

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАШИН И ПРИБОРОВ

Под редакцией доктора технических наук, профессора В. М. Мусалимова

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
МЕХАТРОНИКА	
Гедько П. Ю., Смирнов А. Б., Пугачев С. И., Рытов Е. Ю. Исследование пьезоэлектрических актюаторов микроробота.....	7
Ноздрин М. А. , Красковский А. А., Монахов Ю. С. Системные проблемы создания устройств для сканирования подземных камер.....	15
ДИАГНОСТИКА И ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ И ПРИБОРОВ	
Ефремов Л. В. Оценка метрологической надежности приборов по результатам групповых испытаний.....	20
Мусалимов В. М., Заморуев Г. Б., Перечесова А. Д. Расчет физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропных стержней.....	24
Сычев С. В., Фадин Ю. А. Формирование рельефа поверхности при трении.....	30
Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В. Проблемы совместимости новых российских стандартов с нормами ISO.....	33
Воронцов Е. А. К вопросу об аттестации поверителей оптико-электронных средств измерений.....	38
Амвросьева А. В. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для пьезоэлектрических пластин.....	42
Биндюк В. В. Оптоэлектронный преобразователь положения сечения упругого элемента на подвижном интерфейсе.....	46
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Кузнецов А. О., Мусалимов В. М., Саенко А. П., Трамбицкий К. В. Применение алгоритмов анализа изображений для обнаружения пожаров.....	51

Мусалимов В. М., Коваленко П. П., Перепелкина С. Ю. Перечислительная классификация сигналов сканирующей зондовой микроскопии	57
Ротц Ю. А. Методика оценки динамической остроты зрения	63
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ	
Резников С. С. Метрологические аспекты имитационного моделирования процесса нарезания зубчатых колес	66
Астафьев С. А., Лысенко Д. Ю., Широков А. С. Моделирование процесса распространения лесного пожара с применением теории перколяции.....	70
Калапышина И. И. Моделирование динамики станка для обработки стекол.....	74
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>).....	78

THEMATIC ISSUE

FUNDAMENTAL PROBLEMS IN RELIABILITY AND ACCURACY OF MACHINES AND INSTRUMENTS

By Edition of V. M. Musalimov Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE	5
MECHATRONICS	
Gedko P. Yu., Smirnov A. B., Pugachev S. I., Rytov E. Yu. Study of Piezoelectric Actuators of a Microrobot	7
Nozdrin M. A., Kraskovsky A. A., Monakhov Yu. S. Systemic Problems of Scanning Device Design for Underground Cavities	15
DIAGNOSTICS AND ACCURACY OF MECHANISMS AND INSTRUMENTS	
Efremov L. V. Estimation of Instrument Metrological Reliability from Group Testing Data	20
Musalimov V. M., Zamoruev G. B., Perechesova A. D. Calculation of Physical and Mechanical Properties of Helical Anisotropic Rod Screw Elements	24
Sychev S. V., Fadin Yu. A. Formation of Surface Relief under Friction	30
Timofeev B. P., Abramchuk M. V. Problems of New Russian Standards Compatibility with the ISO Recommendations	33
Vorontsov E. A. On Certification of Officers for Verification of Optic-Electronic Measuring Tools	38
Amvrosieva A. V. Calculation of the Stress Intensity Factors for Piezoelectric Plate	42
Bindyuk V. V. An Optoelectronic Converter of Position of Cross-Section of Elastic Element on Mobile Interface	46
VISUALIZATION AND PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES	
Kuznetsov A. O., Musalimov V. M., Saenko A. P., Trambitsky K. V. Application of Image Analysis Algorithms for Fire Detection	51
Musalimov V. M., Kovalenko P. P., Perepelkina S. Yu. Enumerative Classification of Scanning Probe Microscopy Data	57
Rotz Yu. A. A Method for Dynamic Vision Acuity Assessment	63

MODELING OF PROCESSES

Reznikov S. S. Metrological Aspects of Imitation Modeling of Tooth-Wheel Cutting.....	66
Astafiev S. A., Lysenko D. Yu., Shirokov A. S. Modeling of Forest Fire Spread with the Use of Percolation Theory	70
Kalapyshina I. I. Modeling of Machine Dynamics for Machine Processing of Optical Glass.....	74
SUMMARY	79

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тематический выпуск журнала посвящен проблемам механики, мехатроники, технического зрения и обработки изображений, связанным с задачами приборостроения.

Часть публикуемых материалов отражает содержание работ научно-педагогической школы „Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и точности машин и приборов“ кафедры мехатроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Другая часть — результаты, полученные учеными ИПМаш РАН и СПбГУ в ходе выполнения научно-исследовательских работ и представленные на девятой сессии международной научной школы „Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов“, проведенной по плану президиума РАН и Минобрнауки в 2011 г.

В разделе „Мехатроника“ представлены материалы по пьезоэлектрическим приборам микропозиционирования и системам для сканирования подземных камер.

В разделе „Диагностика и точность механизмов и приборов“ представлены актуальные разработки по оценке метрологической надежности приборов и аттестации поверителей; по расчету физико-механических характеристик винтовых чувствительных элементов; исследованы проблемы формирования рельефа поверхностей при трении.

В разделе „Визуализация и обработка сигналов и изображений“ представлена оригинальная классификация сигналов на базе перечислительной комбинаторики, а также приведен алгоритм захвата видеоряда пожара с целью прогноза его распространения.

В разделе „Моделирование процессов“ описаны модели процесса распространения пожаров, динамики станка для обработки стекол и процесса нарезания зубчатых колес.

Все работы представляют интерес как для научных сотрудников, так и для преподавателей, аспирантов и студентов.

*Профессор кафедры мехатроники
Санкт-Петербургского национального исследовательского
университета информационных технологий, механики и оптики,
доктор технических наук В. М. МУСАЛИМОВ*

PREFACE

The thematic issue of the journal is devoted to issues of mechanics, mechatronics, technical vision, and image processing, relating to instrument making problems.

A part of publications represents the works carried out by scientific-pedagogical school “Fundamental and applied problems in reliability and accuracy of machines and instruments” at Department of Mechatronics, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. The other part of the papers presents results of scientific researches carried out at Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, and at St. Petersburg State Polytechnical University, and presented at the IX Session of International Scientific School “Fundamental and applied problems in reliability and accuracy of machines and mechanisms” scheduled by Presidium of RAS and Ministry of education and science in 2011.

Section “Mechatronics” includes papers related to piezoelectric instruments for micro-positioning and to systems for underground cavities scanning.

Section “Diagnostics and accuracy of mechanisms and instruments” presents modern results in metrological reliability of instruments and certification of verification officers, calculations of physical and mechanical properties of screw elements and the problems of surface relief formation under friction.

In publications included in Section “Visualization and processing of signals and images” an original classification of signals on the base of enumerative combinatorial analysis is proposed, and a work on forest fire spread forecasting on the base of the fire TV images is presented.

In Section “Modeling of processes” several models are described, including model of forest fire spread, dynamic model for optical glass processing machine, and imitation model of tooth-wheel cutting.

All the papers are of interest for scientists as well as for lecturers, post-graduate and undergraduate students.

*V. M. Musalimov
Doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Mechatronics
St. Petersburg National Research University
of Information Technologies, Mechanics and Optics*

П. Ю. ГЕДЬКО, А. Б. СМИРНОВ, С. И. ПУГАЧЕВ, Е. Ю. РЫТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТЮАТОРОВ МИКРОРОБОТА

Исследованы трубчатые пьезоактюаторы микроробота, изготовленного на базе сферического шарнира, имеющего параллельную кинематику. Выявлен эффект вращения шара при несимметричности пьезоактюатора, работающего на ультразвуковых резонансных частотах; рассчитаны параметры движения шара. Рассмотрена технология изготовления пьезоактюаторов, показано преимущество использования ультразвукового формообразования пьезотрубок.

Ключевые слова: трубчатый пьезоактюатор, микроробот, шар, гармонические колебания, несимметричность, ультразвуковое формообразование пьезотрубок, сферический шарнир.

Введение. В области приборостроения последнее десятилетие характеризуется высоким интересом к созданию миниатюрных высокоточных исполнительных механизмов. Это связано, в первую очередь, с возросшими требованиями к размерам приводов и требованиями по надежности и точности выполнения движений.

В миниатюрных исполнительных устройствах (МИУ) используются различные физические эффекты для преобразования электрической энергии в механическую. Благодаря современному уровню техники в приводах МИУ возможно использовать большой спектр физических эффектов. Вследствие совершенствования пьезокерамических материалов по совокупности параметров пьезоэлектрические приводы микроперемещений в настоящее время являются одними из самых востребованных. Пьезоэлектрические МИУ имеют ряд неоспоримых преимуществ перед другими приводами: высокие удельные силовые характеристики, малые значения электрических токов и потерь, высокая надежность и технологичность изготовления в серийном производстве, радиационная, химическая и температурная стойкость.

В настоящее время в СПбГПУ разрабатывается микроробот с тремя степенями подвижности на базе сферического шарнира (рис. 1). В качестве привода используется трубчатый пьезоактюатор размером $\varnothing 14 \times \varnothing 10 \times 29$ мм, изготовленный из пьезокерамики ЦТС-19, который позволяет вращать шар в трех плоскостях. Для миниатюрных роботов совершенствуется также пьезоэлектрический схват с микропозиционированием и включением датчиков положения.

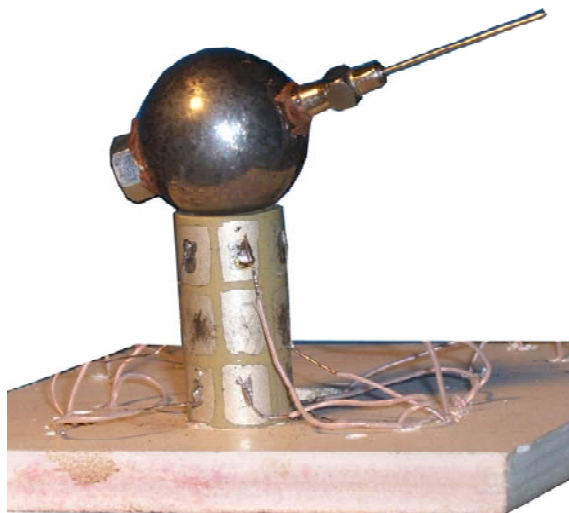


Рис. 1

Микроробот со сферическим шарниром — это система с параллельной кинематикой, использующая силу трения. Сферический шарнир микроробота представляет собой шар, установленный на опору — пьезокерамическую трубку (трубчатый пьезоактуатор), которая является приводным элементом. Рабочий орган (схват) в такой системе крепится непосредственно на поверхности шара, усилие с пьезопривода на шар передается за счет силы трения. Поскольку поверхность шара однородна (кроме места крепления рабочего органа), то зона действия рабочего органа практически совпадает со сферой. Таким образом, можно получать углы сервиса манипулятора почти 360° по трем координатам, что является хорошим показателем. Сферический шарнир позволяет изменять усилие прижима шара к опорам при помощи электромагнита, что повышает нагрузочную способность микроробота.

Направление движения задается выбором электрода пьезотрубки, на который подается гармоническое напряжение на резонансной частоте. Вращение шара обусловлено разнотолщинностью пьезотрубки, поэтому при подаче напряжения на один электрод возникает несколько составляющих силы, действующей через поверхность, контактирующую с шаром, они передаются посредством силы трения, приводя последний в движение.

Для движения шара используются резонансные режимы при возбуждении изгибно-крутильных колебаний сложной формы, которые осуществляются за счет подачи гармонического напряжения на различные электроды пьезотрубки. В частности, для вращения вокруг вертикальной оси в одном направлении напряжение подается на один электрод, расположенный в центральной части образующей поверхности; для вращения в противоположную сторону напряжение подается на противоположный электрод. При конечно-элементном моделировании вынужденных колебаний на резонансной частоте 34 кГц была определена амплитуда колебаний порядка 1,2 мкм [1, 2] при действующем значении гармонического напряжения 300 В. Крутильная составляющая колебаний возникает за счет переменного по длине трубки эксцентриситета внутренней цилиндрической поверхности относительно внешней.

Экспериментальные исследования показали, что скорость вращения сферы относительно вертикальной оси линейно зависит от подаваемого напряжения. В этом случае движение начинается только при напряжении порядка 120 В, после 340 В скорость остается постоянной (рис. 2). Этот факт можно объяснить тем, что при напряжении до 120 В амплитуды колебаний торца в вертикальном направлении меньше суммарной высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей шара и пьезотрубки.

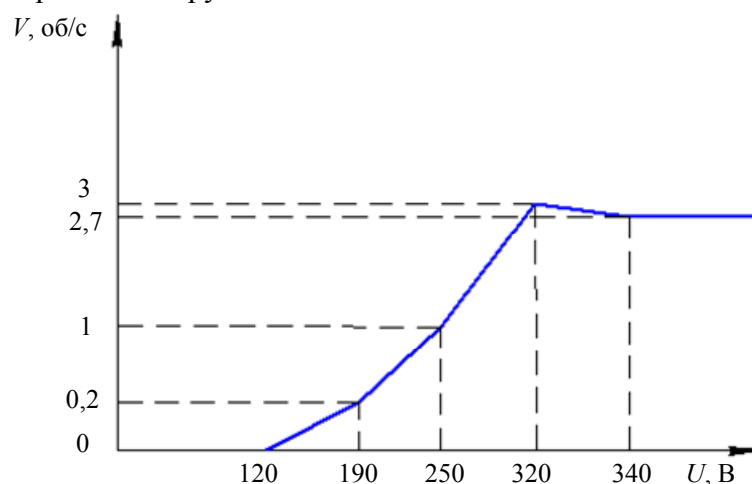


Рис. 2

При напряжении свыше 340 В действуют два фактора: нелинейность пьезоэффекта и интенсивное проскальзывание в обе стороны из-за инертности шара, что приводит к ограничению максимальной скорости.

Аналитическое исследование пьезоактюатора, взаимодействующего с шаром. Цель настоящего исследования — оценить деформации и траектории движения торца пьезотрубки, взаимодействующего с шаром, при подаче квазипостоянного (т.е. медленно меняющегося) и гармонического напряжения на электроды. Допущения: толщина стенок трубки $h_p \ll L_p R_1$, где L_p — длина пьезотрубки (или длина потенциального электрода), R_1 — внешний радиус пьезотрубки.

При подаче напряжения U размеры пьезотрубки изменяются согласно обратному пьезоэффекту:

$$S_1 = S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3, \quad (1)$$

где S_1 — деформация, S_{11}^E — податливость, T_1 — механическое напряжение, d_{31} — пьезомодуль, E_3 — напряженность электрического поля.

При отсутствии внешних воздействий и при $U = \text{const}$ имеем $T_1 = 0$, тогда удлинение пьезотрубки в осевом направлении

$$\xi = d_{31} \frac{U}{h_p} L_p. \quad (2)$$

В последующих расчетах применим метод эквивалентных механических нагрузок, суть которого состоит в замене электромеханической схемы на механическую, т.е. найдем внешнюю силу F_n , при которой пьезотрубка удлинится так же, как и при подаче электрического напряжения U :

$$\xi = \frac{F_n}{\Omega_p} S_{11}^E L_p, \quad (3)$$

где Ω_p — площадь поперечного сечения пьезотрубки.

Приравняв (2) и (3), получим

$$\frac{d_{31} U}{h_p} L_p = \frac{F_n S_{11}^E L_p}{\Omega_p},$$

откуда эквивалентная сила

$$F_n = d_{31} \frac{\Omega_p}{h_p} \frac{U}{S_{11}^E}. \quad (4)$$

Эквивалентная сила F_n приложена к свободным торцам и вызывает то же удлинение, что и напряжение U .

Рассмотренная схема нагружения не изменится, если сосредоточенную силу F_n представить как распределенную f_n , приложенную по периметру средней линии пьезотрубки:

$$f_n = \frac{F_n}{2\pi R_{\text{ср}}},$$

где $R_{\text{ср}} = \frac{R_1 + R_2}{2}$, R_2 — внутренний радиус пьезотрубки, тогда

$$f_n = \frac{d_{31} \Omega_p U}{2\pi R_{\text{ср}} h_p S_{11}^E}. \quad (5)$$

Если потенциальный электрод занимает не всю кольцевую поверхность пьезотрубки, а только ее часть, то распределенная сила будет действовать на секторе с углом φ (рис. 3).

Таким образом, сосредоточенная сила, действующая в продольном направлении

$$F_{n\phi} = f_n \phi R_{cp}. \quad (6)$$

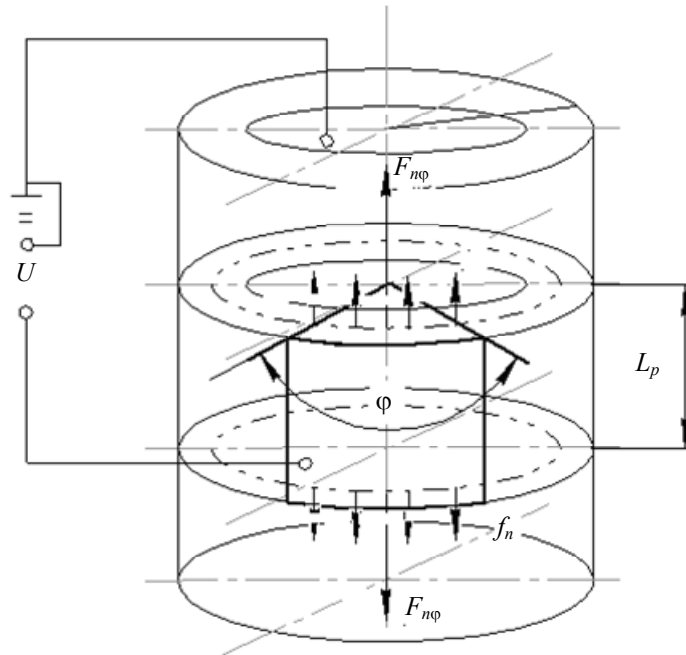


Рис. 3

Как было сказано выше, экспериментально установлено, что при подаче гармонического напряжения на одной из резонансных частот на электроде, расположенном в средней части пьезотрубки, наблюдалось устойчивое и управляемое вращение сферы в ту или иную сторону. Чтобы понять физическую сущность выявленного эффекта, рассмотрим формы колебаний пьезотрубки. Форма изгибных колебаний на первой собственной частоте для свободной пьезотрубки приведена на рис. 4, а, для пьезотрубки, закрепленной с одного торца, на рис. 4, б.

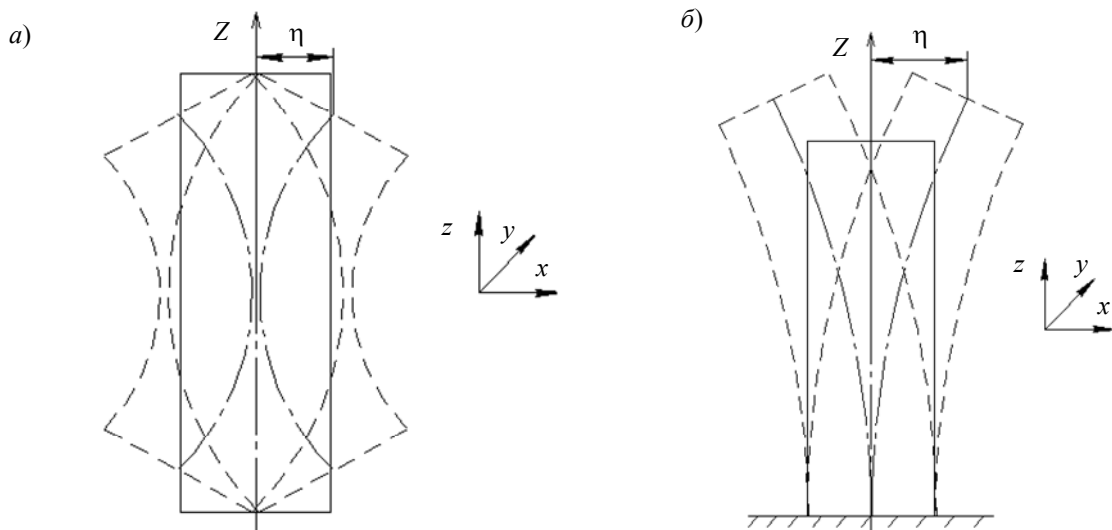


Рис. 4

Если пьезотрубка симметрична, т.е. внутренняя и внешняя цилиндрическая поверхности соосны, то в обоих случаях колебания торца трубки в проекции на плоскость XU будут происходить только в одном направлении.

Если пьезотрубка несимметрична (в частном случае имеет на одном конце несоосность с эксцентриситетом), то при возбуждении изгибных колебаний могут возникнуть и крутильные колебания (рис. 5).

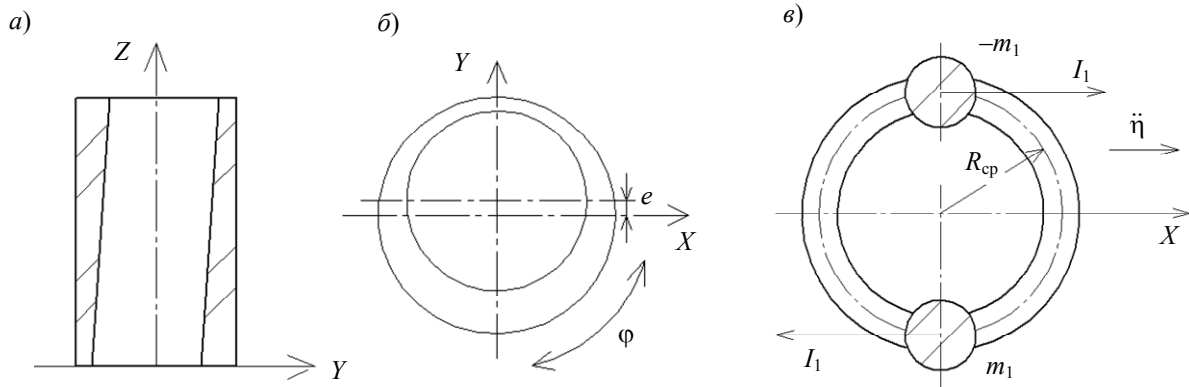


Рис. 5

Для упрощения расчетов, не изменяя физического смысла эффекта, несимметричную пьезотрубку можно представить как симметричную, но с закрепленной на торце дополнительной m_1 и отрицательной массой $-m_1$ на противоположной стороне торца (причем m_1 будет пропорциональна эксцентриситету e).

В этом случае при возбуждении изгибных колебаний в плоскости ZX будут возникать силы инерции I_1 , которые создадут крутящий момент (рис. 5, в)

$$M_{кр} = -2I_1 R_{cp}, \tag{7}$$

где $I_1 = m_1 \ddot{\eta}_1$ — сила инерции, η_1 — изгибные колебания торца трубки в направлении оси X .

Для упрощения математической модели вращения шара под действием вибраций пьезотрубки, не изменяя физической сущности процесса колебаний, будем рассматривать колебательный процесс при действии только двух сосредоточенных гармонических сил, действующих в противоположные стороны (рис. 3). Приложим на оси Z пьезотрубки в точках O_1 и O_2 по две пары сил $F_{ny} - F_{ny} = 0$ (рис. 6, а). В этом случае появятся эквивалентные моменты сил

$$M_3 = F_{n\phi} R_{cp} \tag{8}$$

и силы $F_{n\phi}$, действующие в точках O_1 и O_2 (рис. 6, б).

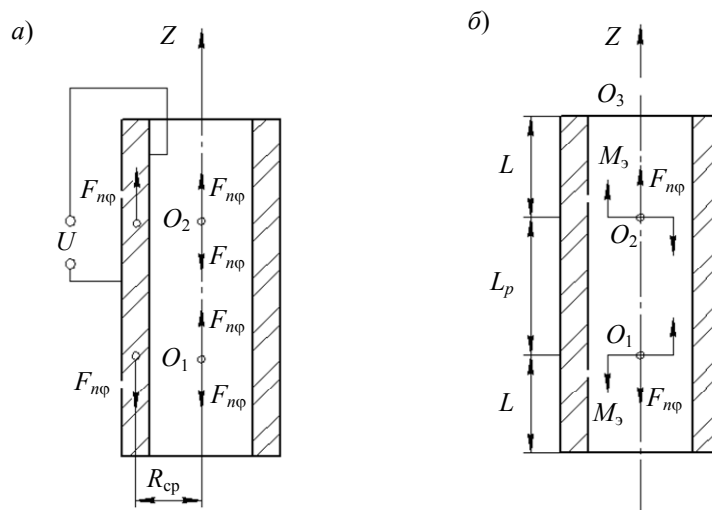


Рис. 6

Таким образом, торцы трубки будут подвергаться действию двух факторов: растягивающему (сжимающему) усилию оси Z и изгибающему моменту в плоскости ZX .

Рассмотрим случай, когда нижний торец закреплен. Тогда под действием момента M_3 угол поворота сечения в точке O_2

$$\theta_2 = \frac{S_{11}^E}{J} M_3 L_p,$$

где $J = \frac{\pi(R_1^4 - R_2^4)}{2^6}$ — момент инерции сечения пьезотрубки.

Перемещение точки O_2 в направлении оси X будет следующим:

$$\eta_2 = \frac{S_{11}^E}{2J} M_3 L_p^2,$$

а перемещение точки O_3 в том же направлении:

$$\eta_1 = \eta_2 + \theta_2 L = \frac{S_{11}^E}{J} M_3 L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \quad (9)$$

(если пьезотрубка не закреплена, перемещение уменьшается примерно в два раза).

При подаче гармонического напряжения $U = U_m \cos \omega t$ на потенциальный электрод с учетом (2):

$$F_{n\phi}(t) = F_{n\phi} \cos \omega t,$$

где из (8) и (9) имеем

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{S_{11}^E}{J} F_{n\phi} R_{cp} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \cos \omega t, \\ \ddot{\eta}_1 &= -\frac{S_{11}^E}{J} F_{n\phi} R_{cp} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \omega^2 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (10)$$

Перейдем теперь к определению угла закручивания ψ торца пьезотрубки относительно другого торца:

$$\psi_1 = \frac{M_k (L_p + 2L)}{GJ_k},$$

где $G = \frac{1}{S_{11}^E 2(1+\mu)}$ — модуль сдвига, μ — коэффициент Пуассона, $J_k = 2J$ — полярный момент инерции.

С учетом (7) и (10) имеем:

$$\psi_1(t) = -\frac{4m_1 R_{cp}^2 (S_{11}^E)^2 (1+\mu) F_{n\phi} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2}{J^2} \omega^2 \cos \omega t. \quad (11)$$

Угловая колебательная скорость

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{4m_1 R_{cp}^2 (S_{11}^E)^2 (1+\mu) F_{n\phi} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2}{J^2} \omega^3 \sin \omega t,$$

а с учетом (5) и (6) получим

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{2m_1 R_{cp}^2 S_{11}^E (1+\mu) L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2 d_{31} \Omega_p \phi U}{\pi h_p J^2} \omega^3 \sin \omega t. \quad (12)$$

Из последнего выражения следует, что угловая колебательная скорость $\dot{\psi}_1$ точек на поверхности торца зависит от пьезомодуля, массы, характеризующей эксцентриситет пьезотрубки, угла сектора потенциального электрода φ , куба частоты колебаний и квадрата длины пьезотрубки, угловая колебательная скорость $\dot{\psi}_1$ обратно пропорциональна средней толщине пьезотрубки и квадрату момента инерции сечения. Угол φ может иметь максимальное значение $\varphi_{\max} = \pi$, так как при дальнейшем его увеличении момент M_φ будет уменьшаться.

Кроме угловых качательных движений вокруг оси пьезотрубки и поперечных колебаний вдоль оси X точки торца пьезотрубки совершают продольные колебания вдоль оси Z . Это связано с тем, что сила $F_{\eta\varphi}$ действует вдоль оси Z и приводит к растяжению-сжатию оси трубки. Исходя из (4) имеем

$$\xi_1 = \frac{F_{\eta\varphi} S_{11}^E L_p}{\Omega_p} \cos \omega t \quad (13)$$

при гармоническом напряжении U .

Таким образом, траектории движения точек торца пьезотрубки имеют три составляющие ξ_1 , ψ_1 , η_1 .

На резонансной частоте для оценки амплитуд колебаний в формулах (11)—(13) выражения необходимо умножить на механическую добротность пьезокерамики Q_M . Для более точных расчетов амплитуд вынужденных колебаний в резонансе должны быть найдены решения уравнений продольных, изгибных и крутильных колебаний трубки с использованием приведенных выше эквивалентных моментов M_φ и сил $F_{\eta\varphi}$.

Угловая скорость вращения шара $\omega_{\text{ш}}$ (рис. 7) зависит в первую очередь от значения $\dot{\psi}_1$, вычисляемого по формуле (12), однако если суммарная высота шероховатости у поверхности шара и торца пьезотрубки $h_\Sigma \geq \xi_3$, то шар не сможет вращаться. Кроме того, импульсы силы взаимодействия в точках контакта шара и пьезотрубки при вибрациях зависят от коэффициента трения $k_{\text{тр}}$, поэтому движущий момент шара

$$M_{\text{ш}} = A k_{\text{тр}} m_{\text{ш}} g R_{\text{ср}},$$

где A — коэффициент, определяемый экспериментально, $m_{\text{ш}}$ — масса шара, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Угловая скорость шара

$$\omega_{\text{ш}} = B \dot{\psi}_1,$$

где B — коэффициент сцепления (эквивалент коэффициента трения, определяемый экспериментально).

Для вращения шара в противоположную сторону необходимо подавать напряжение на электрод, находящийся на противоположной стороне. Проведенные оценочные расчеты показали возможность однонаправленного движения шара при подаче напряжения на один из электродов пьезотрубки. В сравнении с методом конечных элементов такая упрощенная модель дает погрешность не более 25—35 %.

Технология изготовления трубчатого пьезоактюатора. Особенность технологии заключается в применении ультразвукового формообразования (УЗФО) — процесса уплотнения пьезокерамического порошка в закрытой жесткой матрице при одновременном воздействии статического давления прессования и ультразвуковых колебаний (УЗК). По сравнению с промышленной технологией статического одноосного прессования УЗФО увеличивает плотность формируемой заготовки при пониженном (в 2—3 раза) статическом давлении. Кроме

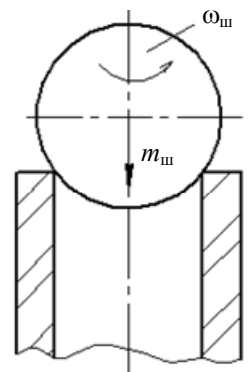


Рис. 7

того, при статическом прессовании трубчатой заготовки с увеличением ее длины и уменьшением толщины стенки возрастают потери усилия прессования на преодоление внешнего трения между порошком и стенками пресс-формы. Это приводит к повышению неравномерности распределения плотности в объеме получаемой заготовки. Поэтому для изготовления тонкостенных протяженных трубок с использованием промышленной технологии осуществляют статическое прессование заготовок со значительно увеличенной толщиной стенки. Требуемые конечные размеры изделий достигаются при механической обработке после высокотемпературного обжига. Такой способ получения трубок приводит к большому расходу пьезокерамического материала и увеличению трудоемкости их изготовления.

