(k_2 - 1)(m_1 - 1 + k_1) - L_2}{2\sqrt{L_2 m_1 k_1 [L_2 + 2(m_1 - 1 + k_1)]}}.$$

Если $L_3 \leq -1$, то (10) с учетом $d_1 = 0$ преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(1+c-N)_N (N+1-x)_x (b+1-x)_x}{(1+b+c-N)_N (1+c-N)_x x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (21)$$

где $c \geq N, b \geq N, N \geq 2$ – параметры распределения.

Частным случаем распределения (21) при целых значениях параметров b и c является классическое гипергеометрическое распределение [5, 6].

На рисунке 1 представлена область существования распределения (21). Для нее справедливы неравенства $0 < L_1 < 0,5; 0 < L_2 < 0,5$. Сверху она ограничена отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $L_3 = -1$, а справа отрезком кривой, для точек

которого выполняется условие $b_1 = 0$. Этим отрезкам соответствует область существования биномиального распределения с ненулевым параметром сдвига. Оно является предельным законом для распределения (21) соответственно при $b = N$, $c \rightarrow \infty$ и $c = N$, $b \rightarrow \infty$.

Распределение VI (отрицательное бета–биномиальное распределение). Пусть для коэффициентов L_1 и L_2 выполняются неравенства $0,5 < L_1 < 1$; $0 < L_2 < \infty$. При этом коэффициент $L_3 \geq 1$. Тогда распределение (10) с учетом $d_1 = 0$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{B(a+c+1, b+c+1)(a)_x (b)_x}{B(c+1, a+b+c+1)(a+b+c+1)_x x!}, \quad x = 0, 1, 2 \dots \infty, \quad (22)$$

где $a > 0$, $b \geq a$, $c > 0$ – параметры распределения;

$B(a, b)$ – бета–функция.

На рисунке 1 представлена область существования распределения (22). Для нее справедливы неравенства $0,5 < L_1 < 1$; $0 < L_2 < \infty$. Справа она ограничена отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $L_3 = 1$.

Распределение VII. Пусть для коэффициентов L_1 , L_2 и L_3 выполняются соответственно неравенства $0,2 < L_1 < 1$, $0 < L_2 < \infty$, $-1 < L_3 < 1$. При этом распределение (10) с учетом $d_1 = 0$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{\left| \Gamma(b+c+1+i\sqrt{a}) \right|^2}{\Gamma(c+1)\Gamma(2b+c+1+x)} \cdot \frac{\left| \Gamma(b+x+i\sqrt{a}) \right|^2}{\left| \Gamma(b+i\sqrt{a}) \right|^2 x!}, \quad x = 0, 1, 2 \dots \infty, \quad (23)$$

где $c > 0$, $b \geq -0,5c$, $a > 0$ – параметры распределения;

$\Gamma(z)$ – гамма–функция.

На рисунке 1 представлена область существования распределения (23). Для нее справедливы неравенства $0,2 < L_1 < 1$, $0 < L_2 < \infty$, $-1 < L_3 < 1$. Слева она соприкасается с областями существования распределений (22) и (21). Справа она ограничена отрезком кривой, представляющей собой область существования частного случая распределения (23) при $b = -0,5c$, то есть когда параметр $b_1 = 0$.

Теперь рассмотрим частные случаи распределения (10), когда параметр $b_1 < 0$. При этом параметр $d_1 = M > 0$.

Распределение VIII (ограниченное снизу гипергеометрическое распределение). Пусть для коэффициентов L_1 , L_2 и L_3 выполняются неравенства $0 < L_1 \leq 0,2$; $0,5 \leq L_2 \leq 2$; $L_3 \leq -1$.

Тогда (10) с учетом $d_1 = M$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{(N+1-x)_{x-M} (b+1-x)_{x-M} N!}{(b+1)_{N-M} (x-M)! x!}, \quad x = M, \dots, N, \quad (24)$$

где $0 \leq M < N$, $b \geq N$, $N \geq 2$ – параметры распределения.

На рисунке 1 представлена область существования распределения (24). Для нее справедливы неравенства $0 < L_1 \leq 0,2$; $0,5 \leq L_2 \leq 2$; $L_3 \leq -1$. Сверху она ограничена отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $L_3 = -1$, а слева отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $b_1 = 0$. Этим отрезкам соответствует область существования биномиального закона с ненулевым параметром сдвига. Он является предельным законом для распределения (24) при $b = N$, $M \rightarrow \infty$ и $M = 0$, $b \rightarrow \infty$.

Распределение IX (бета–распределение Паскаля [10, 18]). Пусть выполняются неравенства $0 < L_1 < 1$; $2 < L_2 < \infty$, $L_3 \geq 1$. Тогда распределение (10) с учетом $d_1 = M$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{\Gamma(a+1)\Gamma(b+1)(M-a)_{x-M} (M-b)_{x-M}}{\Gamma(a+b+1-M)(x-M)!x!}, \quad x = M, M+1, \dots, \infty, \quad (25)$$

где $0 < a \leq b$, $0,5M < b < M$, $1 \leq M < a+b$ – параметры распределения.

На рисунке 1 представлена область существования распределения (25). Для нее справедливы неравенства $0 < L_1 < 1$; $2 < L_2 < \infty$, $L_3 \geq 1$. Слева она ограничена отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $L_3 = 1$.

Таблица 1 – Основные числовые характеристики дискретных законов распределения вероятностей (РВ).

Тип РВ	m_1	$k_1 = \mu_2/m_1$	$k_2 = K_1 = \mu_3/\mu_2$	K_2
I	$\frac{bN}{b+c}$	$\frac{c(b+c+N)}{(b+c)(b+c+1)}$	$\frac{(c-b)(2N+b+c)}{(b+c)(b+c+2)}$	$\frac{b+c+3}{b+c+2}$
II	pN	$1-p$	$1-2p$	1
III	λ	1	1	1
IV	$\frac{\alpha q}{1-q}$	$\frac{1}{1-q}$	$\frac{1+q}{1-q}$	1
V	$\frac{Nb}{b+c}$	$\frac{c(b+c-N)}{(b+c)(b+c-1)}$	$\frac{(c-b)(c+b-2N)}{(b+c)(b+c-2)}$	$\frac{b+c-3}{b+c-2}$
VI	$\frac{ab}{c}$	$\frac{(a+c)(b+c)}{c(c-1)}$	$\frac{(2a+c)(2b+c)}{c(c-2)}$	$\frac{c-3}{c-2}$
VII	$\frac{a+b^2}{c}$	$\frac{(b+c)^2+a}{c(c-1)}$	$\frac{(2b+c)^2+4a}{c(c-2)}$	$\frac{c-3}{c-2}$
VIII	$\frac{Nb}{b+N-M}$	$\frac{(N-M)(b-M)}{(b+N-M)(b+N-M-1)}$	$\frac{M^2-(b-N)^2}{(b+N-M)(b+N-M-2)}$	$\frac{b+N-M-3}{b+N-M-2}$
IX	$\frac{ab}{a+b-M}$	$\frac{(M-a)(M-b)}{(a+b-M)(a+b-M-1)}$	$\frac{M^2-(b-a)^2}{(a+b-M)(a+b-M-2)}$	$\frac{a+b-M-3}{a+b-M-2}$
X	$\frac{a+b^2}{2b-M}$	$\frac{(b-M)^2+a}{(2b-M)(2b-M-1)}$	$\frac{M^2+4a}{(2b-M)(2b-M-2)}$	$\frac{2b-M-3}{2b-M-2}$

