

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редколлегия

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

Заместители главного редактора

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

Члены редколлегии

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

Ответственный за выпуск

Григорьева О.Ю.

Адрес редколлегии

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 (4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03
www.ostu.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

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

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса России»

© ОрелГТУ, 2010

Содержание

Естественные науки

<i>Желтков В.И., Волкова Я.Ю., Бородкин Н.Н.</i> Модель образования шероховатости при токарной обработке....	3
<i>Фроленкова Л.Ю.</i> Расчет поверхностной энергии и прочности линейно упругих материалов.....	8
<i>Полевой В.Е.</i> Алгоритм математического моделирования сложных пространственных механизмов.....	12
<i>Бородин М.Б., Савин Л.А.</i> Комплексные исследования динамики предохранительной муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом.....	20
<i>Кузнецов Э.Г.</i> Расчет статических характеристик газозатворного торцового уплотнения импульсного типа.....	28

Моделирование технологических процессов

<i>Банников А.А., Банников А.И., Сомова Я.А., Слепышкова Д.В.</i> Математическая модель теплового баланса фрикционной резки горячих труб фрикционной дисковой пилой с зубьями.....	36
<i>Куц В.В.</i> Формирование пространства проектных параметров на ранних стадиях проектирования металлорежущих станков. Статика.....	40
<i>Шмидт И.В.</i> Модель напряженного состояния полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием.....	46

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Вайнер Л.Г.</i> Исследование характера движения цилиндрических роликов при обработке на двусторонних торцешлифовальных станках.....	49
<i>Золотухина Н.П., Ивахненко А.Г.</i> Метрологическое обслуживание процесса изготовления радиоэлектронных приборов.....	55
<i>Кукетков С.А.</i> Разработка инструментов для поверхностного пластического деформирования на основе кинематического анализа.....	63

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Еренков О.Ю., Еренков С.О., Калига Е.Г., Гаврилова А.В.</i> Разработка и исследования метода токарной обработки полимерных материалов на основе предварительного деформирования поверхностного слоя заготовки.....	66
<i>Киричек А.В., Афонин А.Н., Должиков Д.А.</i> Прогрессивный способ накатывания наружной конической резьбы... <i>Смоленцев В.П., Белокуров В.П., Климова Г.Н.</i> Технология и инструмент для комбинированной обработки немагнитных материалов.....	72
	77

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

<i>Гущина Г.Д., Осокина А.А., Моськина Е.Л.</i> Особенности проектирования одежды из тканей, содержащих эластичные нити «лайкра».....	81
<i>Проконова Е.В., Павловская А.А., Кваскова Т.В.</i> Эстетические свойства спецодежды – как объекта производственной сферы.....	84

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Крамская Л.А., Морозова А.В.</i> Формирование социальной позиции молодых специалистов технического профиля средствами историко-литературного краеведения.....	87
<i>Алисов А.А.</i> Комплексная система тестового контроля знаний студентов в области конструкторско-технологической подготовки производства в СМК многоуровневого профильного вуза.....	90

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Давыдова Н.В., Ногачёва Т.И.</i> Электрорезистивный метод измерения параметров комплексного сопротивления.....	92
<i>Богданов С.П., Лисичкин В.Г., Санников Д.П.</i> Повышение точности измерений фазочастотных параметров при вихретоковом контроле.....	96
<i>Гаврилина В.А., Сычев С.Н.</i> Комбинированная экспертная система определения подлинности виноградных вин <i>Хорольский В.Я., Бондарь М.С., Ефанов А.В.</i> Математическое моделирование операции коррекции погрешностей аналого-цифровых преобразователей и оценка ее результативности.....	103
	110