Воздействие ультразвука в процессе формообразования существенно уменьшает внешнее трение, поэтому применение УЗФО позволяет получать тонкостенные трубки с равномерной плотностью при значительно меньших материальных и трудовых затратах, чем при промышленной технологии.

Ультразвуковое формообразование пьезотрубок проводилось на установке, включающей гидравлический пресс усилием 50 тонн, ультразвуковой генератор УЗГЗ-4 с выходной мощностью $(4,0 \pm 20 \%)$ кВт, магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18 с акустической обратной связью и специальную пресс-форму. Колебания от преобразователя подводились к дну матрицы пресс-формы через концентратор колебаний, закрепленный в нижней траверсе пресса. Рабочая частота УЗК составляла $(18 \pm 7,5 \%)$ кГц. При отработке режимов УЗФО наилучшие результаты были достигнуты при статическом усилии прессования 40 МПа, амплитуде УЗК 10 мкм и длительности их воздействия 10 с [3].

Последующие операции процесса изготовления пьезотрубок — высокотемпературный обжиг, нанесение металлических электродов методом „вжигания“ серебрясодержащей пасты и поляризация в постоянном электрическом поле высокой напряженности — проводились по режимам, разработанным для образцов указанной геометрической формы, изготавливаемым из материала ЦТС-19.

Электрофизические параметры пьезотрубок рассчитывались по данным измерений резонансных характеристик методом резонанса-антирезонанса, а также по результатам диэлектрических измерений (см. таблицу, здесь $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ — относительная диэлектрическая проницаемость; $\text{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; $\Delta f = f_a - f_p$ — частотный промежуток, f_a и f_p — антирезонансная и резонансная частота соответственно; k_{31} и k_{33} — коэффициенты электромеханической связи; d_{31} — пьезомодуль; v_1^E — скорость звука).

Параметры	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$\text{tg} \delta, \%$	$d_{31}, 10^{-12}$ Кл/Н	$v_1^E, \text{м/с}$	k		$f_p, \text{кГц}$	$\Delta f, \text{кГц}$
					k_{31}	k_{33}		
Статическое прессование	1819	1,63	146	2921	k_{31}	0,222	48,1	1,2
					k_{33}	0,490	87,9	10,5
УЗФО	1853	1,60	151	2891	k_{31}	0,222	47,8	1,2
					k_{33}	0,512	86,7	11,4

Данные таблицы подтверждают преимущество УЗФО перед промышленной технологией. Кроме того, прессованные заготовки, получаемые способом УЗФО, имеют внешний диаметр 18, внутренний 11 мм, а при статическом прессовании — 20 и 11 мм соответственно. Таким образом, применение УЗФО наряду с улучшением электрофизических параметров пьезотрубок позволило уменьшить толщину стенки заготовки, следовательно и расход пьезокерамического материала, более чем на 20 %. Описанный выше способ позволил также изготовить асимметричные пьезотрубки с заданным эксцентриситетом для использования их в качестве пьезоактуаторов микроботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедько П. Ю., Павлов П. Л., Семенов А. С., Смирнов А. Б. Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрического актюатора микроробота // „XL Неделя науки СПбПУ“: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.
2. Смирнов А. Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микропереключений технологических машин: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 172 с.
3. Рытов Е. Ю. Ультразвуковое формообразование тонкостенных пьезокерамических цилиндров // Матер. региональной науч.-техн. конф. „Кораблестроительное образование и наука-2003“. СПб, 2003. Т. 2. С. 420—425.

Сведения об авторах

- Павел Юрьевич Гедько** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра автоматов; E-mail: choppepper@list.ru
- Аркадий Борисович Смирнов** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра автоматов; E-mail: 123smirnov@list.ru
- Сергей Иванович Пугачев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, кафедра физики; E-mail: spugachev@bk.ru
- Евгений Юрьевич Рытов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, кафедра физики; E-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 681.1, 681.2

М. А. Ноздрин, А. А. Красковский, Ю. С. Монахов

**СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КАМЕР**

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при конструировании устройств для сканирования подземных скважин, разработке привода, системы герметизации, блока электроники и навигации. Решение этих проблем позволит значительно улучшить характеристики прибора.

Ключевые слова: скважинный прибор, эхолокация, каротаж.

При создании подземных камер очень важно контролировать размеры получаемой полости, использование различного рода радарных приборов позволяет решить эту задачу. Для контроля скважин малой глубины (не более нескольких десятков метров) и протяженности возможно применение георадаров, установленных на поверхности земли. При локации скважин большой глубины и протяженности, а также в случае необходимости более точного определения размеров требуется опустить измерительный блок — скважинный прибор — непосредственно в шахту и проводить акустический каротаж подземной камеры [1].

Скважинная аппаратура для определения размеров подземных камер должна обеспечивать измерение расстояний в диапазоне 0,5—100 м с относительной погрешностью не более 1 % и азимутальную ориентацию направления измерений с погрешностью не более $\pm 3^\circ$ [2]. Скважинный блок должен выдерживать длительную эксплуатацию в специфических условиях подземных резервуаров:

- гидростатическое давление до 30 МПа;
- температура окружающей среды до $+80^\circ\text{C}$;

— агрессивная внешняя среда (солевой раствор).

Вследствие конструктивных особенностей обсадной трубы габариты прибора не должны превышать: диаметр — 80, длина — 1000 мм [3]. Для проведения измерений подземных скважин наиболее часто используются каротажные машины, оснащенные геофизическим кабелем типа КГ 3×1,5 длиной до 2000 метров.

Скважинный прибор (рис. 1) разрабатывался в течение ряда лет на кафедре мехатроники НИУ ИТМО, к настоящему времени создано несколько вариантов прибора. В предлагаемой работе рассматриваются наиболее сложные и актуальные проблемы, возникающие при создании подобных приборов.

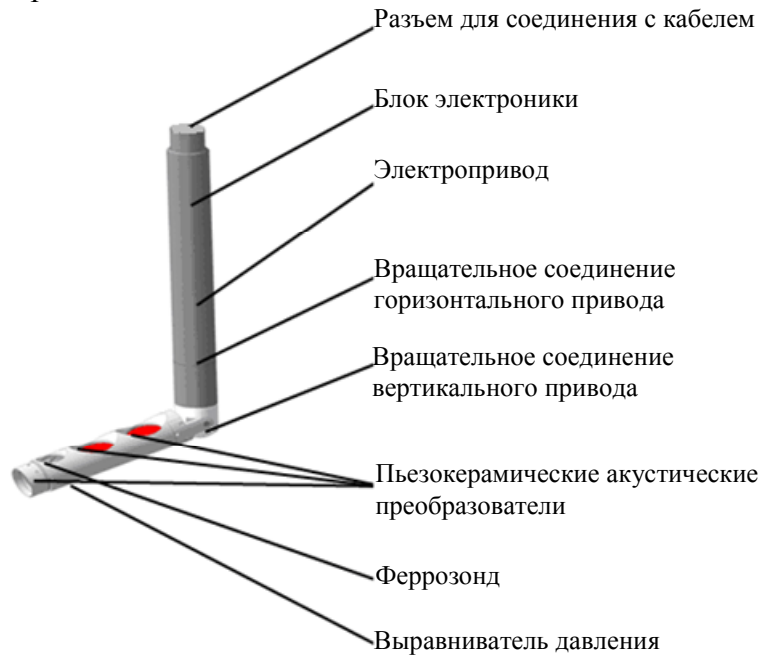


Рис. 1

В соответствии с функциональным назначением можно выделить несколько систем прибора (рис. 2), одной из наиболее сложных является система привода.



Рис. 2

Разрабатываемый прибор имеет две степени свободы. Подвижность обеспечивают два электропривода с высоким крутящим моментом. Оба привода должны обеспечивать преодоление момента трения не менее 2,5 Н·м, момент инерции нагрузки 0,017 кг·м², скорость вращения не ниже 1 об/мин и поворот на 1° не более чем за 0,2 с.

В приводе используются двигатель FL39ST38 и простой многоступенчатый передаточный механизм. Особую сложность представляет создание подвижных сочленений между корпусными деталями (см. рис. 1) [4]. Они должны обеспечивать герметичность, подвижность и выдерживать высокую разность давления между внешней и внутренней средой. Эту проблему удалось частично решить, компенсируя разность давления и применяя резиновые уплотнители, таким образом, все компоненты электропривода оказались под высоким давлением.

Система датчиков положения необходима для обеспечения обратной связи по положению электропривода с целью исключения ошибок позиционирования. Так как все движущиеся части приводов находятся в масле с высоким давлением, то и датчик должен выдерживать высокое давление. Однако выпускаемые серийно датчики не могут работать при таком давлении.

Проблемы, возникающие при разработке блока питания, обусловлены низкой мощностью электропитания, получаемого по кабелю, ограниченной сопротивлением питающей линии и питающим напряжением (не более 50 В), подаваемым на кабель. Максимальная мощность, получаемая с кабеля, составляет 6 Вт (рис. 3), в то же время потребляемая мощность — 20 Вт, что значительно превышает максимально возможную мощность электропитания (потребители электрической энергии: привод горизонтальной оси — 5 Вт; привод вертикальной оси — 5 Вт; импульсное до 17 Вт; приемопередатчик — 1,5 Вт; эхолотатор — 1 Вт; блок электроники — 1 Вт). Поэтому необходимо регулировать потребление мощности и создавать дополнительный источник питания (аккумулятор) для накопления электроэнергии и компенсации пиков потребления.

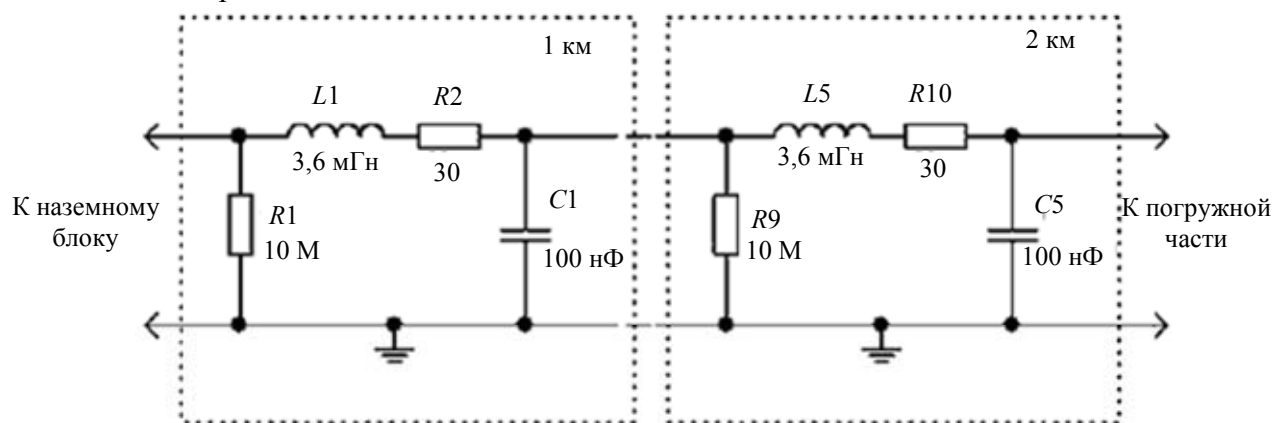


Рис. 3

Другим важным компонентом прибора является электроакустический преобразователь для измерения расстояния (эхолот), выполненный на основе пьезокерамического преобразователя. Генератор возбуждающего сигнала выполнен на основе микроконтроллера и усилителя мощности и имеет частоту 100—1000 кГц и амплитуду до 50 В. Существует несколько основных задач при разработке блока эхолота: повышение мощности ультразвукового передатчика (приведет к повышению радиуса работы прибора или к снижению уровня помех при измерении расстояния); выбор наиболее подходящих частот звукового сигнала (сигналы различных частот имеют разную степень затухания, которая обычно возрастает с увеличением частоты сигнала, погрешность, наоборот, уменьшается); возможность применения многочастотных систем (несколько частот звукового сигнала позволяют компенсировать недостатки, которые возникают при использовании одночастотной системы, однако недостатком многочастотной системы является значительное повышение габаритов прибора).

Одной из задач является обработка сигнала, полученного с усилителя, и управление его коэффициентом усиления. В настоящее время в приборе используются схема повышения коэффициента усиления с момента подачи сигнала в соответствии с общей моделью затухания ультразвукового импульса и пороговое детектирование усиленного сигнала, таким образом теряется значительная часть информации о принимаемом сигнале (например, амплитуде и форме импульса). Разрешение измерения по периоду для существующей системы составляет 16 бит и фиксирует до 256 пиков на измерение (обычное разрешение 10—20 бит, это соответствует 160—512 байт на каждое измерение и до 184 кбит — на измерения полости в одной плоскости). Применение аналого-цифровых преобразователей обеспечивает возможность дополнительного снижения помех за счет дополнительной математической обработки сигналов,

полученных с преобразователей. Эта обработка позволяет также получить дополнительную информацию о состоянии внешней среды (например, о состоянии поверхности). Применение таких фильтров требует дополнительных исследований.

Для получения данных о форме огибающей отраженных импульсов необходимо обеспечить частоту измерения не менее удвоенной частоты ультразвукового сигнала и разрешение 6—8 бит, столько же — для управления коэффициентом усиления. Длительность периода измерения 0,15 с, за это время накапливается порядка 266 кбайт, что составляет 100 Мбайт на срез. Таким образом, необходимо создавать систему предварительной обработки данных для их сжатия с минимальными потерями и увеличением пропускной способности линии связи.

Серьезной проблемой является ограничение скорости передачи данных линией связи. Так как прибор используется в основном с геофизическим кабелем типа КГ 3×1,5, для обеспечения двунаправленной связи может использоваться только одна проводящая жила емкостью порядка 100 пФ/м и сопротивлением 30 Ом на 1000 м [5] (рис. 3). Кроме того, ограничивается мощность передатчика, расположенного в скважинном приборе.

В настоящее время в приборе для передачи данных используется токовая петля с рабочими токами ±5 мА, применяется встроенный в микроконтроллер универсальный приемопередатчик последовательной шины с приемопередающим усилителем и приемником на микросхеме lm2904 с компенсацией емкостной составляющей токовых утечек. Микроконтроллер обеспечивает автоматическое определение максимально возможной скорости передачи данных через кабель (9600—11 5200 бит/с).

Система навигации необходима для определения направления полученной годограммы расстояний относительно земли. Основными характеристиками системы навигации являются точность, потребляемая мощность, габаритные размеры, также важный параметр — стоимость системы. В систему навигации входят феррозонд (1—3°) и гироскоп (механический, микромеханический либо оптоволоконный).

Создание системы навигации осложняет то, что используемые обычно системы на основе магнитных датчиков (например, феррозондов) не могут работать в условиях внешних магнитных помех. Однако часто возникает необходимость исследования состояния внешней среды как внутри обсадных труб и обшитых металлом подземных хранилищ, так и вблизи естественных магнитных аномалий. Механические гироскопы для данных целей малопригодны, так как требуют большого количества энергии и обладают большими габаритами и весом.

Высокоточный оптоволоконный гироскоп может применяться для навигации даже при полной невозможности использования феррозонда. Оптоволоконный гироскоп типа ОИУС-200 имеет погрешность 0,6 °/ч, однако его стоимость достаточно высока.

Микромеханические гироскопы также могут найти применение в системе навигации, к их недостаткам можно отнести высокий дрейф нуля (от нескольких градусов в час и выше). Сильная тепловая зависимость микромеханического гироскопа компенсируется стабильной температурой внешней среды. Для систем навигации подходят, например, гироскопы серии ADXRS от Analog Devices или L3G4200 — от STMicroelectronics [6, 7]. Их можно эффективно использовать при совмещении с феррозондом, тем самым существенно расширяя диапазон применения прибора.

Также в скважинном приборе возможно применять различные математические фильтры для уменьшения погрешности измерения, вызванной специфическим характером движения, однако для создания подобных фильтров нужны дополнительные исследования.

Для разработки нового скважинного прибора необходимо решить целый ряд проблем, в основном связанных со специфическими условиями эксплуатации. Решение данных проблем приведет к улучшению его характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноздрин М. А., Дивлет-Кильдеев М. Ф., Бурак А. Ю., Ларин М. С., Нуждинов К. А., Родин Н. В. Перспективы разработки скважинных приборов „Сканер“ // Девятая сессия междунар. науч. школы „Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов“. СПб: ИПМАШ РАН, 2009.
2. Ноздрин М. А., Мусалимов В. М., Родин Н. В. Динамический анализ уплотнительного элемента скважинного прибора // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 16—19.
3. Ивакин Б. Н., Карус Е. В. Акустический метод исследования скважин. М.: Недра, 1978.
4. [Электронный ресурс]: <<http://www.geolib.ru>>.
5. [Электронный ресурс]: <<http://www.analog.com>>.
6. [Электронный ресурс]: <<http://www.st.com>>.
7. [Электронный ресурс]: <<http://www.rashid-cable.ru>>.

Сведения об авторах

- Михаил Александрович Ноздрин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники
- Андрей Александрович Красковский** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: 684@bk.ru
- Юрий Сергеевич Монахов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; старший преподаватель; E-mail: monahovv@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

ДИАГНОСТИКА И ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ И ПРИБОРОВ

УДК 921.01

Л. В. ЕФРЕМОВ

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИБОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГРУППОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлены алгоритмы оценки вероятностных характеристик метрологической надежности по данным групповых испытаний приборов. В основе алгоритмов лежит эффективный критерий, названный „запас метрологической надежности“.

Ключевые слова: вероятность, деградация, метрологическая надежность, испытания, погрешность, прибор, циклы, тренд, корреляция.

Большинство национальных и международных документов по стандартизации в метрологии посвящено обеспечению точности (правильности и прецизионности) результатов измерений путем оценки характеристик рассеяния выборки измерений при исключенной систематической погрешности. Так поступают, например, при сличении эталонов, когда принимаются меры по устранению систематической погрешности с целью оценки истинной эталонной величины в пределах доверительных границ, определяемых по правилам теории неопределенностей.

В настоящей статье рассматривается один из способов решения не менее актуальной задачи приборостроения — прогнозирования и контроля метрологической надежности средств измерений (СИ) по результатам групповых испытаний.

В основе решения вероятностных задач лежат принципы, используемые при оценке надежности машин [1]. Отличие заключается в том, что в качестве диагностического параметра применяются систематическая погрешность измерений и зависящие от нее характеристики. В частности, наиболее информативной характеристикой можно считать так называемый запас метрологической надежности (ЗМН) [2—5]. Он представляет собой квантиль двухпараметрического нормального распределения Z вероятности недостижения β предела погрешности h_a , учитывающий в общем случае изменение как систематической $h_{сп}$, так и случайной $\sigma_{сл}$ погрешности прибора:

$$Z = \frac{h_a - h_{сп}}{\sigma_{сл}} \Rightarrow \beta = \text{snorm}(Z). \quad (1)$$

Значение h_a определяет поставщик прибора, а систематическая $h_{сп}$ и случайная $\sigma_{сл}$ погрешности рассчитываются по выборке многократных измерений погрешности h_i объемом N , получаемой в процессе поверки:

$$h_{\text{ср}} = |h_{\text{ср}}|, \quad h_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^N h_i / N, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h_{\text{ср}})^2}{N-1}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{ср}}$ — среднее значение погрешности.

В формуле (1) используются модули h_a и $h_{\text{ср}}$, для того чтобы корректно учесть их возможное зеркальное нахождение в отрицательной зоне поля разброса величин.

Указанная методика расчета ЗМН может быть использована, когда исходный вектор погрешности образуется в результате многократных измерений при индивидуальных испытаниях конкретного прибора. Обычно такая задача решается при первичных или периодических поверках с целью допуска прибора к работе. Вместе с тем для решения некоторых задач оценки ЗМН требуются испытания не одного образца, а группы однотипных приборов.

Рассмотрим предлагаемую методику решения одной задачи по результатам групповых испытаний для подтверждения типа прибора. Задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо проверить возможности сокращения объема испытаний приборов, предназначенных для работы в различных климатических условиях.

В этом случае для подтверждения типа прибора устанавливается основной режим испытаний при минимальной систематической погрешности ($h_a \approx 0$) после юстировки прибора. При этом известно, что погрешность зависит от изменения условий работы прибора (например, при повышении температуры). Требуется определить, следует ли поверять прибор при различных условиях работы или можно ограничиться испытаниями на основном режиме. При этом критерием исправности прибора является соблюдение правила трех сигм, когда для ЗМН соблюдается следующее условие

$$Z \geq Z_{\text{доп}} = 3, \quad (4)$$

где $Z_{\text{доп}}$ — допустимый уровень ЗМН.

Объектом испытаний являются m однотипных приборов (примем $m = 5$). Решение задачи разбито на два этапа. На первом задан предел погрешности $h_a = 10$. Для каждого j -го прибора выполняются многократные измерения абсолютной или относительной погрешности h_i объемом выборки N (например, $N=10$). Таким образом, получают 5 выборок измерений объемом по 10 циклов. Для каждого из них рассчитываются систематическая и случайная погрешность по формулам (2) и (3), а затем ЗМН по формуле (1). Для повышения достоверности оценки все пять векторов следует объединить в выборку объемом $mN = 5 \cdot 10 = 50$ элементов, затем рассчитываются систематическая и случайная погрешности объединенной (об) выборки. При этом можно применить формулы:

$$h_{\text{об.ср}} = |h_{\text{об.ср}}|, \quad h_{\text{об.ср}} = \sum_{j=1}^m h_{\text{ср.}j} / m, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{об.сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left[\sigma_{\text{сл}j}^2 (N-1) + N h_{\text{ср}j}^2 \right] - m N h_{\text{об.ср}}^2}{m N - 1}}. \quad (6)$$

В заключение для объединенной выборки рассчитывается ЗМН по формуле (1), который должен отвечать условию (4).

На втором этапе испытаний для жестких условий (в климатической камере) расчеты выполняются по приведенным выше формулам, но со следующими условиями. Во-первых, перед выполнением измерений приборы, испытанные на первом этапе, не должны подвергаться регулировке и юстировке. Во-вторых, для них должен быть назначен повышенный предел погрешности, например, $h_a = 16$. Однако алгоритм и программа расчета остаются без изменений и при этом должно быть проверено условие (4). Если результаты проверки этого условия на обоих этапах совпадут, то можно принять решение о выполнении проверок прибора только на основном режиме испытаний при нормальных условиях.

Для выполнения расчетов была разработана программа в редакторе MathCad. Более простая программа составлена в электронных таблицах EXCEL (см. рис. 1). Содержание расчетов в EXCEL можно пояснить на примере некоторых операторов.

	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	К	Л	М	Н	
2	Допустимый ЗМН		3		бета = 0.9987								
3													
4	Внести результаты расчета относительной погрешности в таблицу 1 для нормальных условий и табл 2 - для климатических камер												
5													
6		Пред Погр	10		табл 1			Пред Погр	16		табл 2		
7	№	1	2	3	4	5	№	1	2	3	4	5	
8	1	-2.809	-1.741	-1.205	-4.835	-1.123	1	3.867	3.309	2.615	1.266	3.703	
9	2	-1.586	-1.259	-1.176	-3.595	-0.682	2	3.994	4.073	3.648	3.811	4.323	
10	3	-1.132	-1.074	-0.861	-1.996	-0.22	3	4.272	4.859	3.791	4.073	4.455	
11	4	-0.789	-0.303	-0.408	-1.274	-0.027	4	4.841	5.968	5.007	4.158	4.537	
12	5	-0.732	0.115	0.0031	-1.026	0.27	5	5.208	6.053	5.14	4.161	5.33	
13	6	-0.201	1.122	0.149	0.019	0.301	6	5.345	6.397	5.449	5.321	6.238	
14	7	0.073	1.161	0.93	0.165	0.465	7	5.523	6.442	5.466	6.364	6.463	
15	8	0.927	1.437	1.488	0.343	0.856	8	6.714	6.819	6.103	6.675	6.634	
16	9	1.348	1.526	1.846	0.51	1.233	9	7.266	7.619	6.24	6.899	7.319	
17	10	3.653	1.642	2.103	1.285	1.697	10	11.08	8.352	8.829	8.127	8.17	
18	Сист погр	-0.1248	0.2626	0.2869	-1.0404	0.2770	Сист погр	5.8110	5.9891	5.2286	5.0855	5.7172	
19	Сл погр	1.7875	1.2859	1.2406	1.9492	0.8512	Сл погр	2.1538	1.5433	1.7097	1.9919	1.4677	
20	ЗМН	5.5246	7.5725	7.8295	4.5966	11.4229	ЗМН	4.7308	6.4867	6.3001	5.4794	7.0062	
21	ВНДПС	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	ВНДПС	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
22													
23					По всей группе приборов			АНАЛИЗ					
24													
25					Условия	Норм	Камера		Оценка нормальных условий				5
26					Пр Погр	10	16		Оценка условий с камерой				5
27					Сист погр	-0.0677	5.5663						
28					Сл погр	1.5067	1.7535		Заключение - измерять				без камер
29					ЗМН	6.5922	5.9504						
30					ВНДПС	1.0000	1.0000						

Рис. 1

Расчеты выполнены для нормальных условий в диапазоне ячеек В6:G21. Ввод чисел: ячейка D2 = $Z_{\text{доп}} = 3$, ячейка D6 = $h_a = 10$, строка С7:G7 — нумерация приборов, выборка В8:В17 — нумерация циклов, выборка С8:С17 — опытные погрешности по циклам.

Результаты вычислений для первого прибора: С18=СРЗНАЧ(С8:С17) = -0,1248 — систематическая погрешность, С19 =СТАНДОТКЛОН(С8:С17) = 1,7875 — случайная погрешность, С20 =(ABS(\$D\$6)-ABS(С18))/С19 = 5,5246 — ЗМН, С21 =НОРМСТРАСП(С20) = 1 — вероятность недостижения предельного состояния (ВНДПС).

Расчеты для жестких условий испытаний выполнены для ячеек Н25:М21 по тем же формулам.

Формулы для вычислений метрологических характеристик для объединенных выборок обоих вариантов испытаний приведены в диапазоне ячеек F25:H30 (рис. 2).

Следует обратить внимание на простой способ вычисления случайной погрешности (стандартного отклонения) для объединенных выборок путем обозначения диапазона вычислений от первой верхней до последней нижней ячейки. Расчеты в редакторе MathCad совпали с результатами расчетов в редакторе EXCEL.

В заключение результаты вычисления ЗМН сравниваются с допустимым значением по условию (4). Для этого в ячейках М26 и М27 записаны логические операторы М26=ЕСЛИ(G29>=\$D\$2;5;4) = 5 и М27=ЕСЛИ(Н29>=\$D\$2;5;4) = 5. Основное заключение

содержится в ячейке M28=ЕСЛИ(M25=M26; „без камер“; „с камерой“). Ответ „без камер“ означает, что проводить поверку приборов в жестких условиях не требуется.

Ячейки	F	G	H
25	Условия	Нормальные	Жесткие (Камера)
26	Предел Погр	=D\$6	=J\$6
27	Сист. погр	=CPЗНАЧ(C18:G18)	=CPЗНАЧ(I18:M18)
28	Случ. погр	=СТАНДОТКЛОН(C8:G17)	=СТАНДОТКЛОН(I8:M17)
29	ЗМН	=(ABS(D\$6)-ABS(G27))/G28	=(ABS(J\$6)-ABS(H27))/H28
30	ВНДПС	=НОРМСТРАСП(G29)	=НОРМСТРАСП(H29)

Рис. 2

Такой результат можно объяснить физической сущностью ЗМН. Из формулы (1) следует, что причина увеличения предела погрешности для жестких условий заключается в возникновении дополнительной систематической погрешности после испытаний в нормальных условиях без корректировки показаний прибора. Поэтому запас надежности (т.е. $h_a - h_{сп}$) не должен существенно измениться по сравнению с нормальными условиями. Это лишним раз подтверждает эффективность критерия, названного запасом метрологической надежности [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1989.
- Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 51—54.
- Ефремов Л. В. Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // Там же. № 2. С. 38—43.
- Ефремов Л. В. Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений // Там же. № 12. С. 34—40.
- Ефремов Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. СПб: Нестор-История, 2011. 200 с.

Сведения об авторе

Леонид Владимирович Ефремов — д-р техн. наук, профессор; Петербургский институт машиностроения, кафедра триботехники, Санкт-Петербург; E-mail: levlefr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

В. М. МУСАЛИМОВ, Г. Б. ЗАМОРУЕВ, А. Д. ПЕРЕЧЕСОВА

РАСЧЕТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИНТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПИРАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Представлен алгоритм расчета упругих констант винтовых элементов спирально-анизотропных стержней, основанный на методах оптимизации. Расчет производился путем минимизации функционала $f(E_1, G_1)$ на заданных интервалах коэффициента Пуассона. В качестве примера спирально-анизотропного стержня рассматривался кабель.

Ключевые слова: спирально-анизотропный стержень, интегральные упругие постоянные, кабель, методы оптимизации.

Теория спирально-анизотропных стержней. Многослойные пружины, канаты, тросы, нити представляют собой объекты механики деформируемого твердого тела, которые моделируются как спирально-анизотропные стержни (САС) [1]. На рис. 1 приведена типичная конструкция гибкого кабеля. Механические свойства винтовых составляющих этих конструкций определяются их физико-механическими характеристиками E_1, G_1, ν_1 , соотнесенными с геометрией подвижного репера ξ, η, r (рис. 1). Механические свойства самих конструкций традиционно соотнесены с геометрией стержня — осью z и радиусом r (рис. 1). При механических испытаниях САС регистрируются линейные e и угловые θ деформации при различных граничных условиях, определяющих деформированное состояние: свободное и стесненное растяжение, свободное и стесненное кручение. В работах [1, 2] представлены уравнения, связывающие внешние силы и моменты с линейными и угловыми деформациями САС:

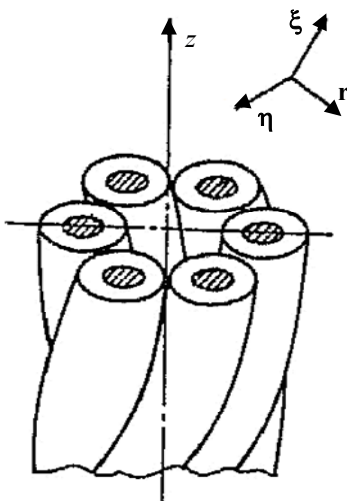


Рис. 1

Здесь при $A_{11}, A_{22}, A_{12} = A_{21}$ — соответственно модули растяжения, кручения, растяжения-кручения; E — модуль упругости САС, P — осевая нагрузка, M — скручивающий момент.