Распределение X (ограниченное снизу распределение VII). Пусть для коэффициентов L_1 , L_2 и L_3 выполняются неравенства $0 < L_1 < 1$, $0,5 < L_2 < \infty$, $-1 < L_3 < 1$. При этом (10) с учетом $d_1 = M$ преобразуется к виду:

$$p(x) = \frac{\left| \Gamma(1+b+i\sqrt{a})^2 \right|}{\Gamma(1+2b-M)(x-M)!} \cdot \frac{\left| \Gamma(x-b+i\sqrt{a})^2 \right|}{\left| \Gamma(M-b+i\sqrt{a})^2 \right| x!}, \quad x = M, M+1, \dots, \infty, \quad (26)$$

где $a > 0$, $b > 0,5M$, $M \geq 0$ – параметры распределения.

На рисунке 1 представлена область существования распределения (26). Для нее справедливы неравенства $0 < L_1 < 1$, $0,5 < L_2 < \infty$, $-1 < L_3 < 1$. Слева она ограничена отрезком кривой, представляющей собой область существования частного случая распределения (26) при $M=0$, то есть когда параметр $b_1=0$. Справа она ограничена отрезком кривой, для точек которого выполняется условие $L_3 = 1$. Он представляет собой область существования частного случая распределения (25). Снизу она соприкасается с областью существования распределения (24).

В таблице 1 для основных частных случаев обобщенного распределения (10) приведены выражения для первого начального момента m_1 , коэффициентов k_1 и k_2 , а также коэффициента K_2 [17, 19].

Из теории вероятностей известно, что характеристическая функция дискретного закона распределения определяется выражением [5, 16]:

$$\theta(j\vartheta) = \sum_{x=0}^d \exp(j\vartheta x) p(x). \quad (27)$$

Таблица 2 – Характеристические функции дискретных законов распределения вероятностей.

Тип РВ	Характеристическая функция $\theta(j\vartheta)$
I	$\theta(j\vartheta) = \frac{(c)_N}{(b+c)_N} {}_2F_1(-N, b; 1-c-N; e^{j\vartheta}), \quad c > 0, \quad b > 0, \quad N \geq 2$
II	$\theta(j\vartheta) = (1-p)^N {}_1F_0\left(-N; -\frac{pe^{j\vartheta}}{1-p}\right) = (1-p(1-e^{j\vartheta}))^N, \quad 0 < p < 1, \quad N \geq 1$
III	$\theta(j\vartheta) = \exp(-\lambda) {}_0F_0(\lambda e^{j\vartheta}) = \exp(\lambda(e^{j\vartheta} - 1)), \quad \lambda > 0$
IV	$\theta(j\vartheta) = (1-q)^\alpha {}_1F_0(\alpha; qe^{j\vartheta}) = (1-q)^\alpha (1-qe^{j\vartheta})^{-\alpha}, \quad 0 < q < 1, \quad \alpha > 0$
V	$\theta(j\vartheta) = \frac{B(1+c, 1+c+b-N)}{B(1+c-N, 1+c+b)} {}_2F_1(-N, -b; 1+c-N; e^{j\vartheta}),$ $c \geq N, \quad b \geq N, \quad N \geq 2$
VI	$\theta(j\vartheta) = \frac{B(\alpha+c+1, b+c+1)}{B(c+1, a+b+c+1)} {}_2F_1(a, b; a+b+c+1; e^{j\vartheta}),$ $a > 0, \quad b \geq a, \quad c > 0$
VII	$\theta(j\vartheta) = \frac{B(b+c+1-i\sqrt{a}, b+c+1+i\sqrt{a})}{B(c+1, 1+c+2b)} {}_2F_1(b+i\sqrt{a}, b-i\sqrt{a}; 1+c+2b; e^{j\vartheta}),$ $c > 0, \quad b \geq -0,5c, \quad a > 0$
VIII	$\theta(j\vartheta) = \frac{B(1+N, 1+b)}{B(1+M, 1+b+N-M)} \cdot e^{j\vartheta M} {}_2F_1(M-N, M-b; 1+M; e^{j\vartheta}),$ $0 \leq M < N-1, \quad b \geq N, \quad N \geq 2$
IX	$\theta(j\vartheta) = \frac{B(\alpha+1, b+1)}{B(1+a+b-M, 1+M)} \cdot e^{j\vartheta M} {}_2F_1(M-a, M-b; 1+M; e^{j\vartheta}),$ $0 < a \leq b, \quad 0,5M < b < M, \quad M \geq 1, \quad a+b > M$
X	$\theta(j\vartheta) = \frac{\left \Gamma(1+b+i\sqrt{a}) \right ^2}{\Gamma(1+2b-M)M!} \cdot e^{j\vartheta M} {}_2F_1(M-b+i\sqrt{a}, M-b-i\sqrt{a}; 1+M; e^{j\vartheta}),$ $0 < a, \quad b > 0,5M, \quad M \geq 0$

Подставив (10) в (27) и, просуммировав, можно получить выражение характеристической функции для обобщенного одностороннего дискретного закона распределения. В таблице 2 приведены выражения для характеристических функций основных частных случаев обобщенного распределения (10) [19, 20].

Выводы.

На основе модификации уравнения Орда (2) получен обобщенный односторонний закон распределения дискретных СВ, определяемый распределением вероятностей (10) либо (11). Показано, что частными случаями распределения (10) являются известные дискретные