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Пахолкин Е.В., Подмастерьев К.В., Фокин Н.Н.</i> Экспериментальное исследование эффективности контроля вязкостно-температурных свойств моторного масла электропараметрическим методом.....	116
<i>Шкатов П.Н., Дергунова Е.А., Балаев С.М., Тронза В.И., Физуровский Д.К., Воробьева А.Е.</i> Применение вихревых токов для контроля сверхпроводников на основе соединения Nb ₃ Sn для ИТЭР при их производстве... <i>Шкатов П.Н., Дергунова Е.А., Балаев С.М., Тронза В.И., Физуровский Д.К., Воробьева А.Е.</i> Применение вихревых токов для контроля сверхпроводников на основе соединения Nb ₃ Sn для ИТЭР при их производстве... <i>Шкатов П.Н., Дергунова Е.А., Балаев С.М., Тронза В.И., Физуровский Д.К., Воробьева А.Е.</i> Применение вихревых токов для контроля сверхпроводников на основе соединения Nb ₃ Sn для ИТЭР при их производстве...	120

Editorial council

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

Editorial Committee

Editor-in-chief

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

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kirichek A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Podmasteryev K.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Member of editorial board

Babichev A.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Vdovin S.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Dmitriev A.M. *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*
Emelyanov S.G. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Zubarev Y.M. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Subchaninov V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.*
Ivanov B.R. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kolesnikov K.S. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*
Korndorf S.F. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Malinin V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.*
Mulyukin O.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Osadchy V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Panin V.E. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*
Raspopov V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Smolenzev V.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
 Naugorskoye Chaussee, 29
 (4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
 41-98-21
 www.ostu.ru
 E-mail: met_lit@ostu.ru

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

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

© OSTU, 2010

Contents

Natural science

<i>Zheltkov V.I., Volkova Ya.Yu., Borodkin N.N. Model formation roughness by turning.....</i>	3
<i>Frolenkova L.Yu. Calculation surface energy and durability linear elastic material.....</i>	8
<i>Polevoy V.E. The algorithm of mathematical modeling of complex spatial mechanisms.....</i>	12
<i>Borodina M.B., Savin L.A. Comprehensive dynamics study of the safety coupling with hydraulic executive mechanism.....</i>	20
<i>Kuznetsov E.G. Calculation of the static characteristics of gas bolt face impulse seals.....</i>	28

Process modeling

<i>Bannikov A.A., Bannikov A.I., Somova Y.A., Slepyschkova D.V. The mathematical model of a heat balance of friction cutting of hot pipes by the means of friction cutting saw with tool blades.....</i>	36
<i>Kuts V.V. Formation of space of design parameters on early design stages of metal-cutting machine tools. The statics.....</i>	40
<i>Shmidt I.V. Model of the stress state of polymeric composite layered system for machining cutting.....</i>	46

Construction, calculation, material

<i>Vayner L.G. Cylindrical roller motion pattern analysis in process of double-disc grinding.....</i>	49
<i>Zolotukhina N.P., Ivakhnenko A.G. Metrological service of process of manufacturing of radio-electronic devices.....</i>	55
<i>Kuketkov S.A. Development of tools for the surface plastic deformation based on kinematic analysis.....</i>	63

Machine building technology and toolware

<i>Erenkov O.JU., Erenkov S.O., Kalita E.G., Gavrilova A.V. Development and research the method of polymeric materials turning on the basis of preliminary surface deformation of workpieces.....</i>	66
<i>Kirichek A.V., Afonin A.N., Dolgikov D.A. Progressive method of rolling external conic thread.....</i>	72
<i>Smolentsev B.P., Belokurov V.P., Klimova G.N. Technology and the tool for the combined processing not magnetic materials.....</i>	77

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Gushchina G.D., Osokina A.A., Mos'kina E.L. Features of designing of clothes from the fabrics containing the elasthan strings "LYCRA".....</i>	81
<i>Prokopova E.V., Pavlovskaya A.A., Kvaskova T.V. Aesthetic properties of overalls - as object of industrial sphere.....</i>	84

Innovation and frame in machine building

<i>Kramskaya L.A., Morozova A.V. Formation of the social position young experts technical structure means historicaliterary study of local lore.....</i>	87
<i>Alisov A.A. Complex system of the test control of knowledge of students in the field of design-technological preparation of manufacture in SQM multilevel profile high school.....</i>	90

Instrument making and biotechnological system

<i>Davidova N.V., Nogachova T.I. Resistive method of measurement of parametres of complex resistance... ..</i>	92
<i>Bogdanov S.P., Lisichkin V.G., Samikov D.P. Increase of phase-frequency parametres measurements accuracy at vortical-current control.....</i>	96
<i>Gavrilina V.A., Cychev C.N. Combined expert system for determining authentication wines.....</i>	103
<i>Khorolskiy V.Y., Bondar M.S., Yefanov A.V. Mathematic modeling of operation for output measurements correction of analogue-digital converters and estimation of operation progress.....</i>	110