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{\pi R^2 E_1} &= A_{11} e + A_{12} \hat{\theta}; \\ \frac{M}{\pi R^3 E_1} &= A_{21} e + A_{22} \hat{\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь при $A_{11}, A_{22}, A_{12} = A_{21}$ — соответственно модули растяжения, кручения, растяжения-кручения; E — модуль упругости САС, P — осевая нагрузка, M — скручивающий момент.

Перепишем уравнения системы (1) в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{\pi R^2} &= A_{11} E_1 e + A_{12} E_1 \hat{\theta}; \\ \frac{M}{\pi R^3} &= A_{21} E_1 e + A_{22} E_1 \hat{\theta} \end{aligned} \right\}$$

и введем следующие обозначения:

$$A_{11} E_1 = \alpha_{11}, \quad A_{12} E_1 = \alpha_{12}, \quad A_{21} E_1 = \alpha_{21}, \quad A_{22} E_1 = \alpha_{22}.$$

В работах [1, 2] приведены также уравнения, связывающие экспериментально определенные модули с физико-механическими характеристиками винтовых составляющих САС:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11} &= G_1(9\phi_1 + 18\phi_2) - \frac{1}{2 - \nu_1} 9\phi_2 E_1 + E_1 - 3\phi_1 E_1; \\ \alpha_{12} &= -G_1(3\phi_1 + 12\phi_2) + \frac{1}{2 - \nu_1} 6\phi_2 E_1 + \phi_1 E_1; \\ \alpha_{22} &= G_1\left(\frac{tg^2 \alpha_0}{2} + 8\phi_2\right) - \frac{1}{2 - \nu_1} 4\phi_2 E_1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 1 - 2ctg^2 \alpha_0 \ln \sec \alpha_0; \\ \phi_2 &= \frac{1}{2} \sin^2 \alpha_0 - \phi_1. \end{aligned}$$

Соотношения (2) являются нелинейной алгебраической системой уравнений относительно интегральных упругих постоянных E_1 , G_1 , ν_1 . Целью настоящей статьи является разработка новых подходов к решению таких систем уравнений и определение физико-механических характеристик E_1 , G_1 , ν_1 , что актуально для оценки свойств элементов с микронными радиусами.

Алгоритмы решения слабообусловленных нелинейных систем алгебраических уравнений (оптимизаторы). Ранее для решения системы уравнений использовались вероятностные методы и методы минимизации специально построенного функционала [1, 2]. В настоящей работе для определения интегральных упругих постоянных САС использованы оригинальные оптимизаторы.

Оптимизируемая модель представляется вектором функций

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}),$$

где $y_i (i = \overline{1, m})$, $m \geq 1$ — функции ряда независимых факторов влияния, $x_j (j = \overline{1, n})$, $n \geq 1$.

Все функции \mathbf{y} объединяются в функционал

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m [f_i(\mathbf{x}) \mathbf{g}_i],$$

где \mathbf{g}_i — вектор весовых коэффициентов для каждой из функций.

Производные от $F(\mathbf{x})$ по \mathbf{x} формулы

$$\frac{dF(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = 2 \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{x}) \mathbf{g}_i \frac{\partial f_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ — $(m \times n)$ -матрица (матрица Якоби), а $f_i(\mathbf{x})$ — вектор функций (3).

С геометрической точки зрения функционал $F(\mathbf{x})$ является гиперповерхностью многих переменных \mathbf{x} . Эта так называемая поверхность отклика не может существовать в области отрицательных значений области $F(\mathbf{x})$ и в пределе может касаться гиперплоскости \mathbf{x} , в этом случае функционал $F(\mathbf{x})$ имеет точку с нулевым значением и, в свою очередь, $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$ является хорошо обусловленной системой уравнений. Во всех других случаях $F(\mathbf{x})$ имеет экстремум (в данной задаче — минимум) при том или ином численном (вещественном) значении $F(\mathbf{x})$.

Производная $\frac{dF(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}$ геометрически является вектором нормали к поверхности отклика (направление вектора — наружу от поверхности), его длина

$$D_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right)^2}, \quad (4)$$

Единичный вектор нормали (направляющие косинусы) определяет направление скорейшего спуска:

$$D_{nli} = \frac{\frac{\partial F(\mathbf{x})}{\partial x_i}}{D_n}.$$

Если произвести сечение поверхности отклика гиперплоскостью, параллельной \mathbf{x} , то получим замкнутую линию при $n=2$, замкнутую поверхность при $n=3$ или замкнутую гиперповерхность при $n>3$. Эти геометрические образы принято называть линиями уровня функционала $F(\mathbf{x})$. Они хорошо отображаются на плоской поверхности при $n=2$. Вектор нормали (перпендикулярный поверхности отклика) нормален и к линиям уровня в данной точке. Поскольку нормаль направлена в сторону увеличения $F(\mathbf{x})$, направляющий вектор имеет знак „минус“.

Общая стратегия поиска оптимального значения (минимума)

1. Задаются начальные значения переменных \mathbf{x} .
2. Рассчитываются значения всех исходных функций и функционала $F(\mathbf{x})$.
3. Выбирается направление движения, т.е. задается некоторый вектор $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ (лучше единичный) для движения в направлении этого вектора с шагом λ . На каждом шаге рассчитывается значение $F_1(\mathbf{x})$ и сравнивается с предыдущим значением $F_0(\mathbf{x})$:

— если $F_1(\mathbf{x}) < F_0(\mathbf{x})$, движение продолжается в выбранном направлении;

— если $F_1(\mathbf{x}) > F_0(\mathbf{x})$, движение осуществляется в обратном направлении с уменьшенным шагом ($\lambda = -\frac{\lambda}{2}$).

Это условие используется до достижения оптимума на данном шаге с требуемой точностью, таким образом $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{D}\lambda$.

После уточнения нового значения \mathbf{x} шаг считается законченным, направление движения \mathbf{D} изменяется и повторяются шаги с относительными оптимумами, пока не будет достигнуто удовлетворительное решение задачи.

Относительный оптимум на каждом шаге является точкой касания линии движения по направлению \mathbf{D} к некоторой линии уровня функционала $F(\mathbf{x})$.

Опишем широко используемые методы поиска оптимума.

Метод перебора координат — простой, в нем не применяются производные $\frac{dF(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}$.

Направление $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ выбирается совпадающим на каждом шаге с одной из осей координат гиперплоскости \mathbf{x} . Движение осуществляется с некоторым шагом вдоль произвольной координаты x_i до определения промежуточного оптимума. Затем движение осуществляется вдоль оси x_{i+1} и реализуется второй шаг, до тех пор пока не произойдет перебор всех координат \mathbf{x}

задачи. Затем следует вернуться к координате x_i и повторить все действия до достижения удовлетворительного результата.

К достоинствам метода относятся простота, отсутствие необходимости в расчете производных; к недостаткам: как правило, большое количество шагов и иногда фактическая невозможность довести решение до конца в случае сложной, сильно искривленной конфигурации линий уровня.

Метод „деформируемого симплекса“. Реализация алгоритма начинается с задания $n+1$ точки (стартовый симплекс) для гиперплоскости \mathbf{x} , что довольно трудно, с этой целью используется некоторая подпрограмма.

Затем для всех $n+1$ точек определяются значения всех функций и функционалов $F(\mathbf{x})$, далее производится оценка всех $n+1$ точек по величине $F(\mathbf{x})$, в результате определяются „худшая точка“, в которой $F(\mathbf{x})$ имеет наибольшее значение (ей присваивается номер 1), и „лучшая“ — где наименьшее (номер $n+1$).

Далее определяется вектор $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ (направление движения).

Метод аппроксимации параболой сечения поверхности отклика плоскостью, содержащей нормаль поверхности в рассматриваемой точке и перпендикулярной гиперплоскости параметров \mathbf{x} . Такое коническое сечение является параболой, и если найти константы параболы, можно одним вычислительным шагом спуститься к ее критическому значению, т.е. с той или иной точностью совершить шаг промежуточной оптимизации.

Достоинством метода является очень высокая скорость расчета, так как отсутствует необходимость „осторожного“ передвижения малыми шагами с расчетом функционала и часто производных. Надежно и быстро может быть получено решение с требуемой точностью при умеренном количестве шагов.

Чрезвычайно эффективным методом оптимизации является метод, условно называемый „Гребень“, позволяющий максимально придерживаться линии „гребня“ поверхности отклика, т.е. линии наиболее глубокой и наиболее пологой части „дна долины“ поверхности отклика. Метод использует два типа шагов и основан на геометрических свойствах поверхностей (гиперповерхностей). Производная от $F(\mathbf{x})$ по \mathbf{x} , как уже говорилось, геометрически является нормалью к поверхности (и линии уровня) и имеет определенную величину (4). Если двигаться в некотором направлении и последовательно оценивать производную $\frac{dF(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}$, можно получить множество критических значений на „гребне“ (первый тип шагов). Далее при движении по гребню оценивается величина $F(\mathbf{x})$ (второй тип шагов).

Достоинством метода является возможность решить при малом числе шагов практически любую задачу с произвольной топологией линий уровня $F(\mathbf{x})$. К недостаткам относятся большое число арифметических операций при определении производных и нормали на каждом малом шаге и, следовательно, относительно большое время работы процессора, зависящее от изначальной математической модели задачи $f(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$.

Примеры расчета. В работе в качестве модулей растяжения α_{11} , кручения α_{22} , растяжения-кручения α_{12} использованы данные систематических исследований по механике кабеля. В табл. 1 приведены характеристики двух типов кабеля КГ 3×4+1×2. В табл. 2 приведены расчетные данные для кабеля, полученные вероятностным методом [1, 2], численные значения интегральных упругих постоянных, полученные на основе детерминированного подхода [1], а также методом приведенного оригинального функционала.

Таблица 1

№	α_{11} , Па	α_{12} , Па	α_{22} , Па
1	$2,42 \cdot 10^9$	$1,80 \cdot 10^6$	$5,55 \cdot 10^5$
2	$2,20 \cdot 10^9$	$1,94 \cdot 10^6$	$4,23 \cdot 10^5$

Таблица 2

Метод	E_1 , Па		G_1 , Па		ν_1	
	1	2	1	2	1	2
Вероятностный	$2,38 \cdot 10^9$	$2,16 \cdot 10^9$	$1,66 \cdot 10^9$	$1,50 \cdot 10^9$	0,300	0,304
На основе детерминированного подхода	$2,42 \cdot 10^9$	$2,21 \cdot 10^9$	$3,53 \cdot 10^8$	$2,37 \cdot 10^8$	0,266	0,428
Приведенного функционала для различных ν_1	$2,4465 \cdot 10^9$	$2,2250 \cdot 10^9$	$7,2913 \cdot 10^8$	$6,5977 \cdot 10^8$	0,300	0,304
	$2,4462 \cdot 10^9$	$2,2260 \cdot 10^9$	$7,3056 \cdot 10^8$	$6,5450 \cdot 10^8$	0,266	0,428

На рис. 2—5 для $\nu_1=0,3$ приведены оценки, полученные с помощью алгоритмов описанных методов. В качестве исходных данных использованы параметры, указанные в строке 1 табл. 1, угол наклона к оси анизотропии упруго-эквивалентных спиралей $\alpha_0 = 15^\circ$. Рис. 2 — программа „Парабола“; 3 — „Гребень“; 4 — „Координатная“; 5 — „Симплекс“ (*a* — графическое отображение работы программы оптимизации; *b* — увеличенное графическое отображение работы программы оптимизации). Результат: $E_1=2,4465 \cdot 10^9$ Па, $G_1=7,2913 \cdot 10^8$ Па.

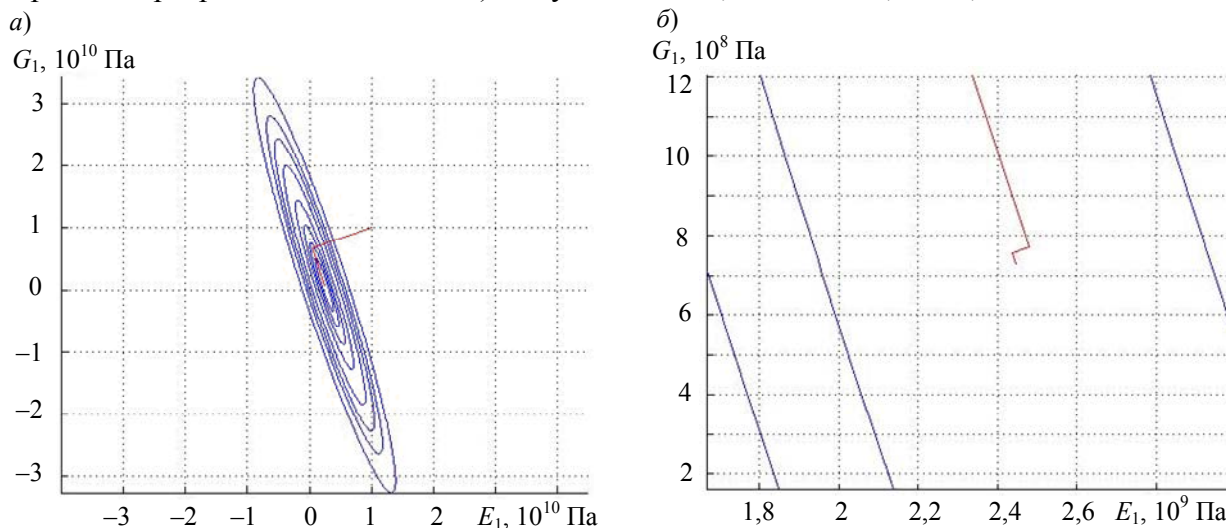


Рис. 2

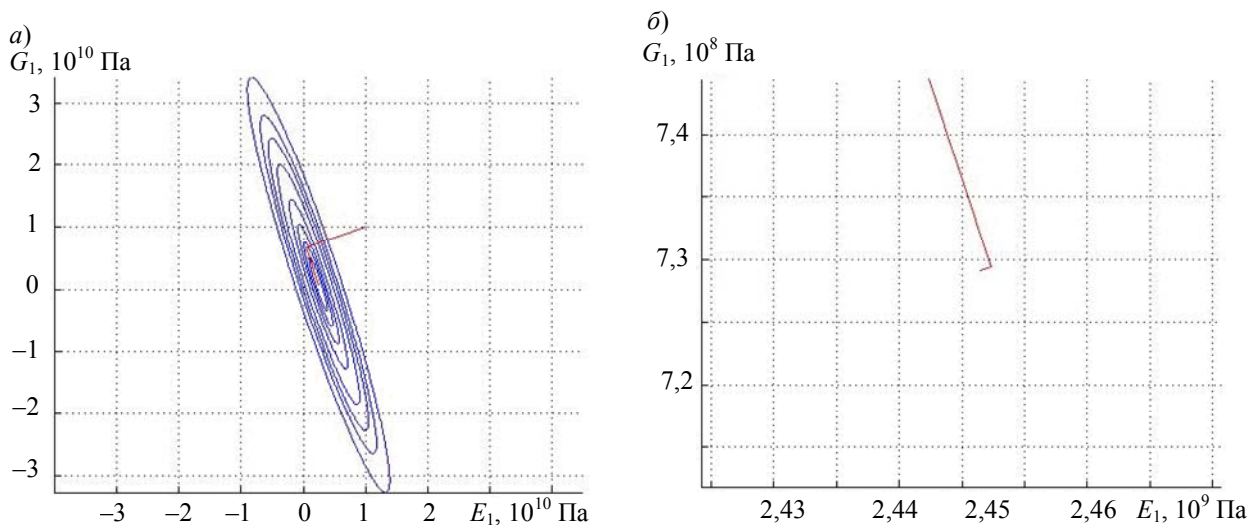


Рис. 3

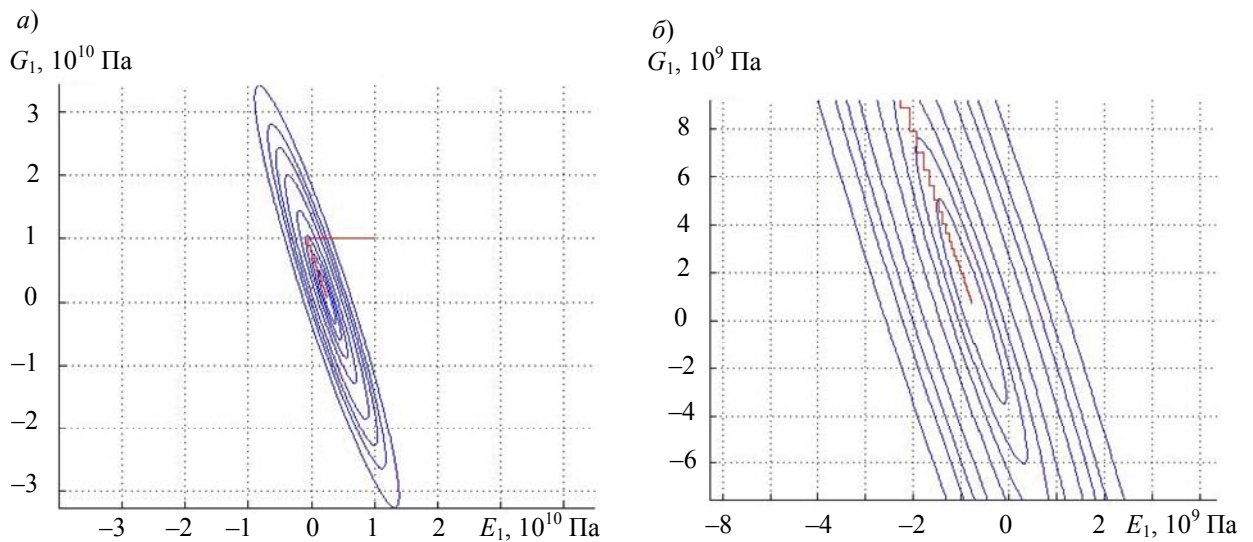


Рис. 4

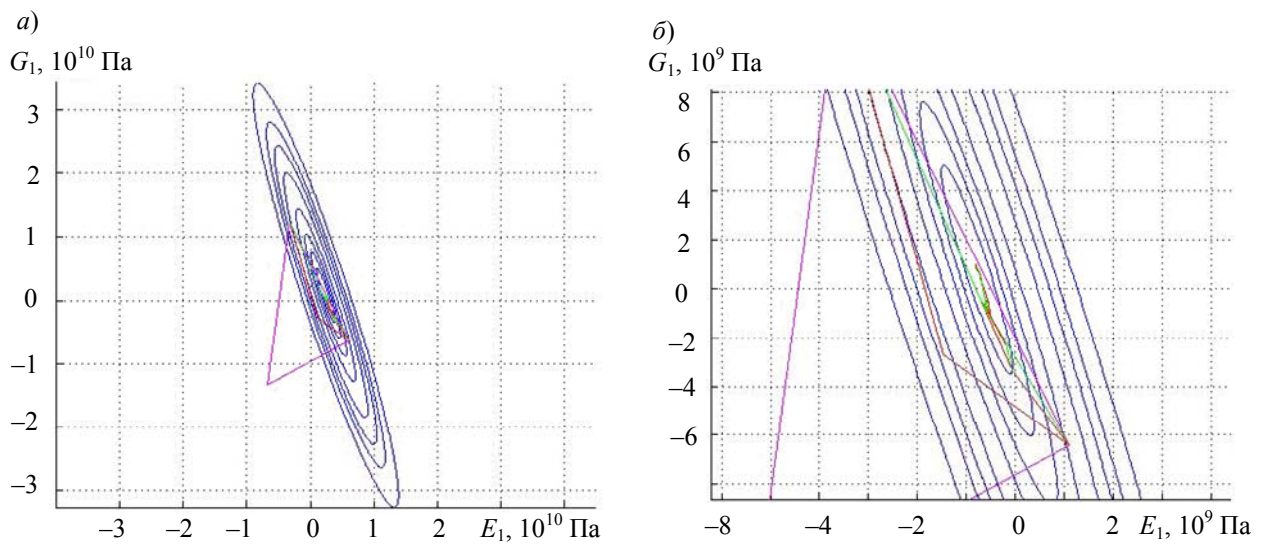


Рис. 5

Следует отметить, что с помощью оптимизаторов вычисляются все значения физико-механических характеристик E_1 , G_1 для $0 \leq \nu_1 \leq 5$, в то время как для первых двух методов приведены значения наиболее вероятных их значений. На рис. 6 показан характер изменения отношения E_1/G_1 в зависимости от функции ν_1 .

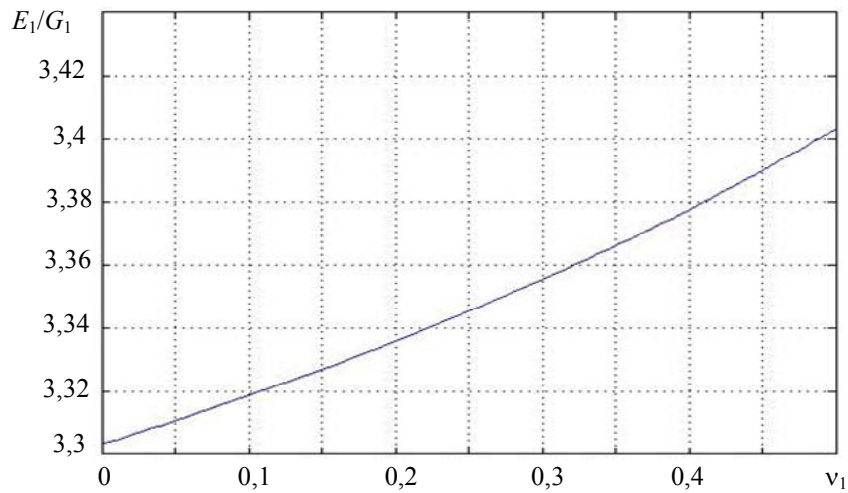


Рис. 6

Заключение. В настоящей работе развиты новые подходы к оценке физико-механических характеристик винтовых элементов САС. Показано, что предложенные методы оптимизации позволяют эффективно решать слабообусловленные нелинейные системы алгебраических уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусалимов В. М. Механика деформируемого кабеля. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 203 с.
2. Мусалимов В. М., Мокряк С. Я., Соханев Б. В., Шиянов В. Д. Определение упругих характеристик гибких кабелей на основе модели спирально-анизотропного тела // Механика композитных материалов. 1984. № 1. С. 136—141.
3. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: Мир, 1972. 241 с.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musvm@yandex.ru
- Георгий Борисович Заморуев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: georgyz09@gmail.com
- Анна Дмитриевна Перечесова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: perechesova@gmail.com

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 620.178

С. В. СЫЧЕВ, Ю. А. ФАДИН

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТРЕНИИ

В результате экспериментальных исследований начального этапа трения монокристаллов оксида алюминия установлено, что рельеф поверхности циклически изменяется, т.е. протекает амплитудно-модулированный процесс изменения шероховатости поверхностного слоя. Параметры процесса — несущая частота ω и частота модуляции Ω — могут быть получены из экспериментальных данных.

Ключевые слова: трение, износ, приработка, профиль поверхности, монокристалл сапфира, шероховатость.

Известно, что на начальной стадии трения происходят значительные изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев [1]. Этот процесс называется приработкой и имеет большое практическое значение [2, 3]. Анализ литературы показывает, что процесс приработки при сухом трении при использовании в узлах трения износостойких керамических и хрупких материалов практически не изучен [4, 5]. Этому можно найти несколько объяснений. Во-первых, процессы приработки неравновесные и быстропротекающие, во-вторых, доступ для непосредственных исследований в контактный зазор затруднен и, в-третьих, нет удобных инструментальных способов исследования.

Целью настоящей работы является детальное изучение эволюции шероховатости на начальном этапе сухого трения монокристаллов искусственного сапфира.

Материалы. В работе использовались монокристаллы сапфира, выращенные из расплава по способу Степанова с помощью формообразователей различных конфигураций [6]. Рабочие поверхности монокристаллов подготавливались так, чтобы кристаллографическая ориентация исследуемой поверхности совпадала с кристаллографическими плоскостями: $\{0001\}$ — базисной (B) и $\{01\bar{1}2\}$ — ромбоэдрической (R). Пары трения составлялись из монокристаллов с одинаковой ориентацией поверхностей трения, а именно: B — B и R — R . Неподвижный образец представлял собой пластину монокристалла лейкосапфира (20×40 мм) с поверхностью соответствующей ориентации. Подвижный образец был выращен в виде монокристалльного стержня с внешним диаметром 6 мм. Торец стержня имел соответствующую ориентацию.

Экспериментальные исследования. Испытания на трение проводились по схеме торцового трения, непрерывно в течение 5, 10, 15, 20, 25 с, каждый раз на новых поверхностях выбранных трибопар. Начальные и конечные шероховатости измерялись на профилометре TR-200 фирмы Qualitest. После трения на поверхности неподвижного образца возникали кольцевые дорожки трения. Измерения профиля проводились в радиальном направлении.

Результаты. На рис. 1 представлены результаты измерения шероховатости неподвижной поверхности монокристалла в зависимости от времени t : a — пара трения B — B , b — R — R . Анализ данных рисунка показал, что на начальной стадии трения шероховатость поверхности циклически изменяется.

Для объяснения полученных на рис. 1 результатов была предложена модель изменения во времени шероховатости в виде амплитудно-модулированного процесса:

$$R_a(t) = R_a(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где R_a — средняя начальная шероховатость, $m = \frac{R_{a \max} - R_{a \min}}{R_{a \max} + R_{a \min}}$ — коэффициент модуляции,

Ω — частота модуляции, ω — несущая частота.

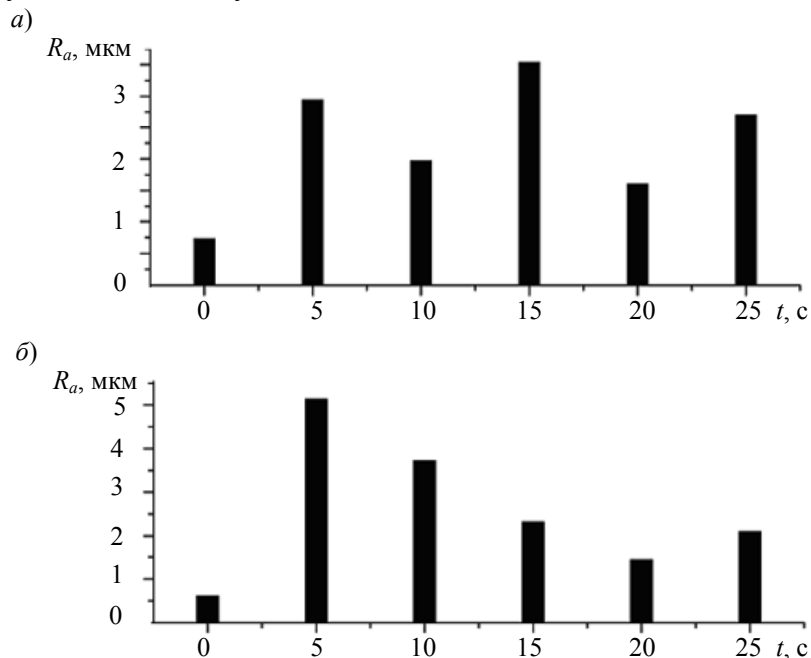


Рис. 1

Подбор параметров Ω и ω из формулы (1) под экспериментальные зависимости осуществлялся методом перебора, на рис. 2 показаны результаты (a — $\Omega=0,1$; b — $0,06$ Гц) для данных, приведенных на рис. 1, a .

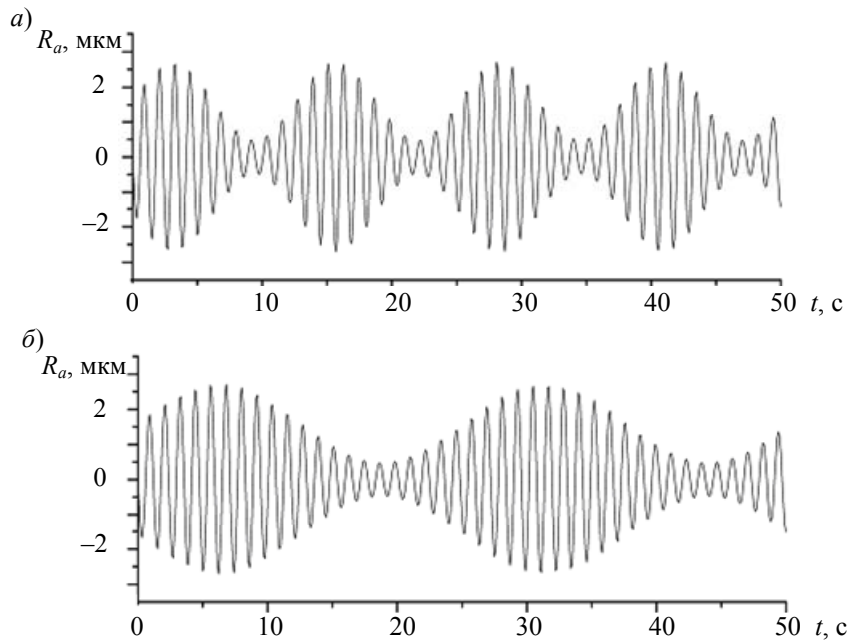


Рис. 2

Обсуждение результатов. В результате проведенной операции искусственной подгонки параметров под выбранную модель было установлено, что числовые значения параметров Ω и ω имеют вполне определенный физический смысл. Так, несущая частота ω может быть описана как частота соударений шероховатостей двух поверхностей. Эти данные могут быть определены по исходным профилограммам поверхностей трения. Профилограммы поверхности для монокристаллов сапфира дают значения расстояния между шероховатостями, попадающими на начальный участок кривой Аббота [7], в пределах 0,1—0,2 мм. С учетом скорости скольжения 0,25 м/с получаем частоту соударений 125—250 Гц, числовой подбор по формуле (1) дал значение несущей частоты в 160 Гц, порядок этой величины укладывается в приведенный интервал. Частоте модуляции Ω также может быть придан физический смысл.

Ранее было установлено, что при сухом трении наблюдаются циклические изменения различных физических свойств приповерхностных объемов [8—10]. Характерное время этих изменений лежит в пределах от единиц до десятков минут при сухом трении и скорости до 1 м/с. За это время успевает сформироваться и разрушиться тонкий поверхностный контактный слой.

Период циклических изменений свойств поверхности объекта T можно связать с частотой модуляции Ω следующим образом $\Omega = 1/T$. Оценки времени жизни слоя, полученные для поверхностей B и R монокристаллов сапфира (10 и 20 с соответственно), качественно соответствуют результатам, полученным ранее. Так, ромбоэдрические поверхности сапфира изнашиваются в 2—3 раза меньше, чем базисные [6], поэтому и время жизни поверхностных слоев должно подчиняться этим соотношениям.