законы распределения, такие как равномерный, биномиальный, Пуассона, отрицательный биномиальный, гипергеометрический, отрицательный гипергеометрический [5, 6]. Рассмотрены основные числовые характеристики обобщенного распределения (10), а также на его основе разработан метод идентификации основных видов дискретных законов распределения с помощью коэффициентов L_1 , L_2 и вспомогательного коэффициента L_3 . Для основных частных случаев обобщенного распределения (10) получены выражения для характеристических функций, первого начального момента m_1 и коэффициентов k_1 , k_2 , K_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев, А.Г. Статистическая теория лазерной связи / А.Г. Шереметьев. – М.: Связь, 1971. – 264 с.
2. Гальярди, Р.М. Оптическая связь / Р.М. Гальярди, Ш. Карп. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
3. Основы импульсной лазерной локации / Под. ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.
4. Хименко, В.И. Статистическая акустооптика и обработка сигналов / В.И. Хименко, Д.В. Тигин. – СПб.: Изд–во С.–Петербургского университета, 1996. – 292 с.
5. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001. – 296 с.
6. Ивченко, Г.И. Дискретные распределения. Вероятностно–статистический справочник: Одномерные распределения / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 256 с.
7. Ord, J.K. On a system of discrete distributions. / J.K. Ord. – Biometrika, 1967. – № 3–4. – pp. 649–656.
8. Ord, J.K. Approximations to distribution functions which are hypergeometric series / J.K. Ord. – Biometrika, 1968. – № 1. – pp. 243–248.
9. Бостанджян, В.А. Пособие по статистическим распределениям / В.А. Бостанджян. – Черноголовка: Редакционно–издательский отдел ИПХФ РАН, 2000. – 1007 с.
10. Джонсон, Н.Л. Одномерные непрерывные распределения: часть 1 / Н.Л. Джонсон, С. Коц, Н. Балакришнан. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 703 с.
11. Карпов, И.Г. Модернизация распределений Орда для аппроксимации двухсторонних дискретных распределений экспериментальных данных / И.Г. Карпов, А.Н. Грибков // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 15–21.
12. Карпов, И.Г. Обобщенный дискретный закон распределения флуктуаций оптических сигналов / И.Г. Карпов // Радиотехника. – 2002. – № 4. – С. 70–75.
13. Карпов, И.Г. Методы обобщенного вероятностного описания и идентификации негауссовских случайных величин и процессов / И.Г. Карпов, М.Г. Карпов, Д.К. Проскурин. – Воронеж: ВГУ, 2010. – 172 с.
14. Никифоров, А.Ф. Классические ортогональные полиномы дискретной переменной / А.Ф. Никифоров, С.К. Суслов, В.Б. Уваров. – М.: Наука, 1985. – 216 с.
15. Бейтмен, Г., Высшие трансцендентные функции. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М.: Наука, 1966. – 296 с.
16. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
17. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1984. – 800 с.
18. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 910 с.
19. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1983. – 750 с.
20. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Дополнительные главы / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1986. – 800 с.

Карпов Иван Георгиевич
Доктор технических наук,
профессор

Зырянов Юрий Трифонович
ФГБОУ ВПО Тамбовский
государственный технический
университет, г. Тамбов
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирование
радиоэлектронных и
микропроцессорных систем
392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Тел: (4752) 72–69–64
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Грибков Алексей Николаевич
ФГБОУ ВПО Тамбовский
государственный технический
университет, г. Тамбов
Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирование
радиоэлектронных и
микропроцессорных систем
392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Тел: (4752) 63–94–17
E-mail: GribkovAlexey@yandex.ru

I.G. KARPOV, Yu.T. ZYRYANOV, A.N. GRIBKOV

MODIFICATION OF ORD DISTRIBUTION FOR THE APPROXIMATION OF THE UNILATERAL DISCRETE EXPERIMENTAL DATA DISTRIBUTION

We propose a modification of the Horde distributions to approximate discrete distributions of the experimental data, taking only positive values which can greatly simplify the fitting procedure. On the basis of the modification of the equation Horde received a generic one-sided law of distribution of discrete random variables. Designed topographic classification modified distributions Horde. It is shown that the special case of producing a generalized distribution are known discrete distributions such as uniform, binomial, Poisson, negative binomial, hypergeometric, negative hypergeometric. The basic numerical characteristics of a generalized distribution law, and based on it developed a method of identifying the main types of discrete laws of distribution. For the special case of the basic distribution law expressions are obtained for the characteristic features of the first start time and the main factors.

Keywords: Ord distribution, distribution law, approximation of distribution laws, density of probabilities distribution, random variable.

BIBLIOGRAPHY

1. Sheremetev, A.G. Statisticheskaya teoriya lazernoy svyazi / A.G. Sheremetev. – M.: Svyaz, 1971. – 264 s.
2. Galyardi, R.M. Opticheskaya svyaz / R.M. Galyardi, SH. Karp. – M.: Svyaz, 1978. – 424 s.
3. Osnovy impulsnoy lazernoy lokatsii / Pod. red. V.N. Rozhdestvina. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 512 s.
4. Khimenko, V.I. Statisticheskaya akustooptika i obrabotka signalov / V.I. Khimenko, D.V. Tigin. – SPb.: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1996. – 292 s.
5. Vadzinskiv, R.N. Spravochnik po verovatnostnym raspredeleniyam / R.N. Vadzinskiv. – SPb.: Nauka, 2001. – 296 s.
6. Ivchenko, G.I. Diskretnyye raspredeleniya. Veroyatnostno-statisticheskiy spravochnik: Odnomernyye raspredeleniya / G.I. Ivchenko, YU.I. Medvedev. – M.: LENAND, 2014. – 256 s.
7. Ord, J.K. On a system of discrete distributions. / J.K. Ord. – Biometrika, 1967. – № 3–4. – pp. 649–656.
8. Ord, J.K. Approximations to distribution functions which are hypergeometric series / J.K. Ord. – Biometrika, 1968. – № 1. – pp. 243–248.
9. Bostandzhyan, V.A. Posobie po statisticheskim raspredeleniyam / V.A. Bostandzhyan. – Chernogolovka: Redaktsionno-izdatelskiy otdel IPKHF RAN, 2000. – 1007 s.
10. Dzhonson, N.L. Odnomernye nepreryvnyye raspredeleniya: chast 1 / N.L. Dzhonson, S. Kots, N. Balakrishnan. – M.: BINOM. Laboratoriya znanii, 2010. – 703 s.
11. Karpov, I.G. Modernizatsiya raspredeleniy Orda dlya approksimatsii dvukhstoronnikh diskretnykh raspredeleniy eksperimentalnykh dannykh / I.G. Karpov, A.N. Gribkov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2014. – T. 325. – № 2. – C. 15–21.
12. Karpov, I.G. Obobshchennyi diskretnyyi zakon raspredeleniya fluktuatsiy opticheskikh signalov / I.G. Karpov // Radiotekhnika. – 2002. – № 4. – S. 70–75.
13. Karpov, I.G. Metody obobshchennogo verovatnostnogo opisaniya i identifikatsii negaussovskikh sluchaynykh velichin i protsessov / I.G. Karpov, M.G. Karpov, D.K. Proskurin. – Voronezh: VGU, 2010. – 172 s.
14. Nikiforov, A.F. Klassicheskiye ortogonalnyye polinomy diskretnoy peremennoy / A.F. Nikiforov, S.K. Suslov, V.B. Uvarov. – M.: Nauka, 1985. – 216 s.
15. Bevtmen, G., Vysshie transsendentnyye funktsii. Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonalnyye mnogochleny / G. Bevtmen, A. Erdevi. – M.: Nauka, 1966. – 296 s.
16. Gnedenko, B.V. Kurs teorii verovatnostey / B.V. Gnedenko. – M.: Nauka, 1988. – 448 s.
17. Prudnikov, A.P. Integraly i ryady. Elementarnyye funktsii / A.P. Prudnikov, YU.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1984. – 800 s.
18. Veroyatnost i matematicheskaya statistika: entsiklopediya / Gl. red. YU.V. Prokhorov. – M.: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1999. – 910 s.
19. Prudnikov, A.P. Integraly i ryady. Spetsialnyye funktsii / A.P. Prudnikov, YU.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1983. – 750 s.
20. Prudnikov, A.P. Integraly i ryady. Dopolnitelnyye glavy / A.P. Prudnikov, YU.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1986. – 800 s.