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Pakholkina Ye.V., Podmasteryev K.V., Fokin N.N. Experimental investigation effectiveness control viscous temperature behavior crankcase oil electroparametric technique.....</i>	116
<i>Shkatov P.N., Dergunova E.A., Balayev S.M., Tronza V.I., Figurovskiy D.K., Vorobyeva A.E. Application of eddy current for control superconductor on basis of NB₃SN for the ITER of their production.....</i>	120

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 621.9.048.6:621.941.1:519.95

В.И. ЖЕЛТКОВ, Я.Ю. ВОЛКОВА, Н.Н. БОРОДКИН

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

На основании метода модального разложения построена модель автоколебаний токарного резца в процессе обточка. Показано, что трехмерные колебания возникают при любом режиме точения. Получены оценки предельной высоты шероховатостей для резцов с бетонными и стальными державками.

Ключевые слова: шероховатость, автоколебания, токарный резец, бетонная державка, модальное разложение, наследственно-вязкоупругий материал, интегро-дифференциальные уравнения.

On the grounds of modal analysis the model of autovibration of turning incisor had built. It is show that three-dimensional appear under any mode sharpening. Estimations of the limiting height of the roughnesses are received for incisor with concrete and steel bodies.

Key words: roughness, hunting, lathe tool, concrete holder, modal decomposition, inherited-viscoelastik material, integro-differential equation

Наиболее важным с точки зрения эффективности производства является анализ динамики технологических систем и процесса резания.

Возникающие при резании нагрузки воспринимаются инструментом и приспособлением, в котором инструмент закреплен, а также деталью и приспособлением, в котором она установлена и закреплена. Возникающие нагрузки передаются приспособлениями на сборочные единицы (узлы) и механизмы станка, благодаря чему образуется замкнутая технологическая система «станок – приспособление – инструмент - деталь» (СПИД).

В процессе обработки детали сила резания не остается постоянной в результате действия следующих факторов: изменяется сечение срезаемой стружки, изменяются механические свойства материала детали; изнашивается и затупляется режущий инструмент; образуется нарост на передней поверхности резца и др. Изменение силы резания обуславливает соответствующее изменение деформаций системы СПИД, нагрузки на механизмы станка и условий работы электропривода, что приводит к автоколебаниям (вибрациям) заготовки и инструмента. Отклонения (отжимы), получающиеся вследствие недостаточной жесткости отдельных составляющих системы СПИД, всегда имеют место, причем величины каждого из них в отдельных случаях различны. Наличие колебаний ухудшает качество обработанной поверхности, повышает износ инструмента (особенно твердосплавного и минералокерамического, вплоть до разрушения режущих пластинок) и станка и приводит к разрегулированию соединений в станке и приспособлении [0].

При декомпозиции СПИД в случае токарной обработки выделяется элемент системы – резец. Определяется воздействие на резец – сила резания. Ее модель имеет традиционный вид:

$$P_N^{\hat{h}} = C_N h^{\alpha_N} S^{\beta_N} V^{\gamma_N}, \quad N = x, y, z, \quad (1)$$

где h – глубина резания,

S – подача,

V – скорость резания,

$C_N, \alpha_N, \beta_N, \gamma_N$ – постоянные, зависящие от обрабатываемого материала – определяются из эксперимента.

Декомпозиция подсистемы «инструмент-заготовка», учитывающая взаимное влияние ее элементов, приводит к линеаризованному выражению:

$$P_N = P_N^{\text{iii}} \left(1 + \alpha_N \frac{u}{h} + \beta_N \frac{\dot{v}}{S} + \gamma_N \frac{\dot{w}}{V} \right) \quad (2)$$

где u, v, w – перемещения вершины резца, $(\dot{})$ означает производную по времени.