В работе экспериментально изучен начальный этап сухого трения монокристаллов сапфира. Предложена модель, объясняющая циклический характер разрушения поверхности материалов при трении. Параметры модели имеют физический смысл и могут быть связаны с полученными ранее результатами по исследованию особенностей формирования и разрушения приповерхностных контактных слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00966-а) и Научной программы РАН под руководством академика И. Г. Горячевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
2. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.
3. Карасик И. И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. М.: Наука, 1978. 136 с.
4. Hsu S. M., Ming Shen. Wear prediction of ceramics // Wear. 2004. Vol. 256. P. 867—878.
5. Фадин Ю. А., Киреенко О. Ф., Кузнецова О. С., Сычев С. В. Начальная стадия контакта хрупких тел при трении // Трение и износ. 2011. Т. 32, № 3. С. 30—33.
6. Фадин Ю. А., Киреенко О. Ф., Крымов В. М., Никаноров С. П. Трибологические свойства монокристаллов оксида алюминия, полученных способом Степанова // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 32, № 10. С. 1466—1469.
7. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
8. Марченко Е. А., Непомнящий Е. Ф., Харач Г. М. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа // ДАН СССР. 1968. Т. 181, № 5. С. 1103—1104.
9. Жарин А. Л., Шпица Н. А., Фишвейн Е. И. Некоторые особенности усталостного процесса при трении скольжения // Трение и износ. 1993. Т. 14, № 4. С. 645—656.
10. Фадин Ю. А., Лексовский А. М., Гинзбург Б. М., Булатов В. П. Периодичность акустической эмиссии при сухом трении пары сталь—латунь // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 5. С. 10—13.

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Сычев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра машиноведения и деталей машин; E-mail: Sychou@yandex.ru
- Юрий Александрович Фадин** — д-р техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург; заведующий лабораторией; E-mail: fadinspb@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 621.833.15

Б. П. ТИМОФЕЕВ, М. В. АБРАМЧУК

ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТИМОСТИ НОВЫХ РОССИЙСКИХ СТАНДАРТОВ С НОРМАМИ ISO

Обоснована необходимость разработки российских стандартов на основе ГОСТ 1643-81 в соответствии с рекомендациями ISO. Проведено сравнение стандарта ISO 1328 с ГОСТ 21098-82 и ГОСТ 1643-81, рассмотрены некоторые достоинства и недостатки последнего.

Ключевые слова: зубчатые колеса, зубчатые передачи, точность, многозвенный механизм, стандарты, ГОСТ 1643-81, ISO 1328, ГОСТ 21098-82.

Введение. Нормирование точности зубчатых колес, передач и многозвенных механизмов сопряжено с рядом проблем, в частности, в одном документе (ГОСТ 1643-81 [1] «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски») нормирована точность и зубчатых колес, и передач. Однако в ЕСКД содержится фундаментальное положение о том, что допуски и предельные отклонения на чертежах даются относительно приведенной на чертеже детали оси [2], т.е. применительно к зубчатым колесам это — базовая ось. Допуски и предельные отклонения

переприсваиваются в таблицу на чертеже колеса без всяких изменений. В отличие от [1], в ГОСТ 21098-82 указано, что при переходе к рабочим осям следует учесть монтажные погрешности, к которым, безусловно, относятся погрешности незубчатых элементов передачи: подшипников, валов, корпуса, соединений, втулок и т.д., и это правильный подход.

За прошедшее с последнего издания стандарта [1] время подход к нормированию точности зубчатых колес и передач изменился. Отечественный производитель, желающий реализовывать свою продукцию на мировом рынке, особенно в связи с присоединением России к ВТО, должен учитывать, по крайней мере, минимальные требования, приведенные в стандартах ISO. Тем не менее отказаться полностью от отечественных стандартов невозможно. Следует пересмотреть российскую нормативную документацию с учетом современных реалий, дополнить отечественный опыт лучшими зарубежными наработками, что может быть достигнуто без коренной ломки системы производства и контроля зубчатых колес и передач, но с учетом необходимости повышения квалификации научно-технического персонала.

Сравнение рекомендаций ISO с нормами ГОСТ 1643-81. Рекомендации ISO 1328, в отличие от ГОСТ 1643-81, разбиты на две части (ISO 1328-1:1995 „Определения и допустимые значения отклонений соответствующих боковых поверхностей зацепляющихся зубьев“ [3] и ISO 1328-2:1997 „Определения и допустимые значения отклонений, относящихся к радиальным составным отклонениям (колебаниям измерительного межосевого расстояния), и информация по износу (радиальному биению)“ [4]). Обе части имеют общий заголовок „*Передачи зубчатые цилиндрические — Система точности по ISO*“.

Стандарт издан двумя отдельными частями, поэтому им неудобно пользоваться. В каждой из частей используется своя система рядов параметров. В первой части [3, с. 7—8]:

— делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1000 / 1600 / 2500 / 4000 / 6000 / 8000 / 10 000 мм;

— модуль зубьев: 0,5 / 2 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм;

— ширина зубчатого венца: 4 / 10 / 20 / 40 / 80 / 160 / 250 / 400 / 650 / 1000 мм.

Во второй части представлены ряды для колебаний измерительного межосевого расстояния [4, с. 5]:

— делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1000 мм;

— модуль зубьев: 0,2 / 0,5 / 0,8 / 1 / 1,5 / 2,5 / 4 / 6 / 10 мм;

а также для радиального биения [4, с. 8]:

— делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1000 / 1600 / 2500 / 4000 / 6000 / 8000 / 10 000 мм;

— модуль зубьев: 0,5 / 2,0 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм.

Такой подход усложняет нормирование точности.

В отличие от ISO, ГОСТ 1643-81 регламентирует эвольвентные цилиндрические зубчатые колеса и зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления с прямозубыми, косозубыми и шевронными зубчатыми колесами с диаметром делительной окружности до 6300 мм, шириной зубчатого венца или полушеврона до 1250 мм, модулем зубьев от 1 до 55 мм [1, с. 1]. Нам представляется разумным проработать вопрос об увеличении диапазона величин диаметра делительной окружности до значений не менее приведенных в первой части ISO 1328, т.е. до 10 000 мм, и модуля зубьев — до 70 мм.

Таким образом, видно, что диапазон делительных диаметров d и модулей m существенно ограничен сверху, скорее всего, вследствие отсутствия приборов для измерения зубчатых колес больших размеров.

При разработке нового стандарта представляется логичным установить нижнюю границу величины модуля зубьев — 0,5 мм. Вместе с тем не ставится под сомнение необходимость в стандартизации зубчатых колес с модулем зубьев менее 0,5 мм, однако параметры точности таких колес должны устанавливаться стандартами предприятий (СТП) в соответствии с их

назначением. Разработка стандартов является важнейшей задачей специализированных предприятий. При этом, отражая специфику производства и использования таких передач, СТД не должны противоречить ни государственным стандартам, ни рекомендациям ISO.

В рекомендациях ISO система точности разделена в соответствии с разделением самого ISO на 2 части, и в них не введены такие понятия, как норма кинематической точности, плавности и контакта зубьев.

В каждой части ISO 1328 установлена своя структура системы точности для зубчатых колес. В первой части [3, с. 7] отмечается, что система точности по ISO включает в себя 13 степеней точности, где 0 — самая высокая, а 12 — самая низкая. Во второй части [4, с. 1] говорится, что система точности радиальных измерений имеет иные диапазоны степеней, чем ISO 1328-1. Ряды диаметра и модуля для радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) и радиального биения также другие. Система точности радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) включает в себя 9 степеней точности, где 4 — самая высокая степень, а 12 — самая низкая. В стандарте [3, с. 3] сказано, что определение степени точности с помощью измерения радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния), согласно этой части ISO 1328, не подразумевает, что погрешности элементов (например, шага, профиля, хода винтовой линии зуба и т.д. из ISO 1328-1) будут соответствовать той же степени (точности). Положения в документах относительно требуемой точности должны включать ссылку на соответствующий стандарт, ISO 1328-1 или ISO 1328-2.

Также в ISO отсутствуют виды сопряжений зубчатых колес в передаче, виды допуска на боковой зазор, классы отклонения межосевого расстояния, нормы бокового зазора. Боковой зазор упоминается в первой части ISO 1328 [3, с. 17] среди требований для проверки степени точности кинематической погрешности.

ГОСТ 1643-81 устанавливает 12 степеней точности зубчатых колес и передач от 1 до 12 — в порядке убывания точности. Для каждой степени точности зубчатых колес и передач устанавливаются нормы кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колес в передаче. Нормы точности стандарта ГОСТ 1643-81 включают в себя поэлементные показатели (объединенные в комплексы) и комплексные показатели точности зубчатых колес и передач [5, с. 326]. Допускается комбинирование норм кинематической точности, норм плавности работы и норм контакта зубьев зубчатых колес и передач разных степеней точности.

Такая структура ГОСТ усложняет работу с нормативным документом. При разработке нового ГОСТ следует сохранить возможность комбинирования норм кинематической точности, норм плавности работы и норм контакта зубьев зубчатых колес и передач разных степеней точности. Это позволяет конструктору передачи (механизма) указать приоритет той или иной нормы для данной передачи. Так, для отсчетных передач важна кинематическая точность, для скоростных — плавность, для силовых — нормы контакта и т.д., такой подход позволяет фиксировать внимание технолога на обеспечении тех или иных норм. Последняя задача актуальна, поскольку станкостроение в области зубчатых передач отстало от мирового уровня меньше, чем практика зубообработки [6—8].

Обязательное нормирование кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в ГОСТ, с одной стороны, существенно расширяет возможности конструктора и позволяет использовать более индивидуальный подход к группе передач, но с другой — не отражает того, что все эти качества формируются в едином технологическом процессе, и потому производственные возможности комбинирования норм точности ничтожны. Недаром параметры классы отклонения межосевого расстояния и несовпадение видов сопряжения и допуска на боковой зазор используются на практике чрезвычайно редко.

В рекомендациях ISO подход к контролю бокового зазора отличается от ГОСТ. В ISO 1328 он рассматривается в отдельном стандарте: техническом отчете [9, 10]. Рекомендации стандарта ISO/TR 10064-2 не связывают величину зазора и ее нормирование ни с видом сопряжения, ни с видом допуска на боковой зазор, ни с классом отклонения межосевого расстояния. Однако требуется обязательный учет погрешности изготовления и монтажа незубчатых деталей передачи (корпуса, валов, подшипников и т.д.), условий работы зубчатой передачи, а также вида смазки, ее загрязнения, наличия неметаллических частей колес и других элементов.

Нормирование бокового зазора в ГОСТ 1643–81 производится следующим образом. В стандарте установлены шесть видов сопряжения: A, B, C, D, E, H и восемь видов допуска T_{jn} на боковой зазор: x, y, z, a, b, c, d, h . Видам сопряжения H и E соответствует вид допуска на боковой зазор h ; D, C, B и A — d, c, b и a соответственно. Возможно менять соответствие вида сопряжения колес и допуска на боковой зазор. Также могут быть использованы допуски x, y, z , которые не связаны с определенным видом сопряжения, т.е. предусматривается возможное увеличение допуска T_{jn} . В ГОСТ установлены 6 классов отклонений межосевого расстояния (по сути неподвижного звена передачи), обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI. Гарантированный боковой зазор $j_{n \min}$ в каждом сопряжении обеспечивается при соблюдении отклонений межосевого расстояния (для сопряжений H и E — II класса, а для D, C, B и A — III, IV, V и VI соответственно). Помимо того, допускается изменять соответствие между видом сопряжения и классом отклонения межосевого расстояния. Требования к боковому зазору задаются видом сопряжения по нормам бокового зазора.

Наличие видов сопряжения в ГОСТ 1643-81 создает значительную вариативность в нормировании бокового зазора, это позволяет детализировать рекомендации ISO. Использование видов сопряжения расширяет возможности конструктора в части назначения гарантированного бокового зазора $j_{n \min}$ и допуска на него T_{jn} . Представляется разумным отказаться от такого понятия, как класс отклонения межосевого расстояния, поскольку эта норма переопределяет боковой зазор в зубчатой передаче.

При разработке нового стандарта необходимо рассчитывать параметры бокового зазора исходя из условий эксплуатации [11]. Необходима стандартизация методики расчета бокового зазора на основании проведения экспериментальных работ ввиду недостаточного объема имеющихся рекомендаций в настоящее время.

Стандарт ISO 1328 нормирует точность зубчатых колес, содержит их определение и требования к измерительному зубчатому колесу.

Нормы стандарта ГОСТ 1643-81 устанавливаются для зубчатых передач, зубчатых пар и зубчатых колес, причем в таблицах стандарта четко указано, какая норма относится к колесам, какая — к передачам. В ISO 1328 понятие зубчатой пары отсутствует.

Уровень производства в отечественном редукторостроении не позволит в ближайшем будущем исключить из объектов стандартизации „зубчатую пару“ и ввести „отдельно взятое колесо“. Уровень производства в нашей стране не позволяет производить отдельные колеса, не подобранные в пары. Более того, специалисты не рекомендуют производство отдельно взятого колеса. В редукторе быстрее всего из строя выходит шестерня быстроходной передачи. Вместе с тем заменить только шестерню не представляется возможным, так как парное колесо также в определенной стадии изношено.

Основные требования к созданию стандарта параметров точности передач и многозвенных зубчатых механизмов. В ГОСТ 21098-82 [12] нет четкого определения „объект взаимозаменяемости“, что необходимо учесть при разработке нового стандарта зубчатой передачи [13]. Таким образом, предполагается изменить базовый ГОСТ 1643-81 и другие, основанные на тех же принципах, стандарты, так как нормы этих документов относятся к колесам на базовых осях и проставляются на чертежах зубчатых и червячных колес, червяков и реек.

Однако в переработанном ГОСТ следует сохранить принцип: чтобы получить параметры точности передач, необходимо добавить к параметрам точности колес монтажные погрешности, т.е. сумму погрешностей всех элементов передачи.

Необходимо привести типовые схемы зубчатых передач в более полном объеме, чем это сделано для цилиндрических передач [14, с. 144]. Предполагается придать стандарту, вводимому вместо ГОСТ 21098-82, расчетный характер. При этом табличные показатели норм точности и бокового зазора будут относиться к отдельным типовым схемам передач. Требование одинаковой степени точности по каждому отдельному показателю для шестерни и колеса передачи становится в таком случае излишним. Необходимо учесть существенные недостатки ГОСТ 21098-82, основные из них:

1) весьма приближенно охарактеризован расчет осевых и радиальных составляющих монтажных погрешностей, не учтены разногласия относительно монтажных погрешностей в типовых видах соединений;

2) при суммировании погрешностей элементов передач в передачу и передач — в многозвенный механизм не учитываются результаты работ по изученным функциям плотности распределения вероятности различных видов погрешности;

3) в стандарте используется неверный подход к вычислению коэффициентов фазовой компенсации.

Выводы. На данный момент актуальна задача разработки новых стандартов вместо ГОСТ 1643-81 и его аналогов на зубчатые и червячные колеса, червяки, рейки и зубчатые пары, которые отражали бы развитие теории и практики зубчатых передач за истекший период, не противоречили рекомендациям ISO и вместе с тем по возможности сохраняли положительные стороны стандарта ГОСТ 1643-81.

Разработка нового отечественного стандарта, учитывающего рекомендации ISO, в том числе и по нормированию бокового зазора в стандарте ISO/TR 10064-2, при использовании положительных сторон существующих стандартов необходима для интеграции в мировую систему производства и торговли для создания конкурентоспособной продукции.

Не менее актуальна переработка ГОСТ 21098-82 в стандарт на зубчатые передачи, имеющий расчетный характер, при обязательном использовании всех наработок в области теории вероятности и математической статистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: Изд-во стандартов, 1989. 68 с.
2. ГОСТ 2.109–73. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. М.: Изд-во стандартов, 1974. 29 с.
3. ISO 1328-1:1995, Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Pt. 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
4. ISO 1328-2:1997, Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Pt. 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
5. Тищенко О. Ф., Валединский А. С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1977. 357 с.
6. Тимофеев Б. П. Стандартизация параметров точности зубчатых колес и передач // Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. СПб: БГТУ, 2010. С. 10—14.
7. Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В. Сравнение табличных значений параметров точности зубчатых колес и передач в стандартах: ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 // Теория механизмов и машин. 2007. Т. 5, № 1(9) С. 60—70.
8. Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В. Формирование отечественных стандартов качества зубчатых колес и передач, не противоречащих рекомендациям ISO // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 48. С. 172—178.

9. ISO/TR 10064–2:1996. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Pt. 2. Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash.
10. ISO/TR 10064–2:1996/Cor.1:2001. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Pt. 2. Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash. Technical Corrigendum 1.
11. Тимофеев Б. П., Шалобаев Е. В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колес и передач // Вестн. машиностроения. 1990. № 12. С. 34—36.
12. ГОСТ 21098–82. Цепи кинематические. Методы расчета точности. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.
13. Вульфсон И. И., Ерихов М. Л., Козловский М. З. и др. Механика машин / Под ред. Г. А. Смирнова. М.: Высш. школа, 1996. 511 с.
14. Кудрявцев В. Н., Кузьмин И. С., Филипенков А. Л. Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник. СПб: Политехника, 1993. 448 с.

Сведения об авторах

Борис Павлович Тимофеев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: mechatronic@mail.ifmo.ru

Михаил Владимирович Абрамчук

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; старший преподаватель; E-mail: amv76@list.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 681.2.082

Е. А. ВОРОНЦОВ

К ВОПРОСУ ОБ АТТЕСТАЦИИ ПОВЕРИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены теоретические основы оценки субъективной погрешности наведения зрительным анализатором поверителя средств измерения. Рассмотрены основные характеристики движений глаз поверителя, задачи зрительного анализатора.

Ключевые слова: саккады, дрейф, тремор, зрительный анализатор, техническое зрение, поверка.

Целью настоящей работы является изучение движения глаз специалиста (поверителя) при поверке геодезических средств измерений. Это, в свою очередь, необходимо для выработки критериев объективной оценки профессиональных качеств поверителей, что позволит повысить уровень обеспечения единства измерений. Порядок аттестации физических лиц в качестве поверителей установлен правилами по метрологии [1]. К первичной аттестации допускаются лица, получившие специальную подготовку и имеющие стаж работы в поверочных подразделениях, или лица, имеющие высшее образование в области метрологии и измерительной техники и имеющие практический стаж работы в поверочных подразделениях. Периодическая аттестация проводится не реже одного раза в 5 лет, к ней допускаются лица, прошедшие в межаттестационный период соответствующую специальную подготовку.

Для проведения аттестации Государственная метрологическая служба, Государственный научный метрологический центр или метрологическая служба юридического лица создают

комиссию из высококвалифицированных специалистов-метрологов, имеющих стаж работы по поверке соответствующих видов (типов, групп) средств измерений (СИ) не менее 5 лет. Аттестационная комиссия осуществляет контроль проведения поверки средств измерений работником, по результатам которого составляется акт проверки соблюдения требований нормативных документов при проведении поверки средств измерений.

Однако в федеральном законе № 102 „Об обеспечении единства измерений“ к квалификации поверителей СИ не предъявляются требования. Таким образом, профессиональные качества поверителя оцениваются субъективно.

Основным рабочим органом поверителя при исполнении должностных обязанностей является зрительный анализатор, который, однако, при профессиональной аттестации не исследуется. Для объективной оценки (аттестации) поверителей предлагается использовать информационно-измерительный комплекс с системой технического зрения.

Основой комплекса является универсальный автоматизированный коллиматорный стенд (УКС), предназначенный для поверки геодезических и маркшейдерских средств измерений (рис.1). Он может использоваться в метрологических лабораториях и сервисных центрах по ремонту геодезических средств измерений, а также для определения и контроля метрологических характеристик геодезических и маркшейдерских средств измерений.

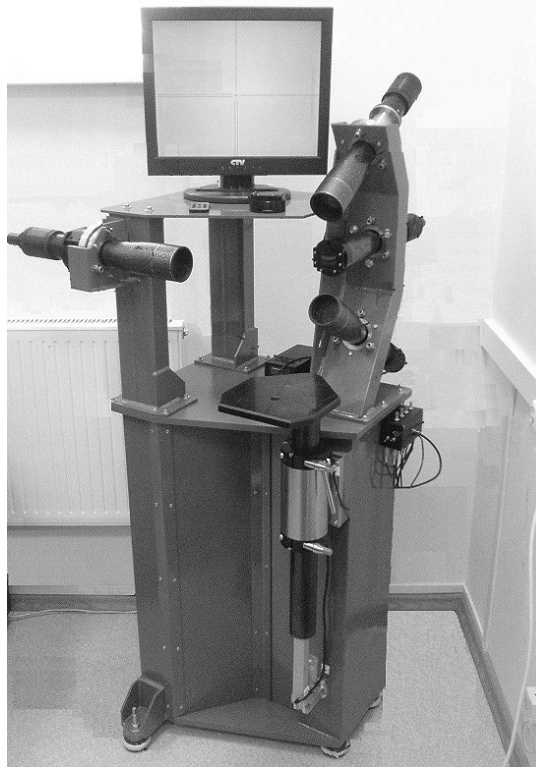


Рис. 1

Система технического зрения стенда состоит из видеокамеры, персонального компьютера и специализированного программного обеспечения, она позволяет исследовать и учитывать саккастические движения глаз при совмещении сеток нитей и наведении поверяемых СИ.

Систематизацию сведений о движениях глаз необходимо начать с ответа на вопрос: каков главный фактор, определяющий эти движения? Возможно, таким фактором является зрительная стимуляция: появление зрительного стимула в поле зрения приводит к установочному скачку глаз; перемещающийся зрительный объект вызывает следящие движения глаз. Форма объекта может определять траекторию движения глаза. Однако результаты исследований [2] показывают, что свойства зрительного объекта не являются определяющим фактором, поскольку при одном и том же объекте траектории движений глаз могут быть существенно

различными. На рис. 2 представлены записи движений глаз при решении разных задач: *а* — рассматривать прямоугольники; *б* — обвести глазами контуры прямоугольников; *в* — определить пропорции сторон прямоугольников.

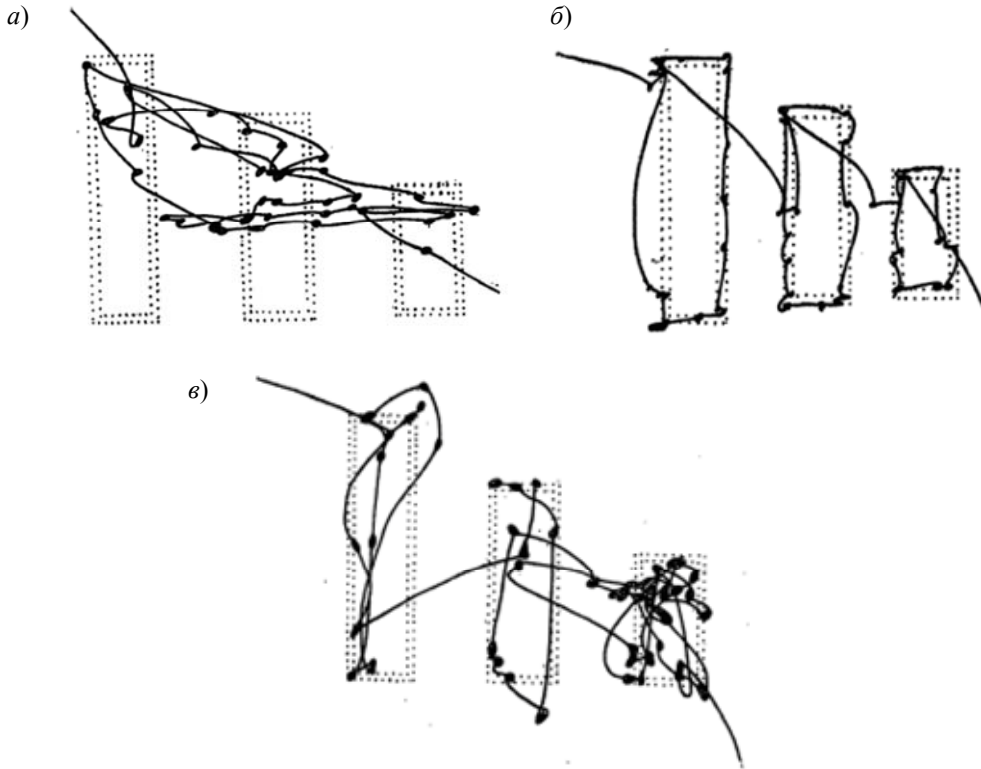


Рис. 2

Возможно, движения глаз определяются морфологической и функциональной неоднородностью сетчатки: наличием в центре сетчатки лишь небольшой по размерам области ясного видения — фовеа, однако было установлено [3, 4], что в ряде экспериментов глаза остаются неподвижными при экспозиции зрительного объекта, значительно превосходящего размеры фовеа, и тем не менее информация об объекте оказывается воспринятой.

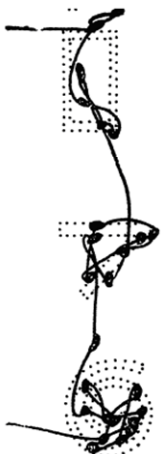


Рис. 3

Результаты других экспериментов показывают, что глаза совершают многочисленные движения при оперировании с объектами, меньшими области фовеа (рис. 3).

При оценке зрительного анализатора необходимо рассмотрение следующих задач.

1. Задачи фиксации неподвижного объекта. Фиксация — основная форма глазодвигательной активности, при которой происходит прием зрительной информации. При задаче фиксировать точку глаза совершают ряд произвольных микродвижений: тремор, дрейф, скачки.

Тремор наименее изучен. Это связано с высокой частотой и малой амплитудой движения: минимальные абсолютные смещения глаза при треморе составляют 1 мкм.

При дрейфе происходят плавные смещения глаз. Средняя скорость дрейфа — 5—6 %/с, максимальная — 30 %/с (максимальной скорости дрейф достигает несколько раз в секунду). Часть дрейфов может быть отнесена на счет конвергенции и дивергенции. Причиной дрейфа считается общая нестабильность двигательного аппарата глаз [4].

Скачки, или саккадические движения (саккады), обоих глаз при фиксации в отличие от тремора и дрейфа строго согласованы; они происходят одновременно и в одном направлении, обычно противоположном предшествующему дрейфу. По мнению Т. Корнхвита [4], основная функция скачков — исправление ошибки фиксации, наступившей в результате дрейфа.

2. Задачи слежения за движущимся объектом. При наблюдении за движущимся объектом возникают плавные движения глаз. Глаза сопровождают объект, следят за ним, отсюда название — следящие, или прослеживающие, движения глаз. В результате фовеальная область сетчатки постоянно удерживается, или фиксируется, на объекте, поэтому эти движения называются динамической фиксацией.

Степень отклонения проекции точки от центра фовеа, т.е. точность слежения, составляет в среднем $5-6'$ и совпадает с точностью статической фиксации.

3. Задачи перевода взора, или наведения глаз, на объект. Перевод взгляда в заданную точку происходит скачкообразно. При поиске, чтении, рассматривании сложных объектов скачки обеспечивают перемещение фовеального зрения.

Продолжительность и скорость скачков определяются их амплитудой (углом поворота глаз) и не зависят от направления, положения глаз перед скачком, от субъективной установки наблюдателя на замедление или ускорение скачка [3]. Зависимость продолжительности скачка T от его амплитуды α_0 выражается эмпирической формулой:

$$T = 0,021\alpha_0^{2,5} [\text{с}].$$

Таким образом, время скачка измеряется сотыми долями секунды: от 0,01—0,02 с для минимальных скачков до 0,07 — для скачков порядка 20° .

Временные характеристики саккадических движений глаз. Ставилась задача экспериментально исследовать временные характеристики саккадических движений глаз, которые включены в зрительный процесс, т.е. выступают уже в качестве не самостоятельных действий, а вспомогательных зрительных перцептивных актов.

При исследовании зрения важную роль играет предел возможностей зрительного анализатора в различных условиях наблюдения и при выполнении наблюдателем разных задач. Дифференциальный порог также называют минимально заметной разницей (JND — the just noticeable difference), что отражает суть измеряемой величины — наименьшее значение параметра, при котором два объекта достоверно различаются. Абсолютные пороги отражают минимальное количественное значение параметра стимула, необходимое для возникновения зрительного ощущения, и измеряются в условиях обнаружения. Абсолютные и дифференциальные пороги определяются в конкретных условиях наблюдения для конкретных параметров стимула.

В качестве оценки зрительного анализатора поверителя предлагается использовать площадь геометрической фигуры, образованной траекторией движения глаз поверителя. Данная фигура получена при совмещении поверителем сетки нитей (перекрестия) поверяемого прибора и сетки нитей коллиматорной трубы стенда (см. рис. 1).

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что задача оценки субъективной ошибки зрительного анализатора поверителя является комплексной и требует изучения ряда механизмов и процессов, происходящих в зрительном анализаторе поверителя. Следует отметить, что данная задача недостаточно исследована в контексте повышения уровня обеспечения единства измерений, в частности, поверки геодезических средств измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПР 50.2.012 – 94. Порядок аттестации поверителей средств измерений.
2. Даниличев В. Ф. Современная офтальмология. СПб: Питер, 2000. 320 с.
3. Бондарко В. М., Данилова М. В., Красильников Н. Н., Леушина Л. И., Невская А. А., Шелепин Ю. Е. Пространственное зрение. СПб: Наука, 1999. 218 с.
4. Гиппенрейтер Ю. Б. Движение человеческого глаза. М.: Изд-во МГУ, 1978. 256 с.

Сведения об авторе**Евгений Александрович Воронцов**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроникиПоступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 621.865.8-781.2.001.63

А. В. АМВРОСЬЕВА

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ
ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН**

На основании расчетов напряжений для пьезоэлектрических пластин без трещин были найдены коэффициенты интенсивности напряжений для трещин, возникающих в этих пластинах. При расчетах учитывался поправочный коэффициент для конечного тела.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая пластина, коэффициент интенсивности напряжений, поправочный коэффициент.

В настоящее время пьезокерамика все чаще используется в технических устройствах, например, в биморфах для пьезоэлектрических схватов, зондов для литографии и др. Функциональные детали из пьезокерамики обычно выполняются в форме стержня или пластины. Как показывают опыты, пьезопластины работают в условиях циклических и статических нагрузок. Поэтому расчеты напряженно-деформированного состояния этих пластин, учет наличия трещин и вычисление коэффициентов интенсивности напряжений являются основой прогнозирования работоспособности и надежности конструкции на их основе [1—6].

Расчет коэффициента интенсивности напряжений пластины с поверхностной трещиной. Проанализируем три варианта нагружения пластины (длина $L = 100$ мм, длина подвижной части пластины $L_1 = 80$ мм, высота $b = 22$ мм, ширина $h = 2,5$ мм) с поверхностной трещиной, занимающей область $0 \leq x_1 \leq L$, $|x_3| < \frac{h}{2}$.

К поверхностям пластины приложены электроды с электрическим потенциалом $V = \pm 80$ В и сила $P = 5H$ [2]. Длина трещины в пластине $l = 0,2$ мм.