Karpov Ivan Georgievich

Doctor of technical sciences,
professor

Zyryanov Yuri Trifonovich

Tambov State Technical University,
Tambov
Doctor of technical sciences, professor,
professor of Chair «Design of Radio
Electronic and Microprocessor Systems»
392000, Tambov, Sovetskaya St, 106
Ph.: (4752) 72–69–64
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Gribkov Alexey Nickolaevich

Tambov State Technical University,
Tambov
Candidate of technical sciences, associate
professor of Chair «Design of Radio
Electronic and Microprocessor Systems»
392000, Tambov, Sovetskaya St, 106
Ph.: (4752) 63–94–17
E-mail: GribkovAlexey@yandex.ru

УДК 550.37

Р.В. РОМАНОВ, Н.В. ДОРОФЕЕВ, О.Р. КУЗИЧКИН, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В данной работе рассматривается подход к организации пространственно–временной обработки геоэлектрических данных в системах автоматизированного геодинамического контроля. Он позволяет объединить методическое, алгоритмическое, программно–техническое и информационное сопровождение процессов сбора и обработки геодинамической информации на локально выделенных объектах контроля ПТС в единое целое. Использование полученных соотношений, упрощает проведение геодинамической оценки вариаций отдельных выделяемых объектов исследования на основе анализа модельных изменений коэффициентов в передаточной функции геоэлектрического разреза.

Ключевые слова: геодинамический контроль, геоэлектрические методы, передаточная функция, обработка информации, автоматизированная система.

В настоящее время значительно возрастает нагрузка на среду в природно–технических системах (ПТС), что приводит к необходимости разработки и внедрения систем автоматизированного геодинамического контроля, предназначенных для решения проблем защиты и предупреждения катастроф на технических и жизнеобеспечивающих объектах ПТС [1]. Так как в этом случае мы имеем дело с территориально распределенными объектами контроля, построение систем автоматизированного геодинамического контроля базируется на принципиальной возможности проведения оценки и геодинамического прогноза в ПТС на основе локальных наблюдений за отдельными выделенными геодинамически активными зонами [2–4]. Отдельные объемы среды имеют собственный природный ритм, и их геодинамика определяется своими природными режимами, осложненными техногенезом [5]. При этом они обладают определенными свойствами и характеристиками, позволяющими выделять их как отдельный геодинамический объект, принадлежащий определенному классу моделей. В целом, представляя геологическую среду как совокупность больших и малых объемов среды (объектов), можно выделить отдельные геодинамические объекты, определяющие тот или иной процесс в ПТС. Это дает возможность сфокусировать внимание на выделяемых локальных геодинамических возмущениях при обобщенной оценке геодинамики геологической среды и прогноза, связанных с ней запроектных ситуаций в ПТС.

Известно, что интенсивность суммарных вариаций среды гораздо меньше, чем интенсивность геодинамических изменений отдельных объектов [6]. Соответственно контроль за выделяемыми геодинамическими объектами позволяет получать информацию о возможных катастрофических изменениях ранее, чем при слежении за геодинамикой среды в целом. Наиболее перспективным при организации автоматизированного контроля геодинамических объектов является применение геоэлектрических методов зондирования сред, которые обеспечивают эффективную организацию наблюдений за геологическими объектами, оценку состояния и прогноза развития, что определяется их высокой технологичностью. Основной проблемой их применения для геодинамического контроля в ПТС является то, что существующие в настоящее время системы автоматизированного геоэлектрического контроля предназначены в основном для научных исследований и строятся на сравнительном анализе временных рядов с фильтрацией природных и техногенных ритмов и на выделении полезной геодинамической составляющей [7]. В большинстве случаев такой подход удобен для исследовательских целей, а при реализации функции контроля, предназначенного для оперативной реакции на критичные геодинамические изменения в ПТС в целом, он является крайне неэффективным.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ методов пространственно–временной обработки геоэлектрических данных в системах автоматизированного

геодинамического контроля обеспечивающих методическое, алгоритмическое, программно–техническое и информационное сопровождение процессов сбора и обработки геодинамической информации.

Геодинамические вариации среды в зоне действия ПТС обладают значительной сложностью и разнообразностью, что приводит к необходимости расширения количества контролируемых параметров пространственно–распределенных геодинамических объектов при геодинамическом контроле, что значительно увеличивает информационные потоки в системе сбора геоэлектрических данных. При этом одной из основных организаций пространственно–временной обработки геоэлектрических данных состоит, в том что, при решении задач геодинамического контроля необходимо существенно уменьшать время обработки информации для формирования оперативной реакции на критичные изменения объекта исследования [8]. Именно улучшение качественных показателей, сокращение времени выработки прогнозных решений и соответственно повышение эффективности проведения геодинамического контроля в ПТС является основной целью разработки и применения автоматизированных систем пространственно–временной обработки геоэлектрических данных.

На рисунке 1 приведена обобщенная структура системы пространственно–временной обработки геоэлектрических данных, показывающая основные процессы информационной обработки геоэлектрических данных при геодинамическом контроле в ПТС.