Предполагается, что материал державки резца обладает наследственно-вязкоупругими свойствами и коэффициент Пуассона материала не зависит от времени, что позволяет для описания вязкоупругих свойств использовать одно ядро релаксации, определяемое из опыта на одноосное растяжение:

$$\sigma(t) = E_0 \left[\varepsilon(t) - \int_0^t \gamma(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (3)$$

где E_0 – мгновенный модуль Юнга;

$\gamma(t)$ – универсальное ядро релаксации;

σ, ε – нормальное напряжение и деформация растяжения/сжатия.

Аналогичное соотношение может быть записано и для кручения, причем вместо модуля Юнга следует использовать модуль сдвига, вместо нормального напряжения – касательное, вместо деформации растяжения – сдвиг. Ядро релаксации останется тем же.

В основу модели резца положены кинематическая и статическая гипотезы теории стержней:

- перемещения, параллельные оси или срединной поверхности, линейно распределены по поперечной координате;
- волокна, параллельные оси стержня, находятся в состоянии одноосного растяжения-сжатия.

Тогда выражения вариационного уравнения Д'Аламбера-Лагранжа принимают вид: для поперечных колебаний в плоскости OY:

$$\int_0^l \left\{ \delta v'' E_0 J_z \left[v'' - \int_0^t \gamma(t-\tau) v''(\tau) d\tau \right] + \rho A \delta v \ddot{v} \right\} dx - \delta v(0) P_y(0) - \delta v'(0) M_z(0) - \delta v(l) P_y(l) - \delta v'(l) M_z(l) = 0 \quad (4)$$

Для поперечных колебаний в плоскости OZ уравнение будет таким же с заменой v на w и индексов $z \leftrightarrow y$.

Для продольных колебаний растяжения-сжатия:

$$\int_0^l \left\{ \delta u' E_0 A \left[u' - \int_0^t \gamma(t-\tau) u'(\tau) d\tau \right] + \rho A \delta u \ddot{u} \right\} dx - \delta u(0) P_x(0) - \delta u(l) P_x(l) = 0, \quad (5)$$

для кручения:

$$\int_0^l \left\{ \delta \varphi' G_0 A \left[\varphi' - \int_0^t \gamma(t-\tau) \varphi'(\tau) d\tau \right] + \rho J_p \delta \varphi \ddot{\varphi} \right\} dx - \delta \varphi(0) M_x(0) - \delta \varphi(l) M_x(l) = 0 \quad (6)$$

где u, v, w – перемещения точек, принадлежащих оси стержня,

φ – угол закручивания,

$P_{x,y,z}$ – компоненты сил, действующих на концах стержня,

$M_{x,y,z}$ – крутящий и изгибающий моменты.

В соответствии с методом модального разложения [0] линейные и угловое перемещения представляются рядом:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x) a_u^n(t), \quad u = u, v, w, \varphi; \quad U = U, V, W, \hat{O} \quad (7)$$

где U, V, W, Φ – формы продольных, изгибных, крутильных свободных колебаний идеально-упругого консольного стержня – физической модели резца:

$$\begin{aligned}
 U_n, \hat{O}_n(x) &= k_n \sin\left(\frac{\pi nx}{2l}\right), \quad V_n, W_n(x) = c_n \left[U \left(\frac{\pi nx}{2l} \right) - V \left(\frac{\pi nx}{2l} \right) \frac{S \left(\frac{\pi nl}{2l} \right)}{T \left(\frac{\pi nl}{2l} \right)} \right], \\
 S(x) &= 0.5 [\cosh(x) + \cos(x)]; \quad T(x) = 0.5 [\sinh(x) + \sin(x)]; \\
 U(x) &= 0.5 [\cosh(x) - \cos(x)]; \quad V(x) = 0.5 [\sinh(x) - \sin(x)]; \\
 \lambda_n &: \cosh(\lambda l) + \cos(\lambda l) = -1.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Коэффициенты k_n и c_n определяются из условия нормирования собственных форм.

Тогда для определения коэффициентов модального разложения имеем систему интегро-дифференциальных уравнений с диагональной матрицей:

$$\ddot{a}_u^n + \omega_{0nu}^2 \left[a_u^n - \int_0^t \gamma(t-\tau) a_u^n(\tau) d\tau \right] = R_n(t), \quad n=1,2,3\dots N