1. Пластина с электродированными поверхностями $x_3 = \pm \frac{h}{2}$ (поляризация по оси x_3) (рис.

1). Найдем коэффициент интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва K_I :

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \sigma_{x_1}(x_3) \frac{\sqrt{l+x_3}}{\sqrt{l-x_3}} dx_3 = \frac{M}{I\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \frac{x_3(l+x_3)}{\sqrt{l^2-x_3^2}} dx_3 =$$

$$= \frac{M}{I\sqrt{\pi l}} \left[l \left(\sqrt{h - \frac{h^2 l^2}{4}} - \sqrt{l^2 - \frac{h^2}{4}} \right) + \left(\frac{\left(\frac{h}{2} - l\right) \sqrt{h - \frac{h^2 l^2}{4}}}{2} - \frac{h}{4} \sqrt{h^2 - \frac{l^2}{4}} \right) + \frac{\pi l^2}{2} \right] = M \sqrt{\pi l} \frac{l}{2I},$$

где $Y\left(\frac{l}{L}\right) \approx \left(\frac{l}{2l}\right)$ — поправочный коэффициент для конечного тела, $I = \frac{bh^3}{12}$ — момент инерции.

Путем математических вычислений получаем:

$$K_I = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^{3/2} .$$

Нормальные напряжения $\sigma_{x_1}(x_3)$, возникающие в пластине при изгибе, могут быть найдены с использованием следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x_1}(x_3) &= \frac{M}{I} x_3, \\ M &= N \frac{h}{2} = 199,38 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}, \\ N &= \sigma_{11} S = 159,5 \cdot 10^{-2} \text{ Н}; \end{aligned} \right\}$$

$$\sigma_{11} = \varepsilon_{11} E_{33} = 2,9 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2;$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = d_{31} \frac{V_0}{h} = 0,547 \cdot 10^{-6},$$

где ε — линейная деформация.

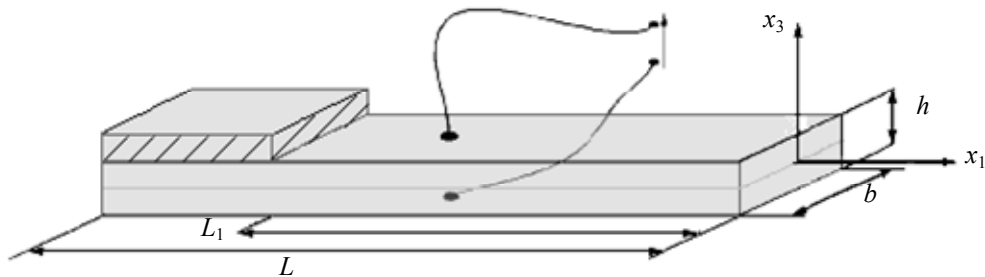


Рис. 1

Таким образом, механическое напряжение σ_{11} выражено через функцию электрического напряжения V и параметров; E — модуль Юнга, d_{31} — пьезомодуль: $\sigma = \sigma(V; d_{31}, E)$ [1].

В расчетах использован поправочный коэффициент для чистого изгиба в связи с тем, что нагружение биморфа напряжениями σ_{11} (рис. 2) эквивалентно нагружению моментами M — парой сил (рис. 3) [3].

2. Пластина, нагруженная силой P , на расстоянии от заделки L_1 с неэлектропроводными поверхностями $x_3 = \pm \frac{h}{2}$ (рис. 4). Найдем коэффициент интенсивности напряжений для трещины поперечного сдвига K_{II} :

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} l \int_{\frac{h-l}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{x_3 x_1}(x_3) \frac{\sqrt{l+x_3}}{\sqrt{l-x_3}} dx_3 = \frac{3P}{2bh\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h-l}{2}}^{\frac{h}{2}} \left(1 - \frac{4}{h^2} x_3^2\right) \frac{(l+x_3)}{\sqrt{l^2-x_3^2}} dx =$$

$$= \frac{3P}{2bh\sqrt{\pi l}} \left[\left(\pi l + \sqrt{h - \frac{h^2 l^2}{4}} - \sqrt{h^2 - \frac{l^2}{4}} \right) - \frac{4}{h^2} \left(\frac{hl - l^2 \sqrt{h - \frac{h^2 l^2}{4}}}{2} - \frac{hl \sqrt{h^2 - \frac{l^2}{4}} + l^3 \pi}{4} + \frac{3l^2 + \frac{h}{4} - hl}{3} \sqrt{h - \frac{h^2 l^2}{4}} - \frac{2l + \frac{h^2}{4}}{3} \sqrt{h^2 - \frac{l^2}{4}} \right) \right],$$

где $\tau_{x_3 x_1}(x_3) = \frac{3P}{2bh} \left(1 - \frac{4}{h^2} x_3^2 \right)$ — касательные напряжения.

В результате получим:

$$K_{II} = 6,9 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^{3/2}.$$

В данном случае использован поправочный коэффициент для поперечного изгиба (рис. 5).

3. Пластина, нагруженная силой P , на расстоянии от заделки L_1 с электродированными поверхностями $x_3 = \pm \frac{h}{2}$ (рис. 6). Найдем эффективный коэффициент интенсивности напряжений [3]:

$$K_{\text{эф}}^2 = K_I^2 + K_{II}^2,$$

$$K_{\text{эф}} = 7,1 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^{3/2}.$$

Расчет коэффициента интенсивности напряжений пластины с внутренней трещиной. Была рассмотрена та же пластина с аналогичными нагрузками.

1. Пластина с электродированными поверхностями $x_3 = \pm \frac{h}{2}$ (поляризация по оси x_3).

Найдем коэффициент интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва K_I :

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \sigma_{x_1}(x_3) \frac{\sqrt{l+x_3}}{\sqrt{l-x_3}} dx_3 = \frac{M}{I\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \frac{x_3(l+x_3)}{\sqrt{l^2-x_3^2}} dx_3 = M\sqrt{\pi l} \frac{l}{2I},$$

путем математических вычислений получим:

$$K_I = 1,8 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^{3/2}.$$

2. Пластина, нагруженная силой P , на расстоянии от заделки L_1 с неэлектродированными поверхностями $x_3 = \pm \frac{h}{2}$. Найдем коэффициент интенсивности напряжений для трещины поперечного сдвига K_{II} :

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \tau_{x_3 x_1}(x_3) \frac{\sqrt{l+x_3}}{\sqrt{l-x_3}} dx_3 = \frac{3P}{2bh\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \left(1 - \frac{4}{h^2} x_3^2 \right) \frac{(l+x_3)}{\sqrt{l^2-x_3^2}} dx_3 = \frac{3P\sqrt{\pi l}}{2bh} \left[1 - \frac{l^2}{h^2} \right].$$

В результате получим:

$$K_{II} = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^{3/2}.$$

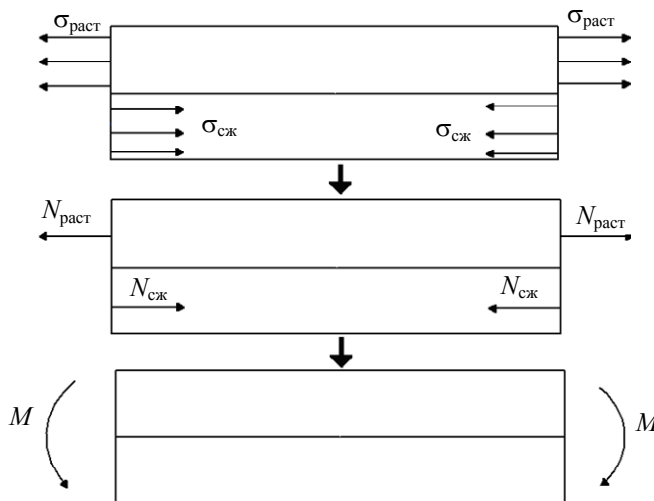


Рис. 2

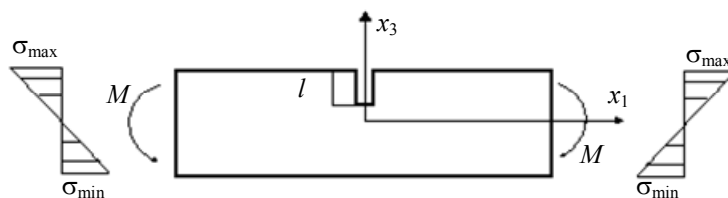


Рис. 3

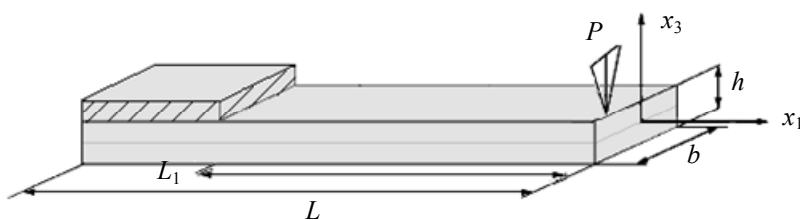


Рис. 4

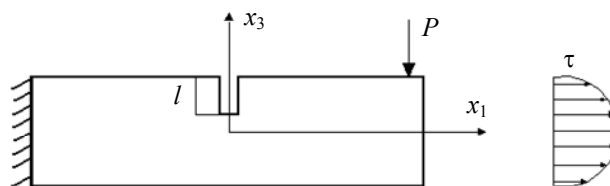


Рис. 5

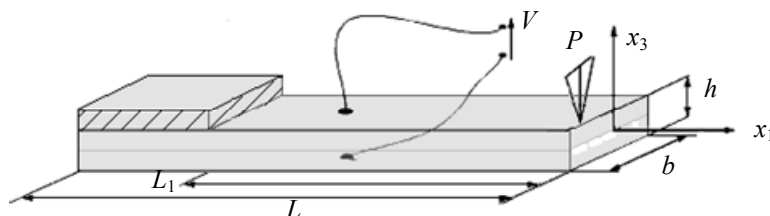


Рис. 6

Заключение. Установлено, что в заданных условиях нагружения пьезоэлектрических пластин значения коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин нормального отрыва и поперечного сдвига сравнимы по порядку. В работе представлен пример редуцирования задачи о линейных деформациях в задачу об изгибе. Из приведенных

уравнений видно, что напряженно-деформированное состояние пьезоэлектрической пластины при изгибе определяется внешним полем для системы трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардзокас Д. И., Зобнин А. И., Сеник Н. А., Фильштинский М. Л. Математическое моделирование в задачах механики связанных полей. Введение в теорию термопьезоэлектричества. М., 2010. Т. 1. 312 с.
2. Смирнов А. Б. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: Мехатроника и Робототехника. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. 160 с.
3. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
4. Амвросьева А. В. Напряженно-деформированное состояние пьезоэлектрических пластин с трещиной: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2011. 19 с.
5. Амвросьева А. В., Мусалимов В. М. Связанные поля перемещений в нагруженной пьезокерамической консоли с трещиной // Вестн. НГУ им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1347—1348.
6. Amvrosieva A., Musalimov V. Fatigue fracture of miniature piezoelectric grabs // Proc. XV Intern. Colloquium Mechanical Fatigue of Metals. Opole, 2010. P. 2—3.

Сведения об авторе

Анна Владимировна Амвросьева — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: destyni@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 621.01;681.2;537.533

В. В. БИНДЮК

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА НА ПОДВИЖНОМ ИНТЕРФЕЙСЕ

Предложен мехатронный модуль, объединяющий оптоэлектронный преобразователь регистрации малых смещений изображения со средствами линейного перемещения механической системы, позволяющий получить разрешающую способность 10^{-5} мм от заданного положения стрелы изгиба упругих микроэлементов с малой изгибной жесткостью. Полная относительная погрешность оптоэлектронного преобразователя на подвижном интерфейсе составляет 0,09 %.

Ключевые слова: интерфейс, преобразователь, упругий элемент, оптопара, погрешность.

В соответствии с методикой [1] измерение изгибной жесткости ($H = EI$) [2] прецизионных упругих микроэлементов (УЭ) в случае больших упругих перемещений выполняется при условии $\beta = f/L$ (f — стрела прогиба, L — длина УЭ). Значение β изменяется с фиксированным шагом. Исходя из значения β вычисляется коэффициент

$$K = 2F(\alpha, \varphi_k) \sin \alpha (1 - \cos \varphi_k),$$

входящий в номинальную расчетную характеристику косвенно измеряемой жесткости сечения УЭ, связывающую стрелу прогиба, длину УЭ и усилие продольного сжатия (P):

$$H = LPf/2K.$$

Здесь $F(\alpha, \varphi_k)$ — обозначение эллиптического интеграла Лежандра, α — модулярный угол, φ_k — эллиптическая амплитуда концевой точки упругой линии элемента.

Параметром, величину которого необходимо обеспечить с наименьшей погрешностью, является стрела прогиба f УЭ. Поскольку жесткость сечения гибкого упругого стержня на участке, где выполняется закон Гука, есть величина постоянная, отпадает необходимость в непрерывном измерении стрелы f прогиба и достаточно обеспечить $f/L = \text{const}$.

Обеспечить значение $f/L = \text{const}$ можно следующим образом. Пусть имеется некоторая система, содержащая подвижный элемент, на котором установлен бесконтактный преобразователь перемещения (БПП), фиксирующий первоначальное, недеформированное положение УЭ. О том, что положение зафиксировано точно, свидетельствует нулевой уровень сигнала, вырабатываемый БПП. При смещении подвижного элемента совместно с БПП на расстояние f получим некоторое приращение уровня сигнала, которое станет минимальным и сведется к нулю при достижении стрелой прогиба деформируемого УЭ заданного значения.

Для измерения жесткости прецизионных упругих элементов, например баланса приборов времени, наиболее подходят оптико-электронные преобразователи линейных перемещений [3].

На рис. 1 представлена схема оптикоэлектронного преобразователя положения (ОЭПП) стрелы УЭ: 1 — источник излучения, 2 — диафрагма, 3 — микрообъектив, 4 — сечение УЭ, 5 — приемник излучения.

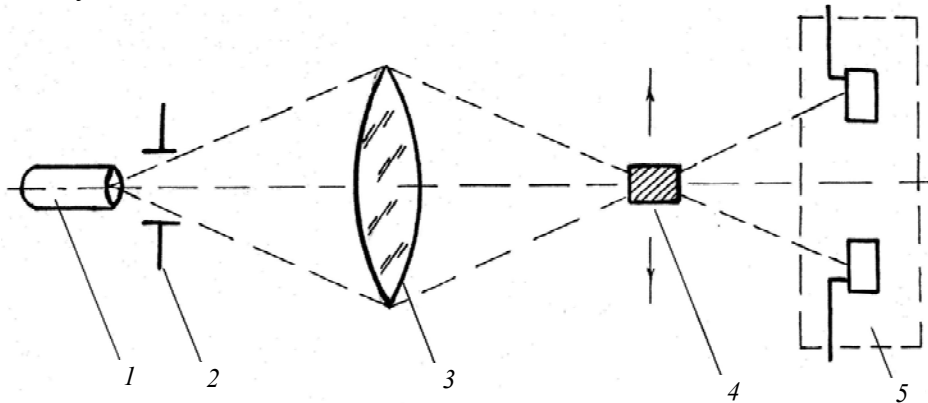


Рис. 1

Поток излучения, в зависимости от смещения торца сечения УЭ относительно оптической оси, попадает на несколько фоточувствительных площадок, сигналы с которых сравниваются между собой. Разностный сигнал в этом случае пропорционален величине смещения изображения относительно нулевого положения.

В схеме можно применять любые источники света, однако более выгодно использовать светодиоды [4], так как они имеют наибольший квантовый выход при малых токах, наилучшую оптическую связь с фотоприемником (благодаря малым габаритам и низким рабочим температурам) и наибольшую скорость переключения (0—10 МГц). Для светодиодов группы GaAs длина волны главной полосы $\lambda=0,91—0,97$ мкм, внешний квантовый выход до 32 % [4].

В качестве источника инфракрасного излучения ОЭПП использован светодиод АЛ-107Б с $\lambda = 0,97$ мкм, полная мощность излучения которого при температуре окружающей среды $-60—+25$ °С и прямом токе 100 мА не менее 10 мВт; постоянное прямое напряжение — 2 В. Минимальная ширина диаграммы направленности на уровне $0,5—40^\circ$, максимальная — на уровне $0,65—120^\circ$.

Поток излучения ИК-части спектра светодиода (1) направляется оптической системой (2—3), на приемник излучения (5). При смещении поперечное сечение УЭ (4) вырезает часть потока излучения и на центральную часть приемника излучения проецируется расфокусированное изображение в виде полоски шириной $h' = K_{oc}h$, где K_{oc} — коэффициент преобразования

оптической системы, h — ширина поперечного сечения УЭ при условии его перпендикулярности оптической оси.

Устройства, содержащие несколько чувствительных элементов, оказываются мало пригодны при регистрации малых смещений изображения объекта слежения из-за невозможности высокой точности измерений, так как практически невозможно подобрать пары элементов с одинаковыми характеристиками (амплитудными и временными).

В качестве приемника излучения использован квадрантный фотодиод ФД-19кк, изготовленный из одной пластины полупроводника (рис. 2) [5].

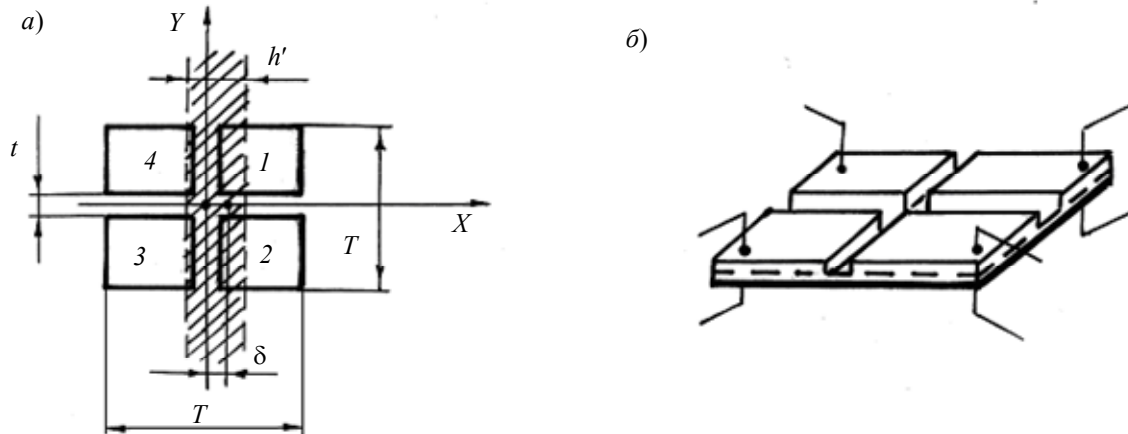


Рис. 2

Фотодиод представляет собой пластину полупроводника размером 2×2 мм с электронно-дырочным переходом, рассеченную под прямым углом двумя прорезями на глубину, превышающую глубину залегания p — n -перехода.

Ширина прорезей t фотодиода ФД-19кк равна 0,05 мм (рис. 2, а). На поверхности каждого из полученных фотодиодов имеются выводы для снятия информации о величине смещения изображения (рис. 2, б).

Уровень сигналов, характеризующих смещение изображения относительно центрального положения вдоль оси X , определяется следующим выражением:

$$I = (I_1 - I_2) - (I_3 - I_4),$$

где I_i ($i=1,2,3,4$) — сигнал, снимаемый с i -го квадранта. При небольших смещениях вдоль оси X полезный сигнал можно записать в виде

$$I = 2(I_1 + I_2)(dF(\delta)/d\delta)\delta,$$

где функция $F(\delta)$ описывает изменение фототока при изменении положения изображения полосы вдоль оси X .

Колебания нулевой точки ФД-19кк за 15—20 часов, по данным работы [6], не превышают ± 4 мкм в фотодиодном режиме. Квадрантный фотодиод малочувствителен к внешнему фону, так как при одновременном попадании фона на все элементы происходит его вычитание.

На рис. 3 приведена функциональная схема ОЭПП стрелы прогиба УЭ.

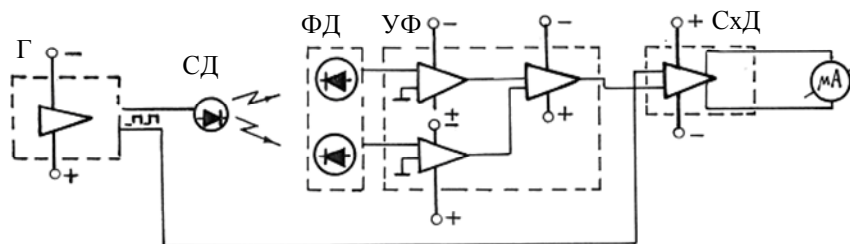


Рис. 3

Генератор (Г), выполненный на микросхеме К155ЛА3, является источником модулированного сигнала светодиода (СД) и опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор

(СхД). Частота основного и опорного сигналов равна 7500 Гц. Усилитель фототока (УФ) выполнен на микросхеме К1У401А; схема синхронного детектора — на К1УТ981.

Источником биполярного напряжения +6,3 и -6,3 В является блок Ф5075 ГСП.

Интерфейсом ОЭПП служит столик с призматическими направляющими трения качения, смещения которого на фиксированные расстояния f задаются размерами образцовых плоскопараллельных мер длины. При этом обеспечивается перпендикулярность оптической оси ОЭПП к плоскости смещения торца сечения УЭ.

Экспериментально получена позиционная характеристика ОЭПП стрелы прогиба УЭ высотой сечения: $b=0,18$ мм и шириной $h=0,03$ мм (рис. 4).

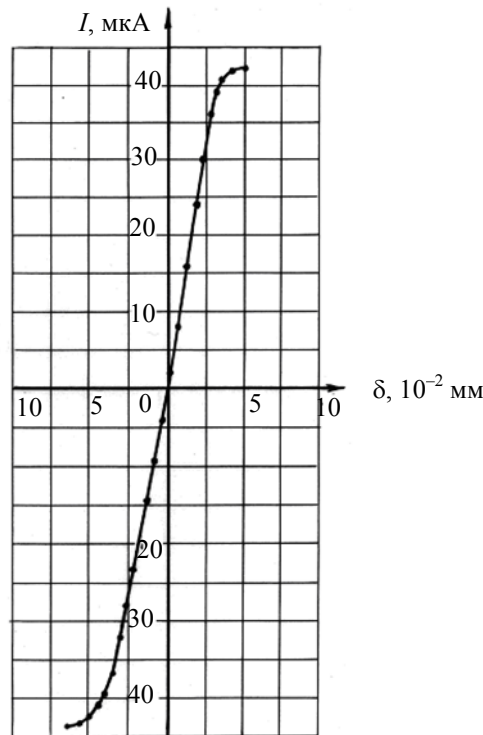


Рис. 4

Крутизна, или чувствительность, ОЭПП рассчитывается следующим образом:

$$S_{\delta} = \Delta I / \Delta \delta = 1250 \text{ мкА/мм},$$

а цена деления шкалы нуль-индикатора равна 0,0008 мм/мкА.

Пусть абсолютная погрешность фиксирования стрелы прогиба УЭ ОЭПП $\Delta f' = 0,0008$ мм, тогда при $f=1$ мм составляющая относительной погрешности измерительного устройства по стреле изгиба равна

$$\eta'_f = \Delta f' / f \cdot 100 = 0,08 \text{ \%}.$$

Полученное значение η'_f необходимо суммировать со второй составляющей. Так как абсолютная погрешность плоскопараллельной концевой меры длины $\Delta f''$, соответствующая размеру 1 мм для второго разряда, равна 0,0001 мм, то

$$\eta''_f = \Delta f'' / f \cdot 100 = 0,01 \text{ \%}.$$

Таким образом, полная относительная погрешность задания f оптоэлектронным преобразователем положения прогиба УЭ на подвижном основании равна

$$\eta_f = \eta'_f + \eta''_f = 0,09 \text{ \%}.$$

На основании полученных в работе результатов можно сделать следующие выводы:

1) ОЭПП на подвижном интерфейсе обеспечивает бесконтактный метод фиксации стрелы прогиба УЭ при минимальных размерах оптико-информационной системы;

2) работа ОЭПП на модулированном потоке излучения ИК-части спектра позволяет избежать влияния на уровень полезного сигнала посторонних источников излучения и низкочастотных шумов;

3) ОЭПП на квадрантном фотодиоде позволяет, в принципе, довести разрешающую способность системы по перемещению стрелы прогиба УЭ прибора до 0,01 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биндюк В. В. Метод определения жесткости упругих элементов // Тр. ЛИТМО. Расчет и проектирование приборов точной механики. 1977. Вып. 91. С. 27—32.
2. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.
3. Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Основные направления работ по совершенствованию оптико-электронных систем для контроля смещений объектов или их элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 100—103.
4. Берг А., Дин П. Светодиоды. М.: Мир, 1979.
5. Айвазова Л. С. и др. Четырехэлементные позиционно-чувствительные фотодиоды // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка, 1966.
6. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.

Сведения об авторе

Владимир Владимирович Биндюк — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: bvvspb@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.3.088.7

А. О. КУЗНЕЦОВ, В. М. МУСАЛИМОВ, А. П. САЕНКО, К. В. ТРАМБИЦКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРОВ

Представлены методы обнаружения пожаров с использованием алгоритмов анализа и цифровой обработки изображений, указаны их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: техническое зрение, распознавание образов, обнаружение пожаров, алгоритм.

Введение. В рамках настоящей статьи пожар рассматривается как неконтролируемый процесс горения, причиняющий материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества и государства. Для своевременного обнаружения пожаров в местах повышенной пожароопасности необходимо регулярно проводить мониторинг.

Существуют следующие способы мониторинга: наблюдение с вышки, летательных аппаратов, спутниковое наблюдение и т.д. С учетом достоинств и недостатков каждого способа совершенствование систем мониторинга может идти в нескольких направлениях:

- увеличение эффективности мониторинга путем повышения вероятности обнаружения пожара на ранних стадиях;
- снижение стоимости создания и обслуживания систем мониторинга;
- автоматизация мониторинга и уменьшение влияния человеческого фактора и т. д.

Развитие технологий компьютерного зрения сделало возможным автоматическое определение пожара на цифровых изображениях. Для этого необходимо с помощью различных приборов получить информацию о состоянии местности и оценить вероятность наличия пожара. Задача оператора в данном процессе сводится к своевременному реагированию на сигналы системы.

Обнаружив пожар, необходимо составить достоверный прогноз его распространения в зависимости от многих параметров (ландшафта, погодных условий и т.д.).

Затем необходимо организовать действия по локализации и тушению пожаров с учетом данных, полученных ранее. Представляется возможным и необходимым создание тренажеров, использующих все достижения современной науки и техники в области компьютерного зрения и графики.

Анализ цифрового видеоряда. Функционирование систем мониторинга может быть основано на анализе фотографий или видеопоследовательности, иными словами — статических или динамических изображений. При этом применяются два основных подхода — обнаружение движущихся объектов и цветовой анализ.

Принцип **обнаружения движущихся объектов** часто используется для выделения очагов огня путем *вычитания последовательных кадров* или *фонового изображения* [1].

В первом случае находятся изменения в изображениях при переходе от одного кадра к другому. Основной недостаток данного способа заключается в том, что перекрывающиеся друг друга области на изображениях могут быть ошибочно приняты в качестве фона.

В случае вычитания фонового изображения извлекаются динамические области из статического фонового изображения, основной недостаток заключается в том, что область может быть извлечена ошибочно, если фоновое изображение обновлено не вовремя или некорректно. Однако помимо обнаружения пожара этот способ можно применять для оценки характеристик самого пожара, например, для измерения координат фронта пожара.

Другой способ обнаружения областей пожара — *цветовой анализ*, или *цветовое выделение*. Конкретные реализации этого способа основаны на анализе пространства абстрактных математических цветовых моделей, являющихся наборами из 3—4 чисел. Наиболее распространены следующие цветовые модели [2]:

— *RGB* описывает каждый цвет набором из трех координат, каждая из которых отвечает разложению цвета на красную, зеленую и синюю составляющие;

— *YCbCr* — один из способов кодирования *RGB*-информации, где *Y* — яркость, а *Cb* и *Cr* характеризуют гамма-коррекцию;

— *HSI* описывает каждый цвет набором из трех координат — цветовой тон, насыщенность, интенсивность;

— *HSV* описывает каждый цвет набором из трех координат — тон, насыщенность, значение.

На основе методов, описывающих пламя в цветовой модели *RGB*, обычно принимают решение о принадлежности пиксела изображению пламени на основе правил, представленных системой [3]

$$\left. \begin{aligned} R(x, y) &> R_{\text{mean}}, \\ R_{\text{mean}} &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R(x_i, y_i), \\ R(x, y) &> G(x, y) > B(x, y), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

($R(x, y)$, $B(x, y)$ и $G(x, y)$ — значения красного, синего и зеленого каналов в пикселе (x, y) , K — общее количество пикселей, R_{mean} — среднее значение интенсивности красного цвета) либо

на основе трех выделенных правил, в соответствии с которыми насыщенность каждого возможного пиксела изображения пламени должна быть больше определенного порогового значения [4]. Пример использования подобного алгоритма изображен на рис. 1.



Рис. 1

В некоторых случаях возможно описывать изображение пламени в цветовом пространстве *YCbCr*, используя для принятия решения о принадлежности пиксела изображению пламени систему нечеткого вывода [5, 6].

В цветовой модели *HSI* для обнаружения огня на изображении используется база знаний, полученная путем выделения оператором пламени на изображении, которая впоследствии используется вычислительной машиной [7].

Динамические характеристики огня позволяют выделять его на фоне других близких по цвету объектов. Анализируются временные изменения интенсивности для каждого пиксела

на нескольких последовательных кадрах [7]. Если эти изменения превышают определенное пороговое значение, его принимают за пиксел, принадлежащий изображению пламени. Предполагается, что высота пламени изменяется со временем из-за движений его языков, поэтому высота выступает в качестве основной динамической характеристики пламени [8]. В некоторых случаях учитывается история изменения красного канала каждого пиксела *RGB*-изображения, принадлежащего контуру огня в течение короткого промежутка времени [9]. Затем эти данные используются в качестве входных при вейвлет-анализе.

Для практического использования этого подхода в процедуре обнаружения необходимо задать технологию измерения, описывающую объект типа „пожар“, который обладает определенными цветовыми параметрами. Модель может принадлежать одному из трех типов:

- классификаторы;
- структурные;
- параметрические.

Для работы *классификатора* необходимо сформировать достаточно большую базу знаний, что неудобно, поскольку пламя — объект, вариаций которого существует практически бесконечное множество. *Структурные модели* настроены на поиск объектов. Они также не вполне подходят для описания пожаров, потому что объект моделирования не является структурным. Таким образом, авторы рассматривают в основном *параметрическую модель*, которая характеризуется определенным статическим или динамическим цветовым описанием.