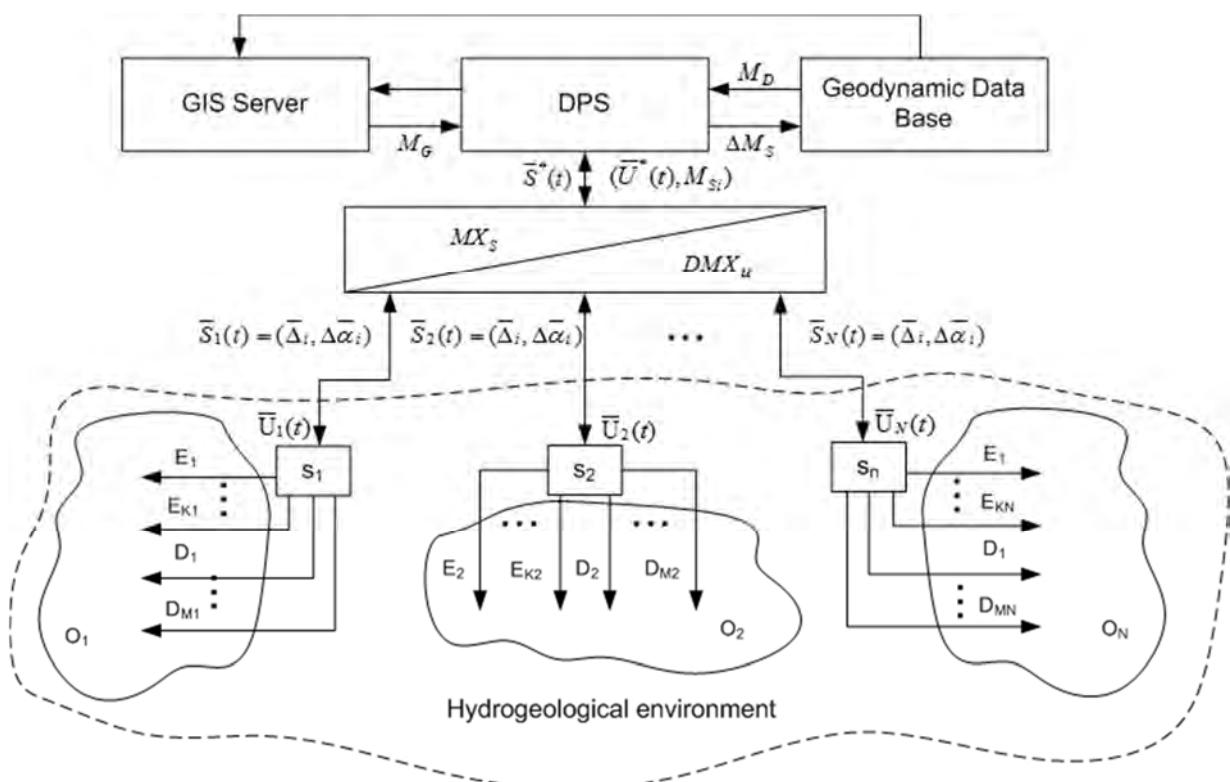


Рисунок 1 – Система пространственно–временной обработки геоэлектрических данных геодинамического контроля

Инициализация системы пространственно–временной обработки геоэлектрических данных геодинамического контроля осуществляется на основании формирования вектора модельных параметров M_S для зоны контроля гидрологической среды (Hydro geological environment). При этом данные модельные параметры определяются на основе предварительных геологоразведочных данных в соответствии с базой геодинамических моделей (Geodynamic Data Base) M_D и данных ГИС – сервера (GIS Server) M_G :

$$\mathbf{M}_S = F_m(\mathbf{M}_D, \mathbf{M}_G). \quad (1)$$

На основе данных ГИС определяются точки геодинамического контроля (объекты геодинамического контроля) O_i и производится декомпозиция модельных параметров M_S по модельным параметрам объектов M_{Si} :

$$\mathbf{M}_S \rightarrow (\mathbf{M}_{S1}, \mathbf{M}_{S2}, \dots, \mathbf{M}_{SN}), \quad (2)$$

где N – общее количество объектов контроля.

При этом формируются сигналы управления начальной установкой и позиционированием измерительных геоэлектрических систем:

$$\bar{\mathbf{U}}_i(t_0) = F_U(\mathbf{M}_{Si}, \bar{\mathbf{U}}^*(t_0)), \quad (3)$$

где F_U – формирующий функционал начального позиционирования по вектору управления $\bar{\mathbf{U}}^*$ системой пространственно–временной обработки данных геодинамического контроля в момент запуска $t=t_0$.

В дальнейшем измерительные геоэлектрические системы функционируют непосредственно в полуавтоматическом режиме по следующему алгоритму:

$$\bar{\mathbf{U}}_i(t) = \bar{\mathbf{U}}_i(t_0) + \Delta U(\mathbf{M}_{Si}, \Delta \bar{\alpha}_i) + F_U(\Delta \mathbf{M}_{Si}, \bar{\mathbf{U}}^*(t)), \quad (4)$$

где $\Delta U(M_{Si}, \Delta \bar{\alpha}_i)$ – текущее управление позиционированием электроустановкой по вектору геодинамических вариаций $\Delta \bar{\alpha}_i$;

ΔM_{Si} – коррекция модели.

Процессы информационной обработки в точках геодинамического контроля O_i строятся в соответствии с базовыми принципами решения обратной задачи геодинамического контроля [9]:

$$(\mathbf{M}_{Si}, \Delta \bar{\alpha}_i, \mathbf{E}_i) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{D}_i), \quad (5)$$

где D_i – наблюдаемый вектор данных;

$\mathbf{E}_i = \Psi(\bar{\mathbf{U}}_i(t), \mathbf{M}_{Si})$ – параметры источника зондирующего поля, определяемые заданной моделью и сигналом управления;

A^{-1} – оператор обратной задачи.

Следует отметить, что геоэлектрические данные всегда регистрируются с шумом, определяемым, как помехами в каналах измерений, так и специфичными климатическими и техногенными факторами. В этом случае решение обратной задачи заключается в определении такой геодинамических изменений $\Delta \bar{\alpha}_i$ модели объекта M_{Si} , которая формирует прогнозные данные $\tilde{\mathbf{D}}_i$, с наилучшей точностью соответствующие наблюдаемым данным:

$$\tilde{\mathbf{D}}_i = \mathbf{A}(\mathbf{M}_{Si}, \Delta \bar{\alpha}_i), \quad \|\mathbf{D}_i - \tilde{\mathbf{D}}_i\|_{\mathbf{L}_2}^2 = \bar{\alpha}_i \rightarrow \min, \quad (10)$$

где A – оператор прямой задачи.

Назначение и принцип работы виртуального мультиплексора (MX_S, DMX_U) заключается в согласовании потоков геодинамических данных $\bar{S}^* = ((\bar{\alpha}_i, \Delta \bar{\alpha}_i) \ i = \overline{1, N})$ и сигналов управления системой пространственно–временной обработки данных геодинамического контроля с модулем обработки (DPS).

При использовании геоэлектрических методов контроля в качестве базовой модели в точках контроля используется аппроксимация передаточных функций геоэлектрического разреза эквивалентными дробно–рациональными функциями комплексного переменного $p=j\omega$, физически реализуемых дискретными электрическими цепями [10]. Для решения задач геодинамического контроля эквивалентность функций геоэлектрического разреза должна обеспечивать совпадение характеристик не на всем бесконечном диапазоне частот и времен, а только на ограниченном отрезке. Поэтому процедура декомпозиции модельных параметров в соответствии с соотношениями (1, 2) может быть представлена в виде операторного выражения для передаточной функции геоэлектрического разреза в точке контроля. Для фиксированного положения источника зондирующего сигнала $X(p)$ и точки регистрации

сигнала геодинамики объекта $Y(p)$ относительно дневной поверхности она может быть записана в виде:

$$H(p, x, y, z) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{W(p, x, y, z)}{V(p, x, y, z)} = \frac{b_0(x, y, z) + b_1(x, y, z)p + \dots + b_n(x, y, z)p^n}{a_0(x, y, z) + a_1(x, y, z)p + \dots + a_m(x, y, z)p^m}, \quad (11)$$

где $n \leq m$; $V(p, x, y, z)$ – полином Гурвица.

При изменении положения источника электромагнитного поля и точки регистрации относительно изучаемого геоэлектрического разреза изменяются действительные коэффициенты передаточной функции (11), не меняя порядка используемой при аппроксимации функции. Геодинамические вариации объектов исследования также будут выражаться в вариациях действительных коэффициентов. Поэтому для решения задачи аппроксимации всегда можно задать такой порядок функции m , который обеспечит заданную точность геодинамического приближения для любой группы моделей геоэлектрического разреза M_{Si} .

Передаточная функция (11) задает совокупность дискретных электрических цепей, определяющих геодинамическую модель геоэлектрического разреза. При использовании геоэлектрических методов контроля сред в низкочастотном диапазоне волн геодинамика отдельных выделенных объектов хорошо описывается при представлении передаточной функции в виде [11]:

$$H(j\omega, x, y, z) = \sum_{i=1}^m \varphi_i(x, y, z) A_i / (B_i + j\omega), \quad (12)$$

где коэффициенты A_i , B_i и φ_i являются функциональными зависимостями от электромагнитных и пространственных параметров сред, слагающих геоэлектрический разрез в точке контроля.

В частности, при построении системы геоэкологического контроля водоносного горизонта нецентрализованных систем водоснабжения на локальном уровне с использованием метода многочастотного вертикального электрического зондирования, передаточная функция геоэлектрического разреза при аппроксимации имеет вид [12]:

$$H(j\omega, r, h) = \frac{\rho_1(j\omega)}{2\pi} \left[\frac{1}{r^2} + 2 \frac{\rho_2(j\omega) - \rho_1(j\omega)}{(\rho_2(j\omega) + \rho_1(j\omega))(r^2 + (2h))^{3/2}} \right], \quad (13)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные комплексные сопротивления верхнего слоя геоэлектрического разреза и слоя водоносного горизонта соответственно;

h – глубина залегания водоносного горизонта;

r – расстояние между излучающим и приемным электродами.

Алгоритмы управления начальной установкой и позиционированием измерительных геоэлектрических систем, а также обработки информации базируются в соответствии с соотношениями (3,4) на следующих предположениях:

- геодинамика объекта может быть определена с достаточной степенью точности по результатам регистрации поля на N точках с координатами (x_i, y_i) ;

- количество полюсов (точек зондирования) M .

В соответствии с принципом суперпозиции в каждой i -ой точке измерения источником j создается векторный сигнал электрического поля следующего вида [13]:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{xij} &= [\psi_{ij}^x + G_j(j\omega) \sum_{k=1} \beta_{ijk}^x] I_j \exp(j\varphi_j), \\ \bar{e}_{yij} &= [\psi_{ij}^y + G_j(j\omega) \sum_{k=1} \beta_{ijk}^y] I_j \exp(j\varphi_j), \end{aligned} \quad (14)$$

где ψ_{ij}^x , ψ_{ij}^y – пространственные функции взаимного расположения источника локационного сигнала и измерительных датчиков;

β_{ijk}^x , β_{ijk}^y – пространственные функции взаимного расположения мнимого источника k , определяемого исследуемый геодинамический объект;

I_j, ϕ_j – амплитуда и фаза зондирующего сигнала.

Коэффициент передачи (контрастности) по мнимым источникам $G_j(j\omega)$ характеризует различие в электрических параметрах исследуемой неоднородности и среды.

Для обеспечения высокой чувствительности к малым геодинамическим изменениям объекта установленную систему необходимо провести начальную установку и сбалансировать по регистрируемым векторам электрического поля. Это позволит устраниТЬ из регистрируемых сигналов постоянную составляющую, определяемую начальной неточной установкой полюсов источника зондирующих сигналов и естественным рассогласованием электролокационных сигналов от исследуемого объекта.

Выделив действительные a_{ij} и мнимые b_{ij} части пространственных функций в уравнении (14), можно записать условие баланса измерительной системы при действии многополюсного зондирующего сигнала $\bar{e}_x = \bar{e}_y = 0$ и условии нормирования зондирующих воздействий по первому источнику $I_l=1, \phi_l=0$:

$$\begin{aligned} a_{l1}^x + jb_{l1}^x + \sum_{j=2}^M (a_{ij}^x + jb_{ij}^x)(I_j \cos \varphi_j + jI_j \sin \varphi_j) &= 0, \\ a_{l1}^y + jb_{l1}^y + \sum_{j=2}^M (a_{ij}^y + jb_{ij}^y)(I_j \cos \varphi_j + jI_j \sin \varphi_j) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из соотношений (15) может быть сформирована система $4N$ линейных уравнений с $2M-2$ неизвестными значениями амплитуд I_j и фаз φ_j зондирующих сигналов. Система имеет тривиальное решение при $4N=2M-2$ и условии, что определитель системы неравен нулю.

Пространственные функции в уравнениях (14), (15) могут быть определены при начальной инициализации системы методом последовательного включения зондирующих сигналов на выбранных полюсах.

Естественно, что по истечении времени геоэлектрическая измерительная система придет к дисбалансу вследствие естественных изменений в исследуемом объекте и возникнет необходимость проведения балансировки вновь. Момент балансировки определяется по некоторому критерию, который может быть задан из условий проведения геодинамического контроля и в соответствии с алгоритмом работы системы. Процедура измерения пространственных функций при инициализации системы перед балансировкой дает тренд сигнала геодинамики объекта в соответствии с соотношением (4).

Геодинамика исследуемого объекта определяется смещением фиктивных источников, которое приводит к дисбалансу измерительной системы и регистрации в ней соответствующего вектора сигнала. Смещение фиктивных источников может быть представлено моделью аддитивно–мультиплексивного класса [14]:

$$X_{jk}(t) = \Delta_{jk}^x(t)(1 + \xi_{jk}^x(t)) + X_{jk}^0(t), \quad Y_{jk}(t) = \Delta_{jk}^y(t)(1 + \xi_{jk}^y(t)) + Y_{jk}^0(t),$$

где $\Delta_{jk}^x(t), \Delta_{jk}^y(t)$ – сигнал смещения фиктивных источников с учетом температурной зависимости коэффициента контрастности;

$\Delta_{jk}^0(t), \Delta_{jk}^0(t)$ – тренд сигнала смещения;

$\xi_{jk}^x(t), \xi_{jk}^y(t)$ – случайные стационарные процессы, характеризующие действие приливных деформационных воздействий на объект.

В случае незначительных смещений фиктивных источников $\Delta_{jk}^x, \Delta_{jk}^y$ и текущей балансировки полюсов зондирующего сигнала результирующий сигнал в измерительной системе геомониторинга может быть определен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ix} &= G_l(j\omega) \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial x} \Delta_{il}^x(1 + \xi_{jk}^x) + \sum_{j=2}^M I_j \exp(j\varphi_j) G_j(j\omega) \sum_{k=1}^M \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial x} \Delta_{ijk}^x(1 + \xi_{jk}^x), \\ \dot{e}_{iy} &= G_l(j\omega) \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial y} \Delta_{il}^y(1 + \xi_{jk}^y) + \sum_{j=2}^M I_j \exp(j\varphi_j) G_j(j\omega) \sum_{k=1}^M \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial y} \Delta_{ijk}^y(1 + \xi_{jk}^y), \end{aligned} \quad (16)$$

где $i = 1, \bar{N}$.