Алгоритм анализа. Рассмотрим этапы анализа характеристик пламени по имеющейся последовательности изображений:

- 1) получение данных;
- 2) общий анализ изображения;
- 3) поиск объектов на изображении;
- 4) вычисление характеристик;
- 5) вывод данных.

Первый этап обеспечивается системой мониторинга и сводится к записи последовательности изображений контролируемой местности, поэтому в рамках настоящей статьи рассматриваться не будет.

Существует множество инструментов, позволяющих применять алгоритмы цифровой обработки изображений и компьютерного зрения для анализа и модификации изображений. Одним из наиболее распространенных и эффективных инструментов является библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом Open Computer Vision (OpenCV, <<http://opencv.willowgarage.com>>). На этапах 2—5 с ее помощью последовательно обрабатываются все кадры с использованием принятых методов обработки цифровых изображений [2, 10].

Задачей второго этапа является общий анализ характеристик изображения: яркости, контрастности и других, зависящих от условий съемки и параметров имеющегося оборудования. Для удобства изображение переводится в формат *HSV*. Затем определяется параметр, который соответствует объекту типа „пожар“ на данном изображении. В случае лесных пожаров основным наблюдаемым элементом является дым, а всю местность можно описать одним термином „лесной массив“. Это несколько облегчает поиск, в отличие от ситуации, когда на изображении присутствуют жилые объекты, горы или водные пространства. Однако при неблагоприятных погодных условиях, например облачности, сравнение объектов типов „лес“ и „пожар“ может привести к ошибочным результатам.

Для недопущения таких ошибок вводится третий этап, задача которого — поиск заранее заданного объекта типа „пожар“. Перед началом работы программы определяется объект, потом вносится поправка его параметров относительно общих параметров изображения. В рамках настоящей работы использовались следующие параметры: распределение цвета объекта типа „дым“ и контраст в граничной области „лес—огонь—дым“.

Для описания распределения цвета используются алгоритмы нахождения границ объектов на изображениях. Сначала выделяется область, в которой рассчитывается распределение, потом результат сравнивается с параметром объекта типа „дым“, в итоге программа определяет, является область искомой (принадлежащей объекту типа „пожар“) или нет.

Объект типа „дым“ схож с объектом типа „облако“. Фронт, в котором есть и „дым“, и „пламя“, и „лесной массив“, обладает определенным контрастом, который может быть использован для различения объектов и облаков. Для выделения области, в которой необходимо искать этот контраст, на изображение наносится сетка. Последняя может быть искажена, по искажению определяются объекты типа „пожар“, геометрия их фронта и, наконец, координаты фронта пожара определяются с учетом перемещения элемента предполагаемой системы мониторинга, например, беспилотного летательного аппарата.

Нанесение сетки на изображение. Каждый прямоугольник сетки зависит от однородности заключенной в него области — если присутствует только однородный „лесной массив“, то он сохраняет геометрию, если есть область „дым“, то — искажает. Определение наличия „леса“ или „дыма“, а также степени искажения решетки происходит путем расчета гистограмм различных цветов.

Объекты типа „пожар“ и геометрия их фронта определяются по искажению сетки. На рис. 2 приведены исходное изображение (а) и результаты обработки в виде найденных границ по каждому каналу цветовой модели (б—г).

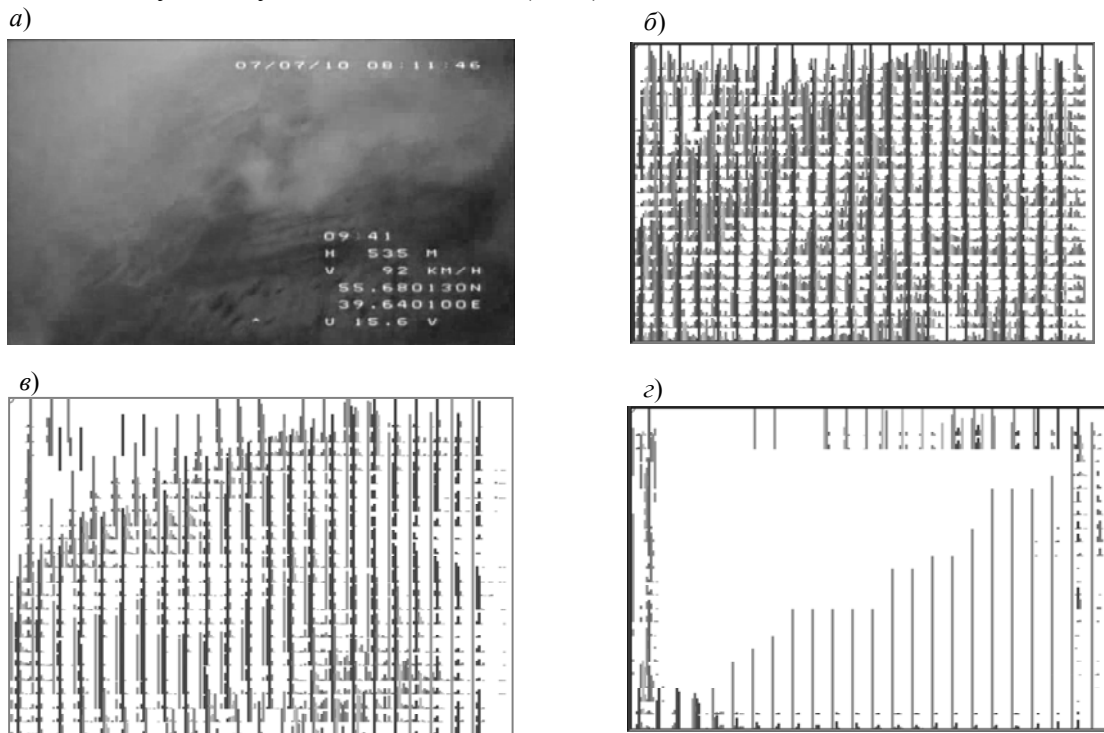


Рис. 2

Для формирования первого изображения (рис. 2, б) используется формула

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \max, & \text{если } \text{src}(x, y) > \text{thresh}, \\ 0, & \end{cases} \quad (2)$$

второго (рис. 2, в):

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} \text{src}(x, y), & \text{если } \text{src}(x, y) > \text{thresh}, \\ 0, & \end{cases} \quad (3)$$

третьего (рис. 2, з):

$$\text{dst}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{src}(x, y) > \text{thresh}, \\ \text{src}(x, y), & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

где $\text{dst}(x, y)$ и $\text{src}(x, y)$ — итоговое и исходное значение яркости пиксела по выбранному каналу, max — максимальное значение яркости пиксела по выбранному каналу, thresh — некоторое заданное пороговое значение.

Тренажеры CAVE-технологии. Этап организации действий по локализации и тушению пожаров призван решать задачу наиболее эффективного распределения и использования временных, материальных, человеческих и прочих ресурсов для борьбы с пожарами. Этот этап требует опыта и знаний оператора, равно как и тщательного планирования и четкого выполнения определенных действий, поэтому для отработки действий служб, задействованных в борьбе с пожарами, может быть крайне полезен соответствующий тренажер, который поможет сформировать логику работы с конкретной ситуацией лесного пожара.

Основой такого тренажера и среды обеспечения оператора необходимой информацией и инструментами анализа может послужить CAVE — виртуальная среда, использующая видеопроекторы для создания трехмерного изображения (рис. 3). В перспективе оператор подобного тренажера сможет управлять перемещением точки обзора с помощью жестов, фиксируемых оптической или инерциальной системой, расставлять метки для описания порядка работы по тушению пожара.



Рис. 3

Заключение. Подробно описаны методы обнаружения пожаров с использованием алгоритмов компьютерного зрения и цифровой обработки изображений. Использование современных средств обработки изображения может существенно повысить эффективность решения многих практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Toreyin B. U., Cetin A. E.* Online detection of fire in video // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Proc. 2007. P. 1—5.
2. *Gonzalez R. C., Woods R. E.* Digital image processing. Prentice Hall, 2002.

3. Celik T., Demirel H., Ozkaramanli H., Uyguroglu M. Fire detection using statistical color model in video sequences // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Proc. 2006. P. II213—216.
4. Chen T. H., Wu P. H., Chiou Y. C. An early fire-detection method based on image processing // IEEE Intern. Conf. on Image Proc. 2004. P. 1707—1710.
5. Celik T., Ozkaramanli H., Demirel H. Fire and smoke detection without sensors: image processing based approach // Europ. Signal Proc. Conf. 2007.
6. Польте Г. А., Саенко А. П. Количественная оценка качества изображений с использованием методов нечеткой логики // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 32—36.
7. Dost B., Genç M. Fire detection in video. Istanbul, Turkey.
8. Zhang J. H., Zhuang J., Du H. F. A new flame detection method using probability model // Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security. 2006. P. 1614—1617.
9. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gudukbay U., Cetin A. E. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // Pattern Recognition Letters. 2006. N 27. P. 49—58.
10. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV. O'Reilly, 2008.

Сведения об авторах

Артём Олегович Кузнецов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: ak@smartsport.org

Виктор Михайлович Мусалимов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musvm@yandex.ru

Алексей Петрович Саенко

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: alexey.saenko@gmail.com

Константин Владиславович Трамбицкий

— студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: tr-kostya@ya.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

В. М. МУСАЛИМОВ, П. П. КОВАЛЕНКО, С. Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА

ПЕРЕЧИСЛИТЕЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Предложен новый метод классификации данных, полученных с помощью сканирующей зондовой микроскопии, на основе полиномов Морса и возможностей перечислительной комбинаторики.

Ключевые слова: классификация данных сканирующей зондовой микроскопии, полиномы Морса, перестановки.

Введение. Известно, что данные, получаемые с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), обрабатываются различными программами, в частности, FemtoScan Online, Gwyddion, SPIP и WSxM. Перечисленные программы применяют к получаемым данным СЗМ различные методы обработки сигналов и позволяют визуализировать их в том или ином виде. Существующие программы обработки данных направлены только на анализ сигналов и, как показали наши исследования, не позволяют решать задачу классификации технологических поверхностей. Международные системы классификации качества поверхностей, основанные на определении параметров шероховатости поверхности R_a и R_z , применимы только для микроизмерений и не позволяют однозначно классифицировать результаты измерений на наноуровне, так как определяются не характеристики поверхности, а некоторая потенциальная функция, описывающая межатомное взаимодействие поверхности и зонда. Целью настоящей статьи является разработка методов анализа и классификации сигналов, получаемых при использовании систем мониторинга качества технологических поверхностей, включая средства сканирующей зондовой микроскопии, на основе достижений и возможностей перечислительной комбинаторики с использованием логики паттернов [1, 2].

Настоящая работа посвящена развитию топологического метода классификации информации, поступающей со средств мониторинга качества поверхностей, основанного на использовании полиномов Морса и возможностей перечислительной комбинаторики [3, 4].

Полиномы Морса можно описать следующей функцией:

$$P(x) = a_0x^{n+1} + a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_n, \quad a, x \in R.$$

Многочлен степени $n+1$ имеет n критических точек и n критических значений. Рассмотрим многочлены вида:

$$P(x) = x^{n+1} + a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_n,$$

где $a_0 = 1$ — старший коэффициент.

Точка x_0 называется критической для многочлена $P(x)$, если она является корнем его производной, $P'(x_0) = 0$. В критической точке касательная к графику многочлена горизонтальна. Значение многочлена в критической точке $P(x_0)$ называется критическим. Многочлен $P(x)$ называется морсовским, если все его:

- критические точки вещественны и различны;
- критические значения различны.

Каждому полиному Морса соответствует определенная числовая последовательность (перестановка) критических значений многочлена от наименьшего критического (номер 1) до наибольшего, номер которого зависит от количества критических точек и, следовательно, от

степени полинома. Перестановки, соответствующие полиномам Морса (пилообразные), называют типами этих полиномов [5].

Типом полинома Морса может являться только такая перестановка, последнее критическое значение которой меньше предыдущего. Таким образом, для полиномов с нечетной степенью n первый элемент перестановки должен быть меньше последующего, с четной n — больше. Исходя из вышеуказанного правила полиномы Морса можно разделить на две группы:


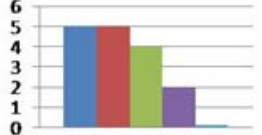

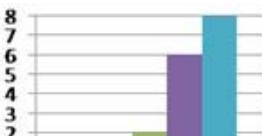

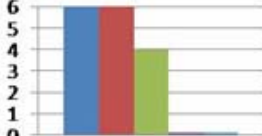
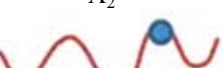
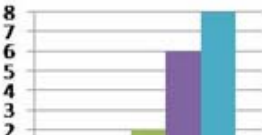

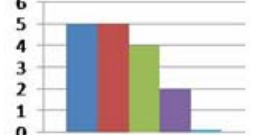
- если n нечетное ($n = 1, 3, 5, 7 \dots$), то такие полиномы называются нечетными;
- если n четное ($n = 2, 4, 6 \dots$), то такие полиномы называются четными.

Распределения порядковых номеров критических значений в перестановках. Рассмотрим полиномы Морса $n = 5$, они имеют три локальных минимума (V_1, V_2, V_3) и два локальных максимума (Λ_1, Λ_2), чередующихся между собой.

Известно, что данный класс полиномов включает 16 возможных перестановок номеров экстремумов, определяемых по их положению на позиции того или иного локального минимума или максимума (табл. 1).

Таблица 1

Распределение порядковых номеров критических значений

Порядковый номер экстремума	Локальный минимум или максимум	Распределения номеров критических значений	Перестановки				
I	V_1 		13254 14352 15342 14253 15243	24153 23154 24351 25143 25341	34152 35241 35142 34251	45132 45231	
II	Λ_1 				13254 23154	14253 14352 24153 24351 34152 34251	15243 15342 25143 25341 35142 35241 45132 45231
III	V_2 		24153 23154 25143 34152 35142 45132	13254 14253 15243 35241 34251 45231	14352 15342 24351 25341		
IV	Λ_2 				45132 45231	15342 15243 25143 25341 35241 35142	13254 14352 14253 23154 24153 24351 34152 34251
V	V_3 		24351 25341 35241 34251 45231	34152 35142 45132 14352 15342	14253 15243 24153 25143	13254 23154	

Можно заметить, что полученные распределения несимметричны, при этом экстремумы I и V обладают одинаковыми распределениями. В свою очередь, распределения для экстре-

мумов II и IV идентичны. Отсюда можно сделать вывод, что распределения порядковых номеров в перестановках для нечетных полиномов симметричны относительно центрального экстремума.

Рассмотрим использование полиномов Морса $n=5$ в качестве базы перечислительной классификации данных, получаемых со средств мониторинга качества поверхностей.

На рис. 1 представлена основа перечислительной классификации данных с использованием полиномов Морса с пятью критическими точками ($n=5$): V_1 — первый; V_2 — второй; V_3 — третий; Λ_1 — четвертый; Λ_2 — пятый подкласс. Для каждого подкласса указаны перестановки, которые могут входить в него. В рамках предлагаемой классификации эти перестановки будем называть типом. Каждый тип может принадлежать двум подклассам в зависимости от того, как он классифицируется — по положению наибольшего максимума (экстремума с порядковым номером 5) или минимума (экстремума 1). Для этого вычисляется среднее арифметическое всех значений (рис. 1, пунктир), составляющих классифицируемые данные. После этого определяются отклонения вершин и впадин от среднего значения, если отклонение впадины превышает отклонение выступа, классификация осуществляется по положению главной впадины, т.е. экстремума 1. Здесь возможны три варианта: экстремум 1 находится на позиции первой впадины V_1 , тогда он относится к первому подклассу; если экстремум находится на позиции второй впадины V_2 , то ко второму; в случае нахождения экстремума 1 на позиции V_3 — к третьему.

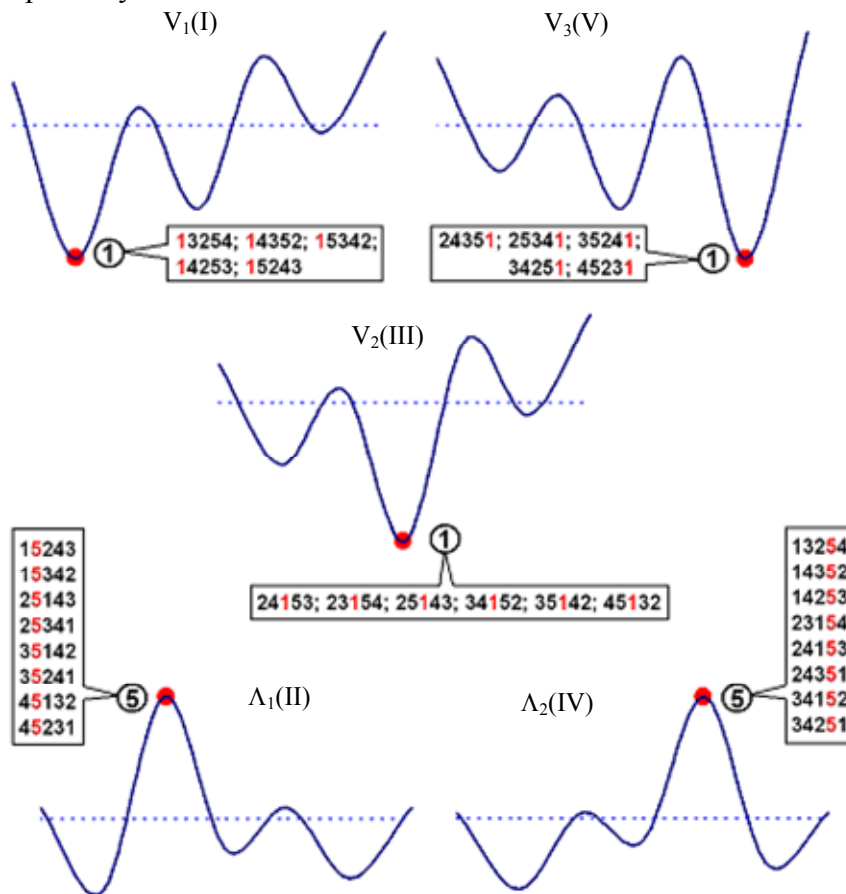


Рис. 1

Если отклонение вершины больше отклонения впадины, то выбор подкласса осуществляется по вершине, т.е. по положению экстремума 5: если он находится на позиции первого выступа Λ_1 , имеет место четвертый подкласс, если на позиции Λ_2 — пятый.

Аналогичным образом формируются четыре подкласса четвертого класса, в котором имеются два выступа и две впадины.

Рассмотрим полиномы Морса с шестью критическими точками ($n=6$). Для данного класса имеется 61 перестановка. Каждый такой полином обладает тремя локальными минимумами V_1, V_2, V_3 и тремя максимумами $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$. Аналогично полиномам пятого класса классификация производится по положению локального минимума (экстремума 1) или локального максимума (экстремума 6).

На рис. 2 представлены полиномы Морса, соответствующие полученным подклассам: V_1 — первый; V_2 — второй; V_3 — третий; Λ_1 — четвертый; Λ_2 — пятый; Λ_3 — шестой. В табл. 2 приведены подклассы с соответствующими им перестановками.

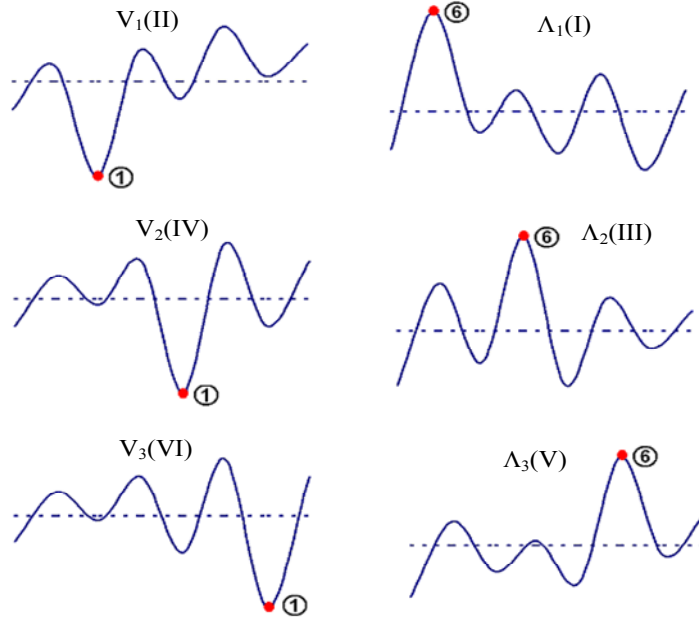


Рис. 2

Таблица 2

Подклассы шестого класса

Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой
214365	324165	325461	613254	216354	214365
215364	325164	326451	614253	216453	215364
215463	326154	425361	614352	316254	215463
216354	423165	426351	615243	316452	314265
216453	425163	435261	615342	326154	315264
314265	426153	436251	623154	326451	315462
315264	435162	524361	624153	416253	324165
315462	436152	526341	624351	416352	325461
316254	523164	534261	625143	426153	325164
316452	524163	536241	625341	426351	413265
413265	526143	546231	634152	436152	415263
415263	534162	624351	634251	436251	415362
415362	536142	625341	635142	516243	423165
416253	546132	634251	635241	516342	425361
416352	623154	635241	645132	526341	425163
513264	624153	645231	645231	526143	435261
514263	625143			536142	435162
514362	634152			536241	513264
516243	635142			546231	514263
516342	645132			546132	514362
613254					523164
614253					524163
614352					524361
615243					534162
615342					534261

Примеры перечислительной классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей. Для решения задачи классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей предлагается осуществлять пространственные преобразования сигналов и изображений, связанные с переходами от одномерного сигнала к набору его двумерных представлений и суммированием последних в единый образ. Данные преобразования выполняются по алгоритмам, описанным в работе [2]. В качестве классификаторов для полученных образов предлагается использовать полиномы Морса.

Составим перечислительную классификацию нанотопографии, полученной при сканировании поверхности твердого тела из золота (рис. 3, а—рис. 6, а) на установке „Nanoeducator“.

Произведем кумулятивное суммирование по строкам и столбцам матрицы данных измерений. При суммировании по столбцам дальнейшая работа осуществляется с последней строкой полученной кумулятивной матрицы, а при суммировании по строкам анализируется ее последний столбец, так как эти строка и столбец содержат все строки и столбцы исходной матрицы.

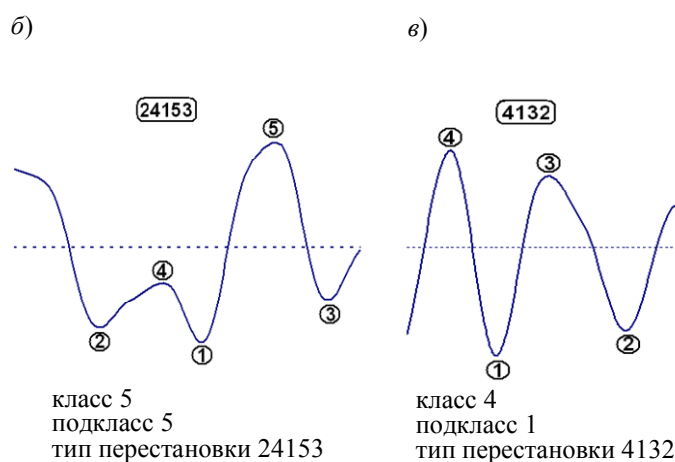
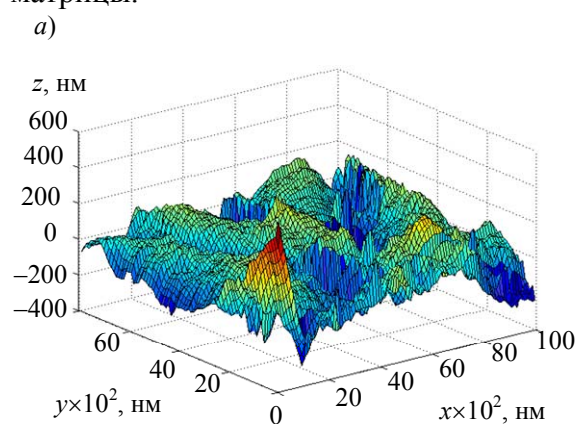


Рис. 3

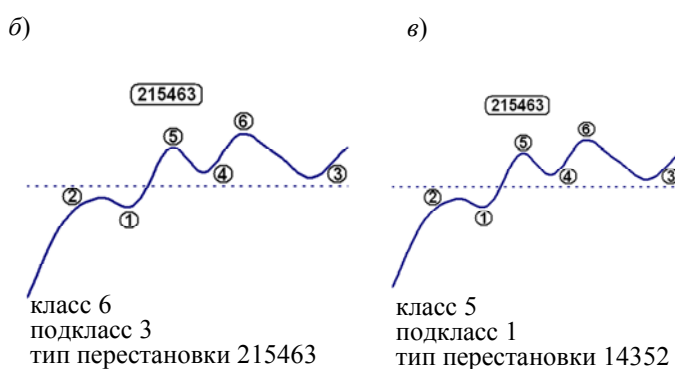
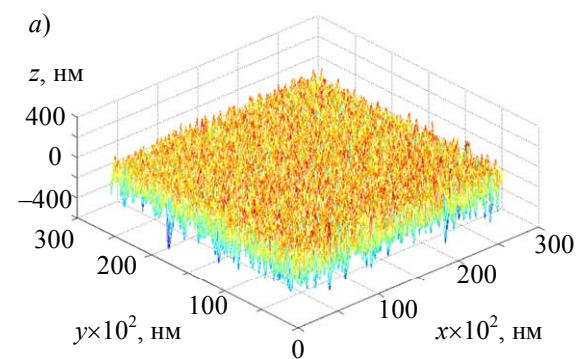


Рис. 4

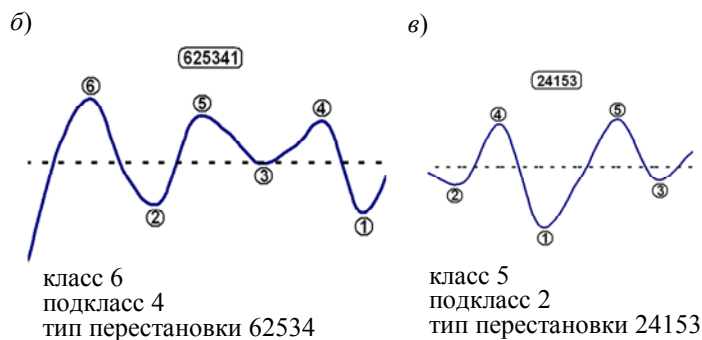
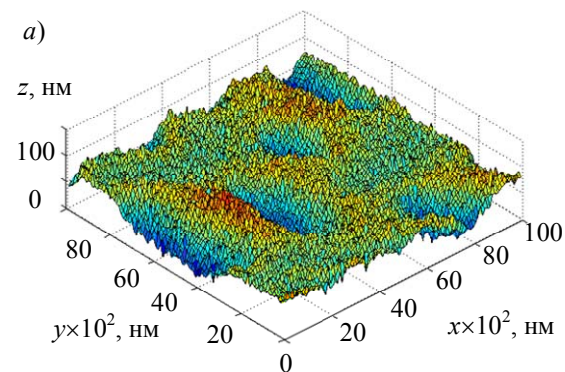


Рис. 5

На рис. 3, б—рис. 6, б представлена аппроксимированная кумулятивная сумма элементов в столбцах матрицы исходных данных. Экстремумы полученной функции пронумерованы в порядке возрастания критических значений, определен тип перестановки. Такая же операция осуществлена в отношении кумулятивной суммы по строкам исходной матрицы (рис. 3, в—рис. 6, в).

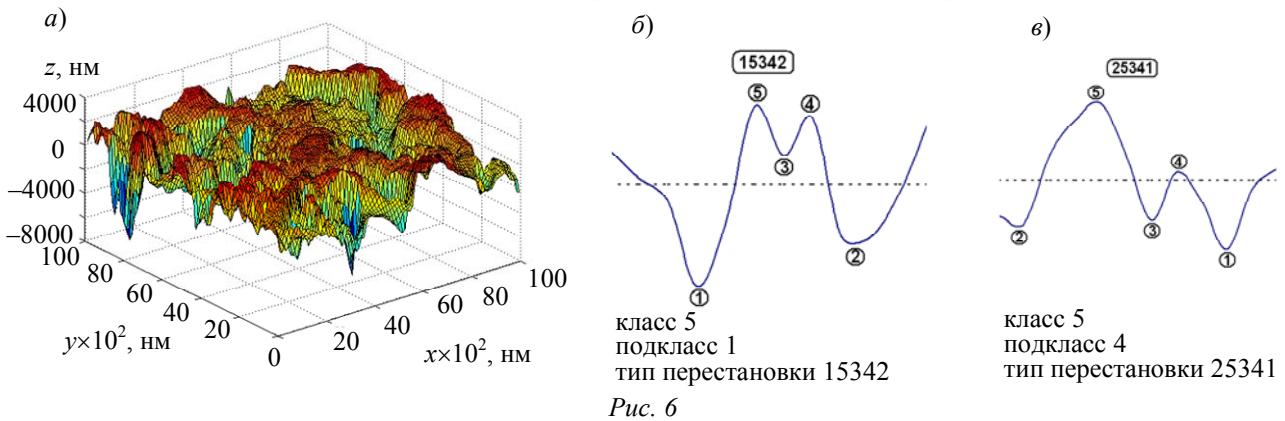


Рис. 6

Аналогичным образом классифицируются другие имеющиеся нанотопографии, полученные при сканировании поверхностей твердых тел из различных материалов с использованием СЗМ.

Заключение. В работе предложен метод перечислительной классификации информации, получаемой при сканировании поверхностей твердых тел с использованием средств сканирующей зондовой микроскопии. Исследованы перечислительные особенности полиномов Морса, на которых базируется предлагаемый метод. Приведены примеры классификации данных СЗМ с использованием разработанного метода. На основе перечислительного метода могут быть написаны подпрограммы к существующим программам обработки данных СЗМ, допускающим использование пользовательских модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко П. П. Перечислительные методы и цифровые технологии классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2011.
2. Коваленко П. П., Мусалимов В. М. Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. № 1. С. 38—45.
3. Мусалимов В. М., Хамидуллина Л. Т., Коваленко П. П. Прикладные задачи перечислительной комбинаторики: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 69 с.
4. Гульден Я., Джексон Д. Перечислительная комбинаторика / Пер. с англ.; под ред. В. Е. Тараканова. М.: Наука, 1990. 504 с.
5. Ландо С. К. Лекции о производящих функциях. М.: МЦМНО, 2004. 144 с.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musvm@yandex.ru
- Павел Павлович Коваленко** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: kovalenko_p.p@mail.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; старший преподаватель; E-mail: sker@pochtamtu.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

Ю. А. Ротц

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ

С помощью модели специально разработанного прибора получены экспериментальные значения динамической остроты зрения. Специфика прибора позволяет исключить частотную погрешность, вносимую в результаты измерений мерцанием и инерционностью экрана.

Ключевые слова: оценка зрения, динамическая острота зрения, оптотип.

Введение. Зрительная работоспособность оценивается по ряду показателей, в частности, динамической остроте зрения (ДОЗ). Поскольку движения глаз и сенсорные функции зрения зависят от функционального состояния ряда структур мозга, ДОЗ измеряется с целью диагностики неврологических и психических заболеваний. Это важный показатель при профессиональном отборе летчиков, водителей, операторов, спортсменов и других специалистов, деятельность которых связана с восприятием движения.

Динамическая острота зрения — способность глаза „схватить и удержать“ изображение предмета на время, достаточное, чтобы увидеть его детали, установить скорость и направление его движения. ДОЗ — интегральный показатель сенсомоторной функции зрительной системы, отражающий состояние статической остроты зрения, полей зрения и движений глаз. Значение этого показателя снижается при бессоннице, физической нагрузке, утомлении, при повышении скорости движения объекта, вследствие возрастного снижения окулomotorной функции [1].

Основные методы оценки остроты зрения, основанные на оценке различения оптотипов, имеют существенные недостатки, такие как статичность (что делает их непригодными для оценки ДОЗ) или движение оптотипов на экране монитора (экран обладает определенной инерционностью, или частотой обновления изображения 60—100 Гц, не позволяющей наблюдать движение изображения непрерывно), что вызывает погрешности измерений [2]. Помимо того, недостаточно изучены механизмы мозга, отвечающие за величину ДОЗ, отсутствуют специальное оборудование, стандартизованные методы исследования и нормативные показатели ДОЗ [1].

Прибор для оценки ДОЗ. Нами реализован опытный образец прибора для определения динамической остроты зрения (рис. 1). Предлагаемый прибор позволяет исключить погрешность, вызванную мерцанием и инерционностью экрана при проведении оценки ДОЗ. Точность измерений прибора повышается благодаря использованию в нем непрерывно движущихся оптотипов.

Прибор содержит цилиндр 2 с таблицей оптотипов, расположенной на его внешней поверхности. Таблица состоит из параллельных линий оптотипов, каждая из которых представляет собой набор черно-белых квадратов. Цилиндр соединен с горизонтальным основанием 1 посредством вертикальной оси 5, соединенной также с датчиком угловой скорости 3. В приборе используется маска — непрозрачная гибкая пластина с горизонтальной щелью, закрепленная на двух роликах с возможностью перемещения по вертикали за счет наматывания материала пластины на ролики 9. Маска закреплена на основании перед цилиндром. Элементы передачи вращения 4 и 7 связаны между собой и с выходным валом электродвигателя 6. Вход электродвигателя соединен с выходом пульта управления 8 (персональный компьютер).

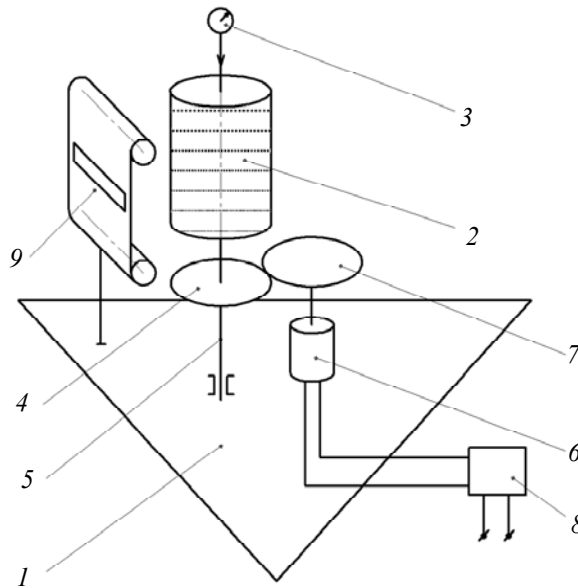


Рис. 1

Методика исследования. Для объективности измерений сохраняются постоянными определенные условия эксперимента: расстояние между прибором и испытуемым, освещенность, время суток, степень утомления испытуемого и др. Щель маски перемещается по линиям оптоотипов для определения линии с минимально различимыми испытуемым оптоотипами. Затем цилиндр с таблицей оптоотипов приводится во вращение. Скорость вращения увеличивается до того момента, пока испытуемый не начнет воспринимать оптоотипы выбранной линии визуально неподвижными. Соответствующая этому моменту угловая скорость регистрируется, и рассчитывается время перемещения оптоотипа выбранной линии на следующую позицию:

$$t = \frac{2a}{r\omega},$$

где t — значение ДОЗ как временная характеристика, a — сторона квадрата-оптоотипа, r — радиус цилиндра, ω — текущая скорость вращения цилиндра.

Результаты эксперимента. Первые результаты показали, что в исследуемой группе из 40 добровольцев различного возраста расчетная величина ДОЗ распределяется следующим образом: 1 человек — 62,52; 21 — 78,15; 15 — 93,78 и 3 — 109,41 мс [3]. Поскольку невозможно провести широкомасштабные эксперименты по оценке ДОЗ, полученные данные были проанализированы по методу Монте-Карло. Распределение экспериментальных данных на интервале 62,52—109,41 мс имеет моду 78,15.

Величина ДОЗ может лежать только в положительной области значений, поскольку она выражена показателями времени. Для моделирования распределений таких величин используются одно- и двухпараметрические законы: Вейбулла и его частные случаи — экспоненциальный и Рэля. Построения в общей графической области подтверждают, что огибающая гистограммы экспериментальных данных близка к распределению Рэля.

Был проведен регрессионный анализ экспериментальных данных (X). По методу наименьших квадратов найдены оценки (коэффициенты регрессии) коэффициентов аппроксимационного полинома $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon(\mu, \sigma)$, которые равны: $\beta_0 = -58,9$ и $\beta_1 = 0,88$. Для проверки достоверности данных расчета был смоделирован эксперимент, в котором получены четыре значения Y при различных входных данных x_1 .

Проверка непротиворечивости оценок коэффициентов регрессии выходным данным осуществлена на основе критерия Стьюдента [4]. На рис. 2, a приведена кумулята Стьюдента

с обозначениями на ней заданных уровней 0,05 и 0,95 квантилей и вероятности $P(\beta \geq t_{Cr}) > 0,95$, которые подтверждают выводы о статистической значимости оценки β на уровне 10 %.

Регрессия (рис. 2, б) задана в виде линейной функции одной переменной с тангенсом угла наклона β . Функция регрессии Y соединена линиями с опытными данными X . На рис. 2, в графически построены доверительные интервалы коэффициентов регрессии.

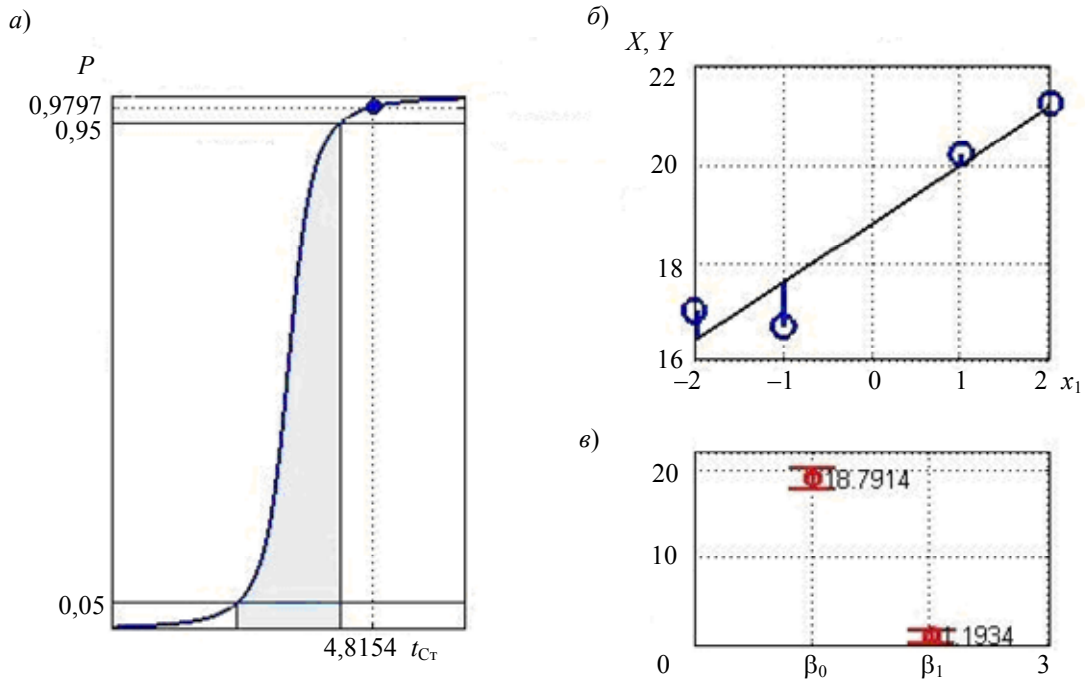


Рис. 2

Заключение. Вероятностный подход к моделированию позволяет развивать теорию оценки ДОЗ, основанную на статистике. Расширение опытной группы и дополнительные эксперименты позволят оценить зависимость ДОЗ от возраста (это даст основания устанавливать возрастной порог в ряде профессий, что может положительно сказаться на безопасности), сделать выводы о возможности исправления ДОЗ путем коррекции статической остроты зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубарко А. И., Лукашевич И. В. Анализ механизмов динамической остроты зрения // Медицинский журн. 2007. №1 [Электронный ресурс]: <http://www.bsmu.by/index.php?option=com_content&view=article&id=285:---&catid=40:s-12007&Itemid=52>.
2. Воронцов Е. А., Черноусов А. С. Классификация методов и средств определения остроты зрения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 28. С. 75—82.
3. Ротц Ю. А., Мусалимов В. М. Экспериментальная оценка динамической остроты зрения (ДОЗ) // Тр. VII Междунар. конф. молодых ученых и специалистов “Оптика — 2011”. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011.
4. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 448 с.

Сведения об авторе

Юлия Андреевна Ротц — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

УДК 006.91: 67.05

С. С. РЕЗНИКОВ

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Рассматривается возможность применения теории интеллектуальных измерений к проблеме имитационного моделирования нарезания зубчатых колес.

Ключевые слова: имитационное моделирование, зубчатые колеса, интеллектуальные измерения.

Одним из наиболее перспективных направлений развития измерительной техники в настоящее время является интеллектуализация средств измерений [1] и построение измерительных систем и измерительно-вычислительных комплексов. Важной особенностью интеллектуальных средств измерений является возможность использования в процессе измерения исходной и текущей информации о технической системе, процессе или величине, которая является объектом измерений.

В настоящее время применение методов интеллектуальных измерений в ряде предметных областей, например в механической обработке, серьезно ограничено отсутствием математических моделей, которые могут являться источниками исходной информации о процессах, являющихся объектами измерения или управления.

В современном машиностроении зубчатые колеса являются одной из важных составляющих для решения задач преобразования механического движения. Изготовление зубчатых колес — сложный и трудоемкий процесс, во многом зависящий от эксплуатационных свойств зуборезного инструмента, в частности, червячных зуборезных фрез. С целью увеличения производительности процесса, снижения трудоемкости и себестоимости зубчатых колес, повышения их надежности необходимо создавать имитационные модели, максимально соответствующие исходному объекту.

Понятие „интеллектуальные измерения“ [1] было введено в начале 1980-х гг. благодаря созданию процессорных информационно-измерительных систем, имеющих в составе измерительной цепи перепрограммируемые вычислительные устройства, а также совершенствованию принципов построения измерительных средств и разработке математического обеспечения измерений.

Интеллектуальные средства измерения должны удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

- 1) возможность изначального выбора алгоритма измерений и (или) трансформации алгоритма измерений непосредственно в процессе измерений;
- 2) возможность автоматической самопроверки и калибровки задействованных измерительных каналов и использующихся алгоритмов измерений;

3) возможность адаптации алгоритма измерений, а также возможность самопроверки и самокалибровки измерительных каналов и алгоритмов измерений, определяющаяся наличием аппаратной и (или) программной избыточности интеллектуального средства измерений;

4) основанием для выбора или оптимизации алгоритма измерений должна являться исходная или исходная и текущая информация об объекте измерений, средстве и условиях измерений;

5) наличие интеллектуального диалогового интерфейса как средства взаимодействия оператора и интеллектуального средства измерений.

Иногда в качестве определяющей характеристики интеллектуального средства измерения рассматривается наличие памяти, в которой хранятся программа реализации измерений и данные, необходимые для осуществления измерений.

В настоящее время наиболее актуально проведение исследований, связанных с разработкой систем управления базами знаний, методов представления в них знаний об объектах, средствах и условиях измерений, а также с разработкой подходов к созданию математического обеспечения интеллектуальных измерений. В данном контексте математическое обеспечение интеллектуальных измерений понимается как совокупность формализованных описаний (математических моделей) объектов, условий, процедур и средств измерений и их метрологических характеристик. При этом имитационные математические модели объектов измерений рассматриваются как элемент математического (алгоритмического или метрологического) обеспечения измерительных процедур.

Имитационные математические модели технических объектов находят в системах, использующих интеллектуальные средства измерений, двойное применение. Имитационная модель, используемая в алгоритмах измерений, рассматривается как эталонный (идеальный) процесс, функционирующий в режиме реального времени синхронно с процессом, который является объектом измерения или управления. Различия между эталонным (модельным) и реальным процессом рассматриваются как информативный параметр, подвергаемый дальнейшему анализу и интерпретации.

На рисунках иллюстрируется структура применяемых в системах управления механической обработкой [3] интеллектуальных средств измерений, использующих эталонную имитационную модель объекта измерений в качестве элемента алгоритмического обеспечения (ИП — измерительный преобразователь; П — числовой измерительный преобразователь). При построении схем использовался аппарат формализации измерительных процедур. На рис. 1 представлена схема средства, использующего эталонную модель, построенную на основе исходных данных о поведении объекта измерений.

Алгоритм вычисления значений параметров λ_p , функционально связанных с входными параметрами $\gamma_i(t_j)$ ($i = 1, \dots, m$), определяется характером входного сигнала $\{\alpha_i, f_s(t, r)\}$, условиями функционирования средства измерений $\{\beta_k, \varphi_m(t, l)\}$ и характеристиками требований и ограничений $\{\gamma_n, \psi_q(t, u)\}$. Алгоритм измерения в данном случае понимается как алгоритм идентификации и реализации оптимального преобразования $\{\xi_{i,j}^3\} \rightarrow \{\lambda_{p,j}^*\}$, где $\{\xi_{i,j}^3\}$ — полученное в результате измерительных преобразований множество значений параметров процесса, эталонные (модельные) значения которых могут быть определены путем имитационного моделирования поведения объекта измерений. Основанием для выбора алгоритма измерений служат результаты анализа множества мер близости $\{d\xi_{i,j}\}$ между экспериментальными (измеренными) $\{\xi_{i,j}^3\}$ и модельными

$\{\xi_{i,j}^M\}$ оценками параметров измеряемого процесса, отнесенными к его t_j -му сечению. Числовые измерительные преобразования Π_1 — Π_5 выполняются процессорной частью интеллектуального средства измерений.

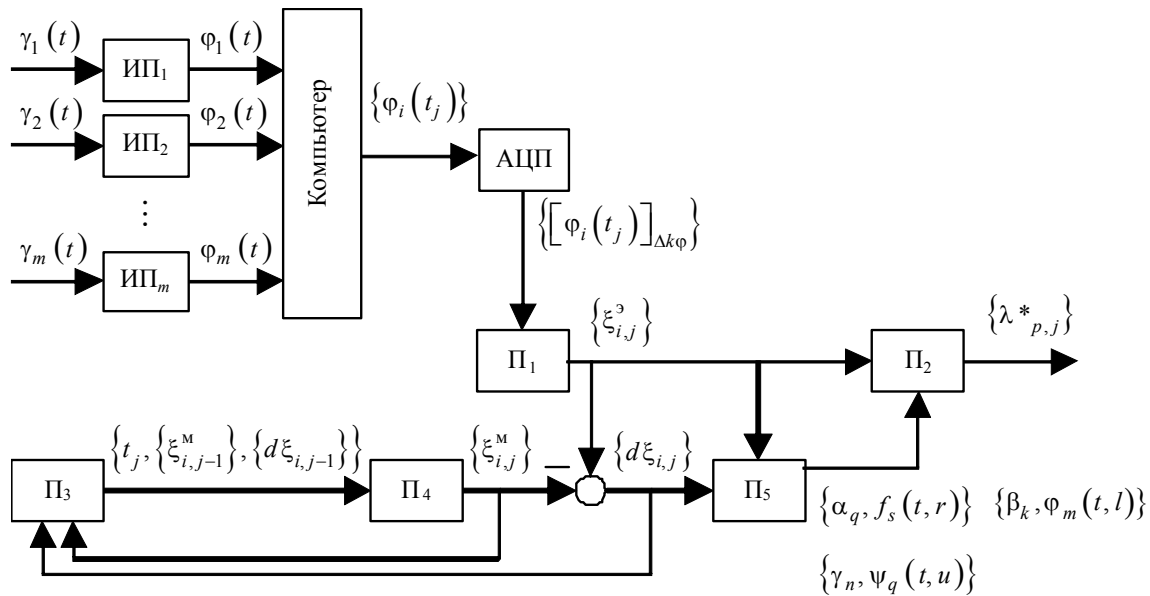


Рис. 1

Специфика интеллектуального средства измерений (см. рис. 1) обусловлена фактической независимостью функционирования подсистемы моделирования (Π_3, Π_4) и измерительной процессорной подсистемы (Π_1, Π_2, Π_5). Обратная связь, служащая для передачи множества значений $\{d\xi_{i,j}\}$ на вход Π_3 , может быть исключена, если в модели поведения объекта измерений не требуется учет степени текущего рассогласования между $\{\xi_{i,j}^3\}$ и $\{\xi_{i,j}^M\}$. При этом вектор $\{\xi_{i,j}^M\}$ строится на основе отображения $\{t_j, \{\xi_{i,j-1}^M\}\} \rightarrow \{\xi_{i,j}^M\}$.

На рис. 2 представлена структура интеллектуальной измерительной системы, построенной на принципах самообучения. При работе в режиме обучения (рис. 2, а) результаты измерения значений входных параметров $\gamma_i(t_j, \omega)$ ($i = 1, \dots, m; \omega = 1, \dots, \Omega$; здесь ω — номер измеряемого процесса в обучающей последовательности) позволяют построить математическую модель исследуемого процесса $\{\alpha_q, f_s(t, r)\}$ и модель условий функционирования средства измерений $\{\beta_k, \varphi_m(t, l)\}$.

Полученные результаты моделирования используются в дальнейшем для оценки меры рассогласования $\{\xi_i(t_j)\}$ между эталонным и реальным процессом (рис. 2, б). На основе множества значений $\{\xi_i(t_j)\}$ определяются оценки измеряемых величин $\{\lambda_{p,j}^*\}$.

В системах измерения и управления процессами механической обработки [4, 5] находят применение не только представленные на рис. 1 и 2 интеллектуальные средства измерений. Однако большинство структур отличаются от описанных рядом второстепенных признаков (цифровая коммутация в схеме рис. 1, применение операторов осреднения $S_{i\omega}(\cdot)$ к заранее

сформированной совокупности характеристик измеряемого процесса $\left\{ [\varphi_i(t_j, \omega)]_{\Delta k \varphi q} \right\}_\omega$

рис. 2 и т.д.).

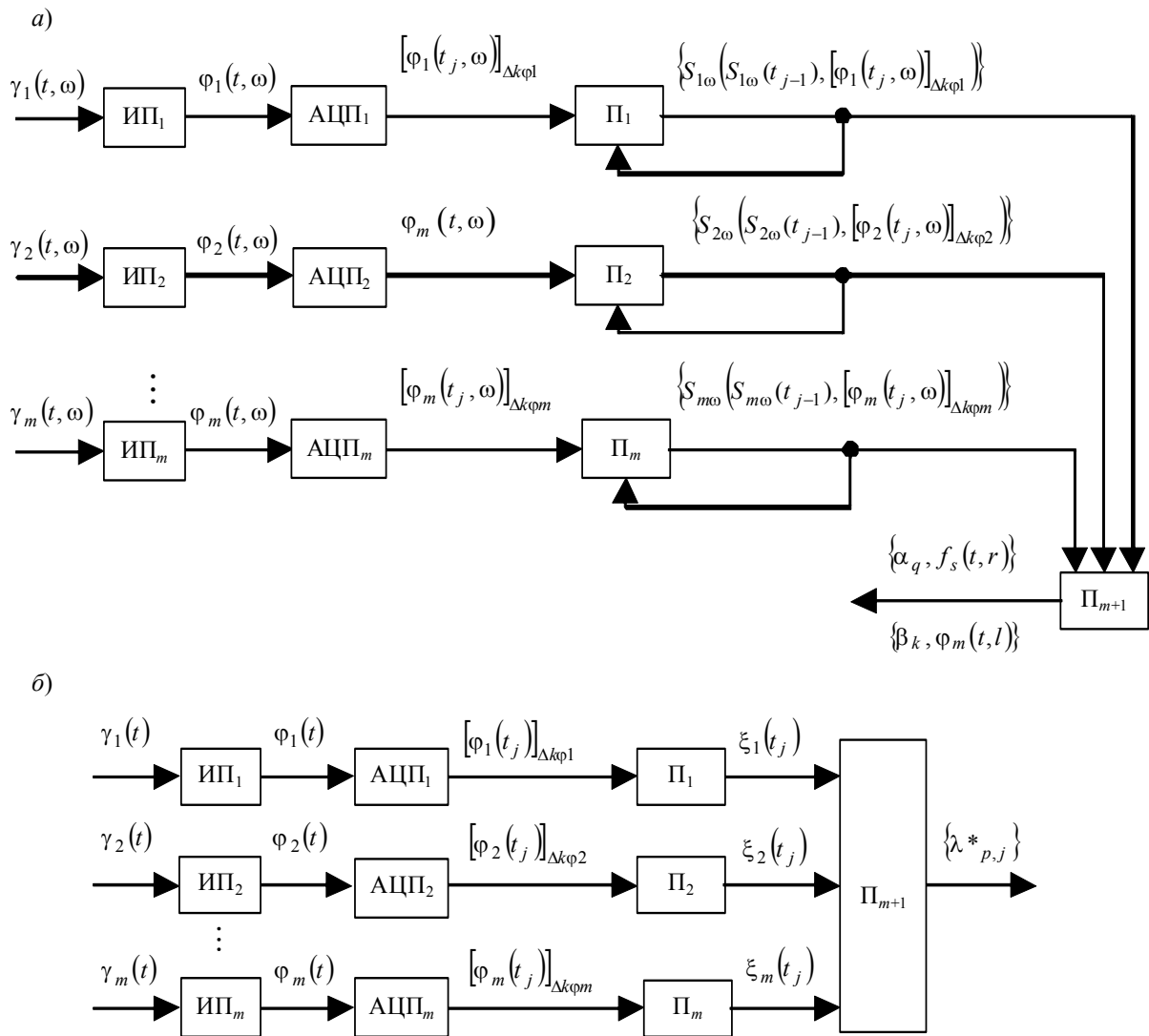


Рис. 2

Множество возможных алгоритмов функционирования „старших моделей“ интеллектуальных средств измерений может быть открытым (потенциально бесконечным). Вследствие этого средство измерений такого класса не может быть охарактеризовано конечным множеством значений метрологических характеристик. Задача выбора эффективного измерительного алгоритма рассматривается как задача оптимизации метрологических характеристик, каждая из которых является функционалом, определенным на множестве параметров допустимых алгоритмов $\{A_i\}$, множестве параметров входных сигналов $\{\alpha_i, f_s(t, r)\}$ и условий функционирования средства измерений $\{\beta_k, \varphi_m(t, l)\}$. Необходимость решения задач такого класса приводит к тому, что основная область интересов смещается с разработки аппаратных решений информационно-измерительных систем к разработке методов оптимизации алгоритмического обеспечения измерений и созданию методов оценки его метрологических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В. Н., Соболев В. С., Цветков Э. И. Интеллектуальные средства измерений. М.: РИЦ „Татьянин день“, 1994. 280 с.
2. Токарев В. В. Имитационная математическая модель геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования. Метрологические аспекты и алгоритмическое обеспечение. Дис. ... канд. техн. наук. Волгоград: ВолгГТУ, 1998. 275 с.
3. Цветков Э. И. Алгоритмические основы измерений. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 254 с.
4. Бронштейн Г. В., Городецкий М. С., Гордон Е. Р. и др. Адаптивное управление металлорежущими станками. М.: НИИМАШ, 1973. 227 с.
5. Токарев В. В., Скребнев Г. Г. Математическое моделирование процессов резания, режущего инструмента и АСНИ: Учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 1998. 75 с.

Сведения об авторе**Станислав Сергеевич Резников**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: stanich@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроникиПоступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 519.8

С. А. АСТАФЬЕВ, Д. Ю. ЛЫСЕНКО, А. С. ШИРОКОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ**

Представлена программа, позволяющая моделировать процесс распространения лесного пожара на основе данных, получаемых при беспилотном наблюдении за местностью. В программе применен перколяционный подход к прогнозированию, дающий возможность учитывать вероятность распространения огня в различных направлениях.

Ключевые слова: прогнозирование пожара, программа для моделирования, перколяция, вероятность распространения огня.

Введение. Проблема лесных пожаров (ЛП) очень актуальна для России, поскольку лесной фонд занимает примерно 70 % территории страны. В борьбе с пожарами важную роль играет их раннее обнаружение с последующим прогнозированием процесса распространения огня.

Наблюдение с воздуха позволяет в короткие сроки охватить значительные территории, предоставляет актуальную информацию о расположении потенциальных и реальных очагов возгорания. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляется наиболее перспективным направлением в области создания комплексов для контроля за лесными пожарами.

Комплекс мониторинга и прогнозирования ЛП, функционирующий на основе данных, поступающих с БПЛА, предназначен, в первую очередь, для использования в подразделениях МЧС с целью экстренного планирования мероприятий по ликвидации пожара на основе определения контура возгорания, расчета протяженности фронта пожара и площади пожара, определения направления распространения огня.

БПЛА по заданному маршруту облетает район, комплекс мониторинга и прогнозирования ЛП заносит координаты потенциальных очагов возгорания на карту, указывая степень

вероятности возникновения пожара. Чем больше анализируемых признаков свидетельствует о пожаре, тем выше вероятность.

Программа, предназначенная для моделирования процесса распространения ЛП на основе информации о скорости и направлении ветра и данных, полученных по результатам обработки аэрофотоснимков местности, является составной частью комплекса. Разработанная программа позволяет решать следующие задачи:

- прогнозирование направления и скорости распространения ЛП;
- определение контура и площади ЛП на заданный момент времени.

Необходимо учитывать, что такие встречающиеся на пути распространения огня объекты, как река, озеро, дорога, просека, противопожарный ров, болото и т.п., изменяют скорость продвижения пожара в заданном направлении, тем самым, формируется индивидуальная форма кромки пожара. Реальная скорость продвижения пожара может значительно отличаться от среднестатистической, приведенной в методике МЧС [1].

Алгоритм расчета скорости по методике МЧС в представленной программе усовершенствован путем использования вероятностного подхода теории перколяции.

Теория перколяции находит применение в решении следующих задач о регулярном движении в случайной среде [2]:

- описание процесса распространения пожара (задача связей);
- описание процесса полимеризации — образования геля (задача узлов);
- распространение эпидемий (задача связей).

Вероятность образования связей — распространения пожара в определенном направлении — зависит от множества параметров, например, силы и скорости ветра, влажности и температуры воздуха, плотности лесных насаждений, свойств древесины, рельефа местности и т.д.

Описание разработанной программы. Программа для моделирования процесса распространения лесного пожара разработана в пакете MatLab 7.0.1 (R14) SP1.

В результате обработки аэрофотоснимка местности выполняется:

- разбиение его на отдельные квадраты (ячейки), отражающие информацию о соответствующих участках реальной местности;
- определение индивидуальных характеристик каждой ячейки (цветность, яркость и т.п.) с применением алгоритма обработки изображения с цветовым распознаванием в RGB-пространстве. Выделить огонь на фоне других близких по цвету объектов возможно, используя его динамические характеристики. Для решения задачи фильтрации по временному изменению интенсивности необходимо перейти к цветовому пространству HSV (тон, насыщенность, яркость);

— сопоставление характеристик ячеек с вероятностью распространения огня (например, синий оттенок воды — 0, желтая листва — 60 % и т.п.), т.е. получение „образа перколяционной решетки“ (матрицы показателей вероятностей распространения огня). Подобную матрицу при условии ее координатной привязки к аэрофотоснимку возможно использовать для определения скорости распространения кромки пожара в различных направлениях. Задачу следует решать с применением экспертных оценок и динамического обновления данных.

Определить вид пожара можно, используя описание, приведенное в методике [1]. Для низовых пожаров характерна вытянутая форма с неровной кромкой, цвет дыма — светло-серый. При верховом пожаре огонь распространяется по кронам и стволам деревьев, форма при беглом верховом пожаре вытянута по направлению ветра, дым — темный.

Исходными данными для моделирования процесса распространения ЛП являются:

- 1) скорость ветра (V_v , м/с);
- 2) направление ветра относительно условного „нулевого“ направления, связанного с геопривязанным аэрофотоснимком (α , °);
- 3) вид пожара (1 — низовой, 2 — верховой);

4) класс горимости (1 — хвойный лес с примесью лиственных пород, 2 — лиственный лес с примесью хвойных пород);

5) класс пожарной опасности погоды (K);

6) масштабный коэффициент ($scale$) используемой в модели ячейки, определяющий расстояние на реальной местности, соответствующее стороне ячейки;

7) матрица со значениями вероятности распространения огня, полученная в результате обработки аэрофотоснимка ($VerFire$);

8) координаты очага возгорания (i, j);

9) длительность времени прогноза (T, c).

Для оценки пожарной опасности погодных условий в лесах используется комплексный показатель, который учитывает основные факторы, влияющие на пожарную опасность лесных массивов.

Комплексный показатель пожарной опасности определяется по формуле [1]:

$$K = \sum_1^n (T_0 - \tau) T_0,$$

где T_0 — температура воздуха на 12 часов по местному времени; τ — точка росы на 12 часов (дефицит влажности); n — число дней, прошедших после последнего дождя.

Выделяют следующие классы пожарной опасности погоды: I класс ($K < 300$) — отсутствие опасности; II класс ($300 < K < 1000$) — малая; III класс ($1000 < K < 4000$) — средняя; IV класс ($4000 < K < 12\,000$) — высокая; V класс ($K > 12\,000$) — чрезвычайная пожарная опасность.

Моделирование в программе осуществлялось с использованием (20×20) -матриц, что при масштабном коэффициенте $scale = 30$ соответствует области 600×600 м на реальной местности.