Система уравнений (16) может быть решена с использованием регрессионных соотношений относительно функций:

$$\theta_{ijk}^x = \Delta_{ijk}^x (1 + \xi_{jk}^x) G_j(j\omega) \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial x}, \quad \theta_{ijk}^y = \Delta_{ijk}^y (1 + \xi_{jk}^y) G_j(j\omega) \frac{\partial \beta_{ijk}}{\partial y}$$

с последующим устранением приливных деформационных помех и температурной коррекцией результатов.

На рисунке 3 (а, б) приведены данные скважинных наблюдений и данные, полученные с использованием метода многочастотного вертикального электрического зондирования на двух водозаборах нецентрализованного водоснабжения в округе Муром с различным уровнем залегания первого водоносного горизонта, обработанные в соответствии с рассмотренной методикой [15].

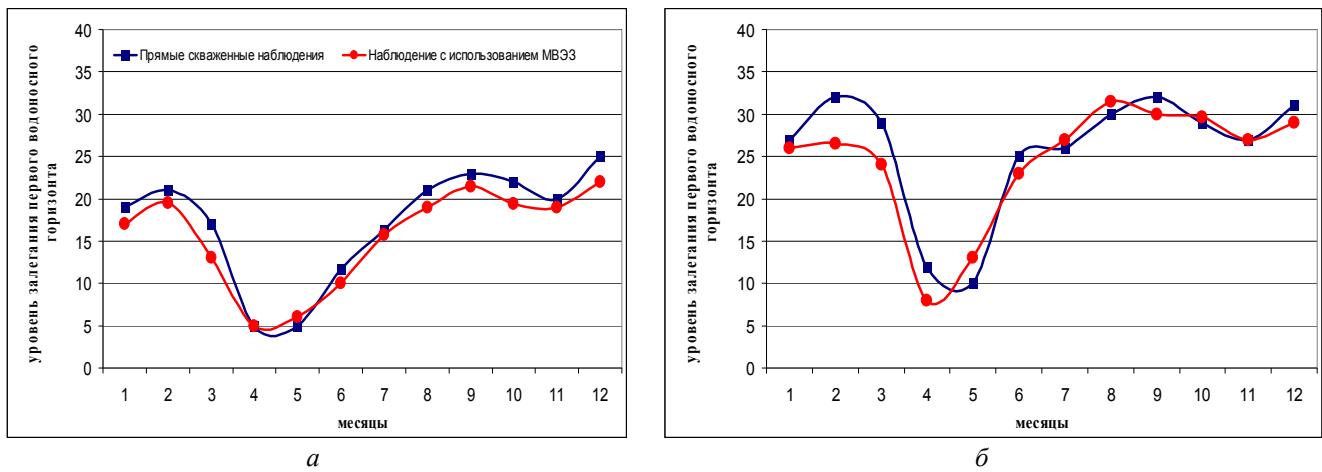


Рисунок 3 – Данные годичных наблюдений и данные расчетов для скважины 1 (а) и скважины 2 (б)

Сравнительный анализ данных показывает, что расхождение данных прямых скважинных наблюдений и измерений с применением рассмотренной методики не превышает 12%. В ряде случаев превышение ошибки определяется изменением минерализации водного горизонта.

Выводы:

1. Рассмотренный подход к организации пространственно–временной обработки геоэлектрических данных в системах автоматизированного геодинамического контроля позволяет объединить методическое, алгоритмическое, программно–техническое и информационное сопровождение процессов сбора и обработки геодинамической информации на локально выделенных объектах контроля ПТС в единое целое.

2. Предложенный метод позиционирования и работы измерительных геоэлектрических систем позволяет определять геодинамические изменения в ПТС с повышенной точностью за счет отделения трендовой составляющей сигнала и независимой обработки сигналов малых смещений фиктивных источников электролокационного поля.

3. Использование полученных соотношений, упрощает проведение геодинамической оценки вариаций отдельных выделяемых объектов исследования на основе анализа модельных изменений коэффициентов в передаточной функции геоэлектрического разреза.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ «14-08-31570 – мол_а».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Епишин, В.К. Теоретические основы инженерной геологии: Соц. – экон. аспекты / В.К. Епишин, В.Т. Трофимов, Е.М. Сергеев. Под ред. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 259 с.

2. Волкова, Е.Н. Геоэлектрический мониторинг. Методы, способы и средства. / Е.Н. Волкова, А.Н. Камшилин // Материалы Международной конференции «Эффективная и безопасная добыча угля на базе современных достижений геомеханики». – М.: Наука, 1996. – С. 35–39.
3. Sharapov, R.V. Geodynamic monitoring in area of nuclear power plant./ R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 492. – pp. 556 – 560.
4. Sharapov, R.V. Monitoring of karst-suffusion formation in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2013. – pp. 810–813.
5. Гамбурцев, А.Г. Атлас временных вариаций природных процессов. Порядок и хаос в литосфере и других сферах / А.Г. Гамбурцев, С.И. Александров, А.С. Беляков и др. – М.: ОИФЗ РАН, 1994. – 176 с.
6. Арнольд, В.И. Теория катастроф. / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1990. – 128 с.
7. Каuffman, A.A. Введение в теорию геофизических методов. Гравитационные, электрические и магнитные поля. / A.A. Каuffman. – М.: Недра, 1997. – 520 с.
8. Константинов, И.С. Организация систем автоматизированного электромагнитного контроля геодинамических объектов / И.С. Константинов, О.Р. Кузичкин // Информационные системы и технологии. – 2008. – № 4. – С. 13–16.
9. Жданов, М.С. Теория обратных задач и регуляризация в геофизике. / М.С. Жданов. – М.: Научный мир, 2007. – 712 с.
10. Bykov, A. Approximation of equivalent transfer function of the geoelectric section in geodynamic inspection / A.Bykov, O. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2014. – pp. 615–622.
11. Kuzichkin, O. Spectral processing of the spatial data at geoelectric monitoring / O. Kuzichkin, N. Chaykovskay // International Conference on Multimedia Technology, IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China. – pp. 765–768.
12. Романов, Р.В. Геоэкологический контроль водоносного горизонта в нецентрализованной системе водоснабжения на локальном уровне. / Р.В. Романов, О.Р. Кузичкин, А.В. Греченева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2015. – № 3(311). – С. 137–142.
13. Кузичкин, О.Р. Алгоритмы обработки данных в многополюсных электролокационных системах / О.Р. Кузичкин // Радиотехника. – 2007. – № 6.– С. 119–122.
14. Kuzichkin, O.R. SPATIO-temporal processing of electromagnetic signals in the systems of the geodynamic forecasting / O.R. Kuzichkin, N.V. Dorofeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2015. – № 2(5). – pp. 47 – 476.
15. Romanov, R.V. Geoecological Control of the Aquifer in the Decentralized Water Supply Systems of the Local Level / R.V. Romanov, O. R. Kuzichkin, A.V. Tsaplev // The 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – 2015. – pp. 42–46.

Романов Роман Вячеславович

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых» (МИ (филиал) ВлГУ)
Аспирант кафедры управление и контроль в
технических системах
г. Муром, ул. Орловская, 23
E-mail: romanov.roman.5@yandex.ru

Дорофеев Николай Викторович

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых» (МИ (филиал) ВлГУ)
Кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Управление и контроль в технических
системах»
г. Муром, ул. Орловская, 23
E-mail: dorofeevnv@yandex.ru

Кузичкин Олег Рудольфович

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых» (МИ (филиал) ВлГУ)
Доктор технических наук, профессор кафедры
управление и контроль в технических системах
г. Муром, ул. Орловская, 23
E-mail: electron@mivlguru.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

Приокский государственный университет (ФГБОУ ВО
«ПГУ») г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Приборостроение, метрология и
сертификация»
г Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: asms-orel@mail.ru

R. V. ROMANOV, N. V. DOROFEEV, O. R. KUZICHKIN, K. V. PODMASTERYEV

**SPACE – TIME PROCESSING OF GEOFIELD CONTROL
OF GEODYNAMIC DATA**

*In this paper the approach to space-time processing of geoelectric data in computer-aided
geodynamic control. It allows you to combine methodical, algorithmic, software and technical and*

information support collection and processing of geodynamic information on locally selected objects control natural technical environment together. Using these relations, simplifies the evaluation of geodynamic variations allocated separate objects of study based on analysis of changes in the model coefficients in the transfer function of the geoelectric section.

Keywords: geodynamic control; geoelectric methods; transfer function; data processing; automated system.

BIBLIOGRAPHY

1. Yepishin, V.K. Teoreticheskiye osnovy inzhenernoy geologii: Sots. – ekon. aspekty / V.K. Yepishin, V.T. Trofimov, Ye.M. Sergeyev. Pod red. Ye.M. Sergeyeva. – M.: Nedra, 1985. – 259 s.
2. Volkova, Ye.N. Geoelektricheskiy monitoring. Metody, sposoby i sredstva. / Ye.N. Volkova, A.N. Kamshilin // Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Effektivnaya i bezopasnaya dobycha uglya na baze sovremennykh dostizheniy geomekhaniki». – M.: Nauka, 1996. – S. 35–39.
3. Sharapov, R.V. Geodynamic monitoring in area of nuclear power plant./ R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 492. – pp. 556 – 560.
4. Sharapov, R.V. Monitoring of karst-suffusion formation in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2013. – pp. 810–813.
5. Gamburtsev, A.G. Atlas vremennykh variatsiy prirodnykh protsessov. Poryadok i khaos v litosfere i drugikh sfерах / A.G. Gamburtsev, S.I. Aleksandrov, A.S. Belyakov i dr. – M.: OIFZ RAN, 1994. – 176 s.
6. Arnold, V.I. Teoriya katastrof. / V.I. Arnold. – M.: Nauka, 1990. – 128 s.
7. Kaufman, A.A. Vvedeniye v teoriyu geofizicheskikh metodov. Gravitatsionnye, elektricheskiye i magnitnye polya. / A.A. Kaufman. – M.: Nedra, 1997. – 520 s.
8. Konstantinov, I.S. Organizatsiya sistem avtomatizirovannogo elektromagnitnogo kontrolya geodinamicheskikh obyektorov / I.S. Konstantinov, O.R. Kuzichkin // Informatsionnye sistemy i tekhnologii. – 2008. – № 4. – S. 13–16.
9. Zhdanov, M.S. Teoriya obratnykh zadach i reguljaryzatsiya v geofizike. / M.S. Zhdanov. – M.: Nauchnyy mir, 2007. – 712 s.
10. Bykov, A. Approximation of equivalent transfer function of the geoelectric section in geodynamic inspection / A.Bykov, O. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2014. – pp. 615–622.
11. Kuzichkin, O. Spectral processing of the spatial data at geoelectric monitoring / O. Kuzichkin, N. Chaykovskay // International Conference on Multimedia Technology, IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China. – pp. 765–768.
12. Romanov, R.V. Geoekologicheskiy kontrol vodonosnogo gorizonta v netsentralizovannoy sisteme vodosnabzheniya na lokalnom urovne. / R.V. Romanov, O.R. Kuzichkin, A.V. Grecheneva // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 3(311). – S. 137–142.
13. Kuzichkin, O.R. Algoritmy obrabotki dannykh v mnogopolyusnykh elektrolokatsionnykh sistemakh / O.R. Kuzichkin // Radiotekhnika. – 2007. – № 6.– S. 119–122.
14. Kuzichkin, O.R. SPATIO-temporal processing of electromagnetic signals in the systems of the geodynamic forecasting / O.R. Kuzichkin, N.V. Dorofeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2015. – № 2(5). – pp. 47 – 476.
15. Romanov, R.V. Geocological Control of the Aquifer in the Decentralized Water Supply Systems of the Local Level / R.V. Romanov, O. R. Kuzichkin, A.V. Tsaplev // The 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – 2015. – pp. 42–46.

Romanov Roman Viacheslavovich

Murom Institute (branch) of VPO «Vladimir State University A.G. and N.G. Stoletovs» (MI (branch) of Vladimir State University)
Ph.D. student of the Department of management and control in technical systems
Murom, Orlovskaya str, 23
E-mail: romanov.roman.5@yandex.ru

Kuzichkin Oleg Rudolfovich

Murom Institute (branch) of VPO «Vladimir State University A.G. and N.G. Stoletovs» (MI (branch) of Vladimir State University)
Doctor of Technical Sciences, professor of management and control in technical systems
Murom, Orlovskaya str, 23
E-mail: dorofeevnv@yandex.ru

Dorofeev Nicolai Victorovich

Murom Institute (branch) of VPO «Vladimir State University A.G. and N.G. Stoletovs» (MI (branch) of Vladimir State University)
Ph.D., assistant professor, Head of Department in the management and control of engineering systems
Murom, Orlovskaya str, 23
E-mail: dorofeevnv@yandex.ru

Podmasteriyev Konstantin Valentinovich

VPO «PSU» Prioksky State University, Orel
Doctor of Technical Sciences, professor, Head of Department of «Instrument making, metrology and certification»
Orel Naugorskoe Highway, 29
E-mail: asms-orel@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

• Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

• Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

• В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

• Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтипов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« «). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

• Структура статьи:

УДК:

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ по центру без абзацного отступа;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** по центру без абзацного отступа;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;
Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** по центру без абзацного отступа, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

• Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

• Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

• Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 дп. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

• Рисунки с подрисуточной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unpk.ru.

Плата за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

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) 54–15–19, 55–55–24, +7(906)6639898, 41–98–48, 41–98–03

www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 26.12.2015 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,69.
Тираж 600 экз.
Заказ №166/15П2

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.