Характер распространения ЛП в направлениях фронта (наиболее быстро распространяющаяся в направлении ветра огневая кромка), тыла (двигающаяся против ветра кромка) и флангов пожара (перпендикулярно ветру) в достаточной степени изучен. Соответствующие значения скорости распространения огня можно получить из методики [1] на основе анализа статистических данных лесных хозяйств России за определенный промежуток времени.

В разработанной программе определяются скорости распространения фронта (V_{ϕ}), флангов ($V_{\phi л}$) и тыла ($V_{т}$) пожара в зависимости от скорости ветра ($V_{в}$), класса горимости насаждений и класса пожарной опасности погоды (K) для низового и верхового пожаров на основе зависимостей, приведенных в методике МЧС. Пример графика зависимости линейной скорости распространения фронта низового пожара от скорости ветра для насаждений 1-го класса горимости приведен на рис. 1 (римскими цифрами обозначены классы пожарной опасности погоды).

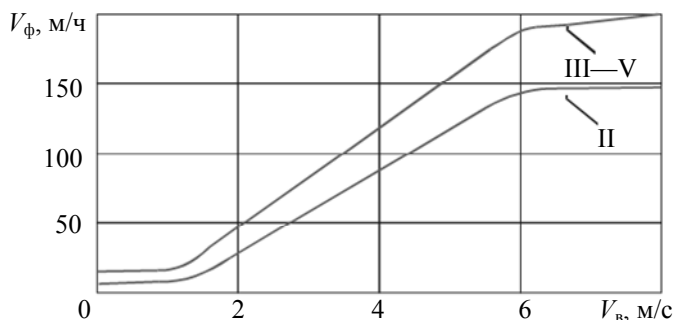


Рис. 1

Далее в программе определяется скорость распространения пожара в восьми заданных направлениях. Пример векторной диаграммы для определения скорости распространения огня в направлении $0, 45, 90, 135, 180, 225, 270$ и 315° приведен на рис. 2.

Перколяционный подход к прогнозированию процесса распространения пожара состоит в вычислении матриц скорости распространения пожара с учетом вероятности рас-

пространения огня в заданном направлении. Данный подход основан на поэлементном перемножении матриц скорости и матрицы вероятности распространения огня (*VerFire*), смещенной на одну ячейку в одном из восьми заданных направлений.

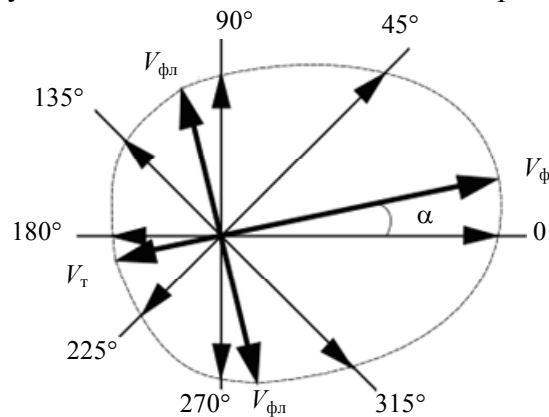


Рис. 2

Выходными данными программы являются:

- 1) визуализированная матрица пожара: 0 — отсутствие огня (ячейка белого цвета); 1 — наличие огня (ячейка черного цвета);
- 2) матрица значений времени возгорания отдельных областей относительно времени начала пожара;
- 3) площадь пожара ($S, \text{м}^2$) — произведение числа ячеек, для которых определено возгорание, на квадрат масштабного коэффициента (*scale*).

На рис. 3 представлен результат моделирования процесса распространения низового пожара при скорости ветра 6 м/с в направлении 100° относительно условного „нулевого“ направления для леса первого класса горимости и III класса пожарной опасности погоды через 2, 3 и 4 часа после возгорания соответственно.

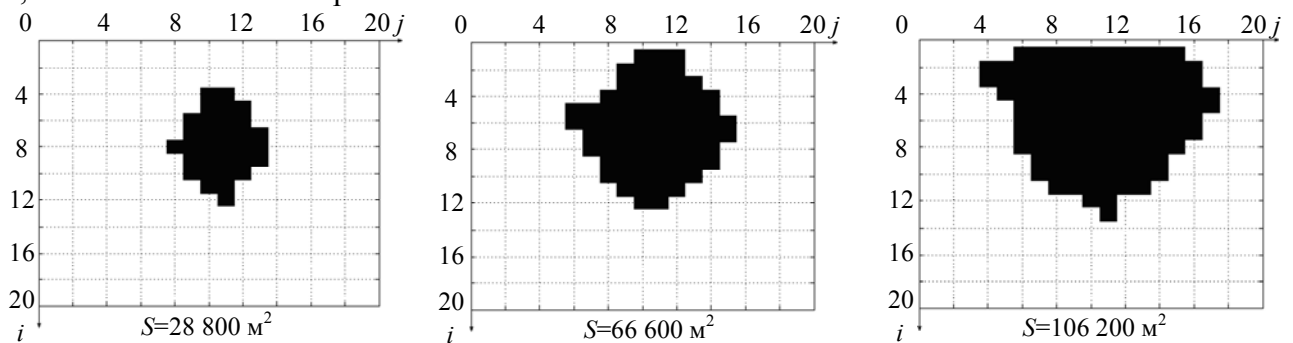


Рис. 3

Заключение. Разработана программа для моделирования процесса распространения ЛП от очага возгорания. Применение вероятностного подхода теории перколяции в дополнение к стандартной методике МЧС позволяет учесть в процессе моделирования неоднородность местности.

При использовании полученной визуализированной матрицы пожара в качестве одного из слоев в геоинформационной системе возможно получить картину пожара с учетом пространственной привязки к ортофотоплану местности.

Дальнейшее усовершенствование разработанной программы требует:

- определения зависимости скорости распространения пожара от рельефа местности и соответственно разработки методики получения матриц с данными о рельефе местности;
- оптимизации алгоритма обработки матрицы, моделирующей процесс распространения пожара, с целью замены поэлементной обработки матрицы, при которой время работы

программы линейно возрастает с увеличением количества элементов, на обработку матрицы в направлении от очага пожара с применением теории графов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахрамьян М. А., Низметов Г. М. Методика оперативной оценки последствий лесных пожаров. М.: ВНИИ ГОиЧС, 2001. 32 с.
2. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: Учебное пособие. М.: Едиториал УРСС, 2002. 112 с.

Сведения об авторах

- Сергей Алексеевич Астафьев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: Rokkolo287@yandex.ru
- Дмитрий Юрьевич Лысенко** — ЗАО „Транзас“, Санкт-Петербург; руководитель группы Менеджеров проектов; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Анатолий Сергеевич Широков** — ЗАО „Транзас“, Санкт-Петербург; ведущий инженер-конструктор; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.

УДК 681.518.3

И. И. КАЛАПЫШИНА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТЕКОЛ

Рассматривается динамика механизма для обработки оптических стекол. Представлены дифференциальные уравнения движения механизма. Для моделирования уравнений узла шлифовки оптических элементов в пакете MatLab применен редактор дифференциальных уравнений DEE.

Ключевые слова: оптические стекла, дифференциальное уравнение, автоматизированный анализ, имитационное моделирование.

Введение. Для изготовления оптических деталей наблюдательных приборов, фотографических и проекционных аппаратов используются разные типы и марки стекла, включая стекла для светофильтров и кварцевое стекло. Различные классы оптических систем требуют разной точности обработки поверхностей стекол. Оптические системы с дифракционно-ограниченным качеством изображения, которые используются, например, для космических и прецизионных телескопов, биноклей, микроскопов, требуют более высокого класса обработки, чем оптические системы с абберационно-ограниченным качеством изображений [1]. Так, например, при обработке оптических кристаллов, таких как германий, кремний, флюорит, оптическое производство обязано выдерживать уровень шероховатости поверхности не более 2,5 нм, а в некоторых кристаллах, например фтористом кальции, требования по шероховатости еще выше — 1,1 нм. Однако при изготовлении оптических стекол автоматизированный анализ качества поверхности не производится. В условиях производства проверка поверхностей осуществляется при помощи цеховых образцов различного качества, для этого требуется прервать процесс обработки, разорвать кинематическую схему, а затем ее восстановить. Такая технология увеличивает время изготовления одного элемента и повышает вероятность брака. Поэтому целью настоящей работы является поиск метода, который позволит в процессе обработки оценивать текущее качество поверхности при помощи аналитических функций.

Кинематическая схема. На рис. 1, *а* приведено схематичное изображение шлифовального станка, *б* — кинематическая схема узла шлифовки оптического стекла.

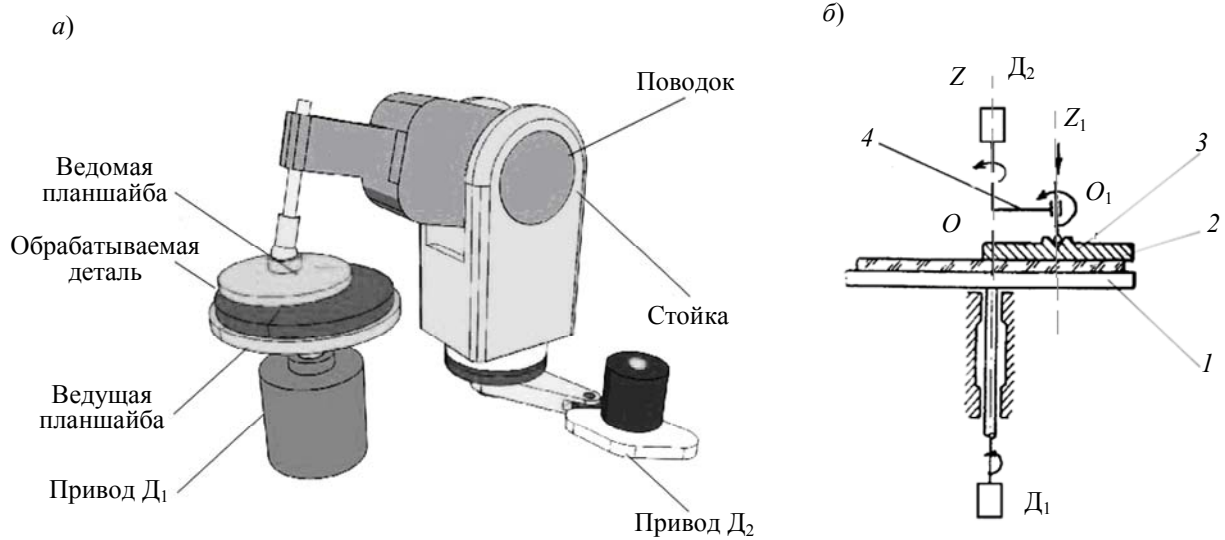


Рис. 1

Ведущее звено механизма — нижняя планшайба (ведущая) 1, на ней размещается обрабатываемая деталь 2. Верхнее звено — ведомая планшайба 3, или абразивный инструмент, он вращается относительно оси OZ за счет двигателя D_2 . Также планшайба совершает дополнительный поворот вокруг собственной оси O_1Z_1 за счет сил смешанного трения, которые возникают в области контакта. Поводок 4 состоит из Г-образного стержня, на его вход подается вращательный момент от электродвигателя D_2 , на выходе жестко закреплен полый цилиндр, вертикальная ось которого совмещена с валом инструмента. Электропривод D_1 вращает ведущее звено и закрепленную на нем жестко, при помощи смол, обрабатываемую деталь (она может находиться в закрепленном положении, а также получать дополнительный вращательный момент от ведущей планшайбы 1). Под действием электропривода D_2 верхняя планшайба вместе с поступающей к ней эмульсией, содержащей абразив, вращается вокруг оси поводка OZ [2]. В результате процессов трения между обрабатываемой поверхностью и ведомой планшайбой обрабатываемая деталь 3 вращается вокруг собственной оси O_1Z_1 . Также она получает дополнительное вращение за счет ведущей планшайбы 1 и вязкой эмульсии между ними.

Структура дифференциальных уравнений движения узла шлифовки. При составлении дифференциальных уравнений смешанное трение имитировалось с помощью демпфирующих и упругих элементов [3]. Кинематическая схема была интерпретирована в модель, ведущая и ведомая планшайбы, а также обрабатываемая деталь которой обладают свойствами идеальных тел, инерцией и массой (для упрощения они названы: первое, третье и второе тело соответственно). Исключены из расчета движущий момент от D_2 и вращение ведомой планшайбы относительно оси OZ . За обобщенные координаты в уравнениях приняты возможные перемещения относительно координатных осей для каждого тела. Между телами размещены элементы, содержащие упругую составляющую и вязкое сопротивление, которое характеризуется коэффициентом демпфирования [3]. Дифференциальные уравнения, описывающие динамику узла шлифовки, станка для обработки оптических стекол, представляют собой систему уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{q}_1 &= f(t) + M_{dv} - a\dot{q}_1 - kq_1, \\ J_2 \ddot{q}_2 &= f(t) - a(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k(q_2 - q_1), \\ J_3 \ddot{q}_3 &= f(t) - a(\dot{q}_3 - \dot{q}_2) - k(q_3 - q_2), \\ m\ddot{q}_4 &= f(t) + F_{\text{трв}} - F_{\text{тр}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где J_n — момент инерции n -го тела; M_{dv} — движущий момент двигателя D_1 ; $q_1 = \varphi_1^{OZ}$ — вращение ведущей планшайбы относительно оси OZ ; $q_2 = \varphi_2^{OZ}$ — вращение обрабатываемой детали относительно оси OZ ; $q_3 = \varphi_3^{O_1Z_1}$ — вращение ведомой планшайбы относительно оси O_1Z_1 ; $q_4 = x_2$ — перемещение обрабатываемой детали; q_n — обобщенная координата n -го тела, $f(t)$ — внешнее воздействие, $F_{\text{трв}}$ — сила вязкого трения, $F_{\text{тр}}$ — сила сухого трения.

Для моделирования уравнений движения узла шлифовки оптических элементов в пакете MatLab применен редактор дифференциальных уравнений DEE, схема моделирования представлена на рис. 2 [4], для ее построения были введены соответствующие „машинные“ переменные:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= x(1); & q_1 &= x(2); \\ \dot{q}_2 &= x(3); & q_2 &= x(4); \\ \dot{q}_3 &= x(5); & q_3 &= x(6); \\ \dot{q}_4 &= x(7); & q_4 &= x(8); \\ u(1) &= f(t) = A_0 \sin(\omega t + \delta). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В результате замены переменных система уравнений (1) приобрела следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q}_1 &= (u(1) + M_{dv} - ax(1) - kx(2)) / J_1, \\ \ddot{q}_2 &= (u(1) - a(x(3) - x(1)) - k(x(4) - x(2))) / J_2, \\ J_3 \ddot{q}_3 &= (u(1) - a(x(5) - x(3)) - k(x(6) - x(4))) / J_3, \\ m\ddot{q}_4 &= u(1) + F_{\text{трв}} - F_{\text{тр}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

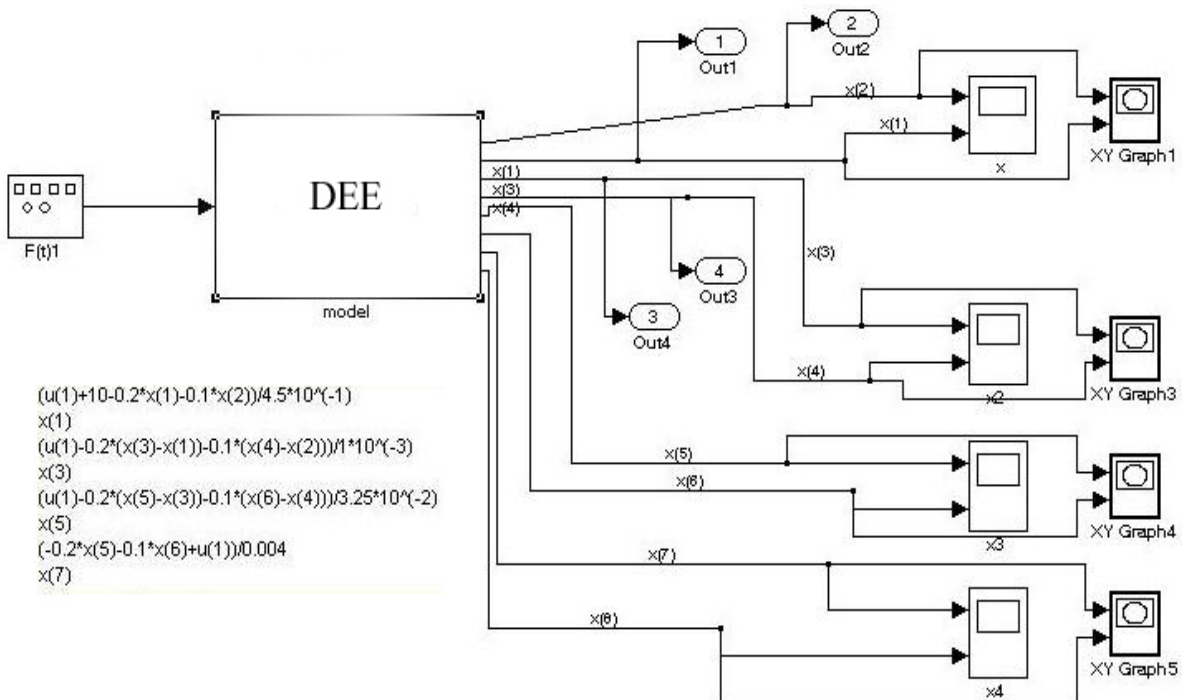
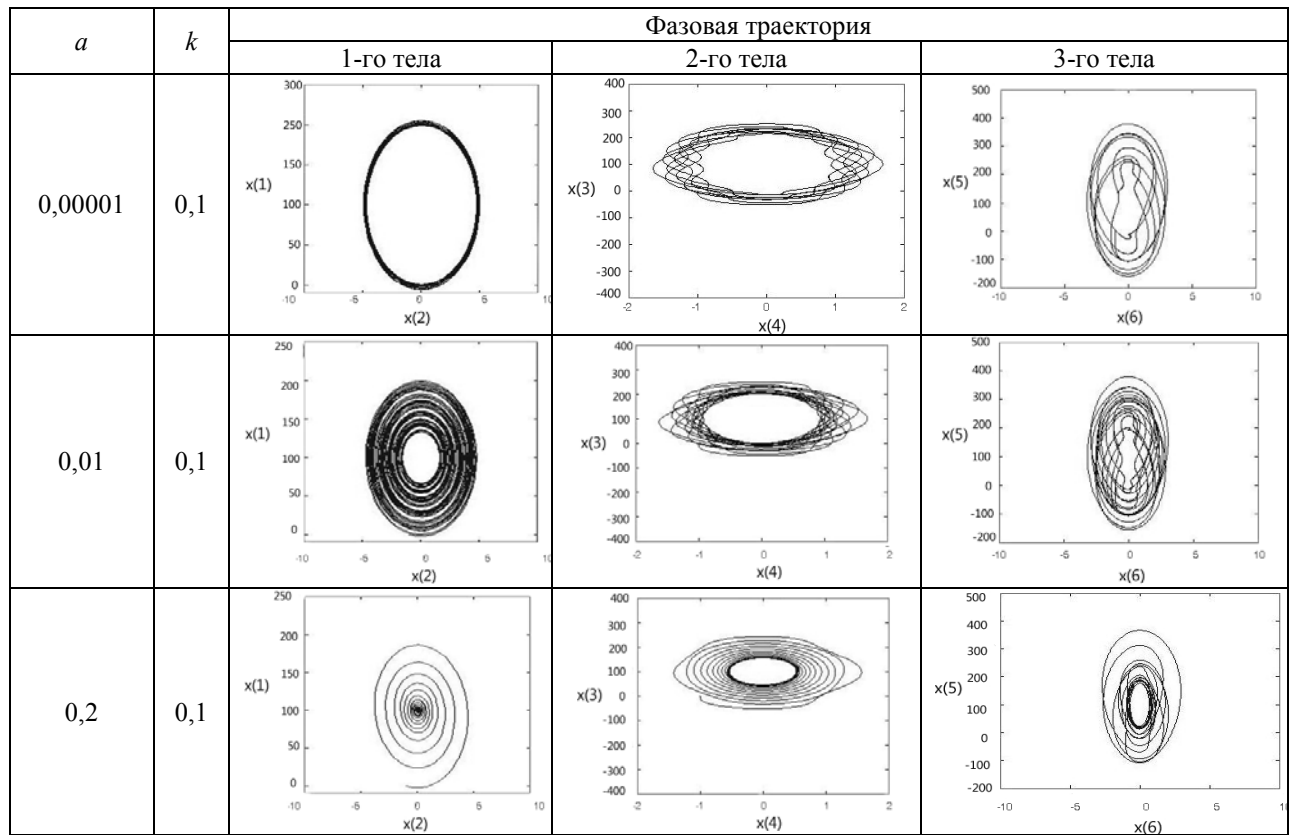


Рис. 2

Результаты решения уравнений в виде фазовых пространств представлены в таблице.



Заключение. Решение системы дифференциальных уравнений (1) позволило наглядно представить эволюцию поведения скоростей ведущей планшайбы, обрабатываемой детали и ведомой планшайбы при изменении коэффициента демпфирования и упругой составляющей, а следовательно, и параметров контактного взаимодействия между телами. В процессе моделирования динамика системы изменялась от устойчивого состояния, когда фазовые пространства подсистем представляли собой центр, до неустойчивого, когда фазовые пространства подсистем видоизменялись в устойчивый, а затем в неустойчивый фокусы под воздействием внешней синусоидальной нагрузки. Таким образом формируется база данных теоретических и практических результатов, использование которой позволит прогнозировать состояния поверхности в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб: Лань, 2010. 303 с.
2. Горбач В. Л. Кинематика рабочих органов оптических шлифовально-полировальных станков. М., 1958. 110 с.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
4. Лазарев Ю. В. Моделирование в системе Matlab. М., 2000. 511 с.

Сведения об авторе

Ирина Ивановна Калапышина

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: weir521@yandex.ru

Рекомендована кафедрой мехатроники

Поступила в редакцию 29.02.12 г.

SUMMARY

P. 7—15.

STUDY OF PIEZOELECTRIC ACTUATORS OF A MICROROBOT

Tubular piezoelectric actuators of microrobot based on spherical joint with parallel kinematics are considered. The effect is revealed of the ball rotation caused by the piezoactuator asymmetry when operated at ultrasonic resonance frequencies. The ball motion parameters are calculated. Technology of the actuators manufacturing is analyzed, advantages of application of ultrasonic shaping of the tubes are demonstrated.

Keywords: tubular piezoactuator, microrobot, ball, harmonic oscillations, dissymmetry, calculation of parameters, ultrasonic shaped piezotube, spherical joints.

Data on authors

- Pavel Yu. Gedko* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Automatic Machinery; E-mail: choppepper@list.ru
- Arkady B. Smirnov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Automatic Machinery; E-mail: 123smirnov@list.ru
- Sergey I. Pugachev* — Dr. Techn. Sci., Professor; State Marine Technical University of St. Petersburg, Department of Physics; E-mail: spugachev@bk.ru
- Eugeny Yu. Rytov* — Cand. Techn. Sci.; State Marine Technical University of St. Petersburg, Department of Physics; E-mail: physics_spbmtu@mail.ru

P. 15—19.

SYSTEMIC PROBLEMS OF SCANNING DEVICE DESIGN FOR UNDERGROUND CAVITIES

The basic challenges in design of devices for underground well scanning are described. The issues under consideration include development of the drive, sealing systems, power electronics, and navigation. Resolution of the issues is shown to provide a significant increase in the device characteristics.

Keywords: down-hole device, echolocation, logging.

Data on authors

- Mikhail A. Nozdrin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics
- Andrey A. Kraskovsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: 684@bk.ru
- Yury S. Monakhov* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; Senior Lecturer; E-mail: monahovv@yandex.ru

P. 20—23.

ESTIMATION OF INSTRUMENT METROLOGICAL RELIABILITY FROM GROUP TESTING DATA

An algorithm for calculation of metrological reliability parameters of instruments on the base of various tests data is presented. The algorithm employs the effective criterion called the metrological reliability safety factor.

Keywords: probability, degradation, metrological reliability, testing, accuracy, tools, cycles, drift, correlation.

Data on author

Leonid V. Efremov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Engineering Institute, Department of Abrasive Technologies; E-mail: levlefr@mail.ru

P. 24—30.

CALCULATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HELICAL ANISOTROPIC ROD SCREW ELEMENTS

An algorithm for calculating the elastic constants of helical anisotropic rod screw elements on the base of optimization methods is presented. A cable is considered as an example of helical anisotropic rod. The elastic constants of the cable are calculated by minimization of a functional in preset intervals of the Poisson ratio values.

Keywords: helical anisotropic rod, integral elastic constants, cable, optimization methods.

Data on authors

Victor M. Musalimov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musvm@yandex.ru

Georgy B. Zamoruev — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: georgyz09@gmail.com

Anna D. Perechesova — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: perechesova@gmail.com

P. 30—33.

FORMATION OF SURFACE RELIEF UNDER FRICTION

Experimental study of initial stage of abrasive processing of aluminum oxide single crystal demonstrates a cyclic variation in the surface relief. The amplitude-modulated process of surface roughness modification is shown to be characterized by carrier and modulation frequencies derivable from experimental data.

Keywords: friction, wear, burn-in, surface profile, sapphire single crystal, roughness.

Data on authors

Sergey V. Sychev — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Machine-Building Technology; E-mail: Sychou@yandex.ru

Yury A. Fadin — Dr. Techn. Sci.; Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg; Head of Laboratory; E-mail: fadinspb@yandex.ru

P. 33—38.**PROBLEMS OF NEW RUSSIAN STANDARDS COMPATIBILITY WITH THE ISO RECOMMENDATIONS**

The necessity of elaboration of new standards on the base of GOST 1643-81 in agreement with ISO recommendations is justified. Comparison of GOST 1643-81 and GOST 21098-82 with ISO standards (ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997) is carried out; advantages and disadvantages of GOST 1643-81 are considered.

Keywords: toothed gears, gearings, gear quality, compound-chain mechanism, standards, GOST 1643-81, ISO 1328, GOST 21098-82.

Data on authors

- Boris P. Timofeev** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: mechatronic@mail.ifmo.ru
- Mikhail V. Abramchuk** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; Senior Lecturer; E-mail: amv76@list.ru

P. 38—42.**ON CERTIFICATION OF OFFICERS FOR VERIFICATION OF OPTIC-ELECTRONIC MEASURING TOOLS**

Theoretical background for estimation of subjective error in pointing visual analyzing gage is presented. The main objectives of visual analyzer are considered, characteristics of operator eye movements are analyzed.

Keywords: saccadic eye movements, drift, tremor, visual analyzer, technical sight, checking.

Data on author

- Eugeny A. Vorontsov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru

P. 42—46.**CALCULATION OF THE STRESS INTENSITY FACTORS FOR PIEZOELECTRIC PLATE**

Stress intensity factors for surface crack in piezoelectric plate are derived from calculated stress for piezoelectric plate without the crack. The calculations are carried out with the use of Erie function equations and a correction factor for the body finiteness.

Keywords: piezoelectric plate, stress intensity factor, correction factor.

Data on author

- Anna V. Amvrosieva** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: destyni@mail.ru

P. 46—50.

AN OPTOELECTRONIC CONVERTER OF POSITION OF CROSS-SECTION OF ELASTIC ELEMENT ON MOBILE INTERFACE

A mechatronic module incorporating optoelectronic converter of small image shift with means for linear movement of mechanical system is proposed. The module allows for resolution of 10^{-5} mm shift from a given deflection of elastic microelements with small flexural rigidity. The total relative error of the optoelectronic converter on a mobile interface comprises 0,09 %.

Keywords: interface, converter, elastic element, optocoupler, error.

Data on author

Vladimir V. Bindyuk — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: bvvspb@yandex.ru

P. 51—56.

APPLICATION OF IMAGE ANALYSIS ALGORITHMS FOR FIRE DETECTION

Existing methods of fire detection using both algorithms of computer vision and digital image processing are described, benefits and drawbacks of the methods are considered. The problem of staff training and coordination of actions within fire control is addressed.

Keywords: technical vision, image recognition, fire detection, algorithm.

Data on authors

Artem O. Kuznetsov — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: ak@smartsport.org

Victor M. Musalimov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musvm@yandex.ru

Alexey P. Saenko — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: alexey.saenko@gmail.com

Konstantin V. Trambitsky — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: tr-kostya@ya.ru

P. 57—62.

ENUMERATIVE CLASSIFICATION OF SCANNING PROBE MICROSCOPY DATA

A new method for enumerative classification of scanning probe microscopy data is proposed. The method is based on Morse polynomials and capabilities of enumerative combinatorial analysis.

Keywords: classification of scanning probe microscopy data, Morse polynomials, permutations.

Data on authors

Victor M. Musalimov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musvm@yandex.ru

Pavel P. Kovalenko — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: kovalenko_p.p@mail.ru

Svetlana Yu. Perepelkina — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; Senior Lecturer; E-mail: sker@pochtamt.ru

P. 63—65.**A METHOD FOR DYNAMIC VISION ACUITY ASSESSMENT**

An instrument for measuring the dynamic vision acuity (DVA) is developed. Application of the instrument allows to eliminate the frequency error caused by screen flicker and inertia. A model of the instrument is used for determination of the DNA in 40 patients; the results are compared with independent measurements data.

Keywords: assessment of vision acuity, static visual acuity, dynamic visual acuity, optotypes.

Data on author

Yulya A. Rotz — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics

P. 66—70.**METROLOGICAL ASPECTS OF IMITATION MODELING OF TOOTH-WHEEL CUTTING**

The possibility is considered of application of intelligent measurements theory to the problem of imitation modeling of tooth-wheel cutting.

Keywords: imitation modeling, tooth-wheel, intelligent measurements.

Data on author

Stanislav S. Reznikov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: stanich@mail.ru

P. 70—74.**MODELING OF FOREST FIRE SPREAD WITH THE USE OF PERCOLATION THEORY**

A prototype program for simulation of forest fire spread on the base of data obtained with unmanned monitoring of the area is presented. Percolation approach to fire prediction is applied allowing for consideration of probability of the fire spread in a given direction.

Keywords: prediction of fire, simulation program, percolation, probability of fire spread.

Data on authors

Sergey A. Astafiev — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: Rokkolo287@yandex.ru

Dmitry Yu. Lysenko — ZAO Transas, St. Petersburg; Head of Project Managers;
E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com

Anatoly S. Shirokov — ZAO Transas, St. Petersburg; Leading Engineer-Designer;
E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com

P. 74—77.**MODELING OF MACHINE DYNAMICS FOR MACHINE PROCESSING OF OPTICAL GLASS**

Dynamics of machine for optical glass processing is considered. Differential equations to describe the mechanism motion are derived. Model equations are applied for simulation of optical glass polishing machine operation under external sinusoidal influence in MatLab with the use of Differential Equation Editor.

Keywords: optical glass, differential equation, automate analysis.

Data on author

Irina I. Kalapyshina — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: weir521@yandex.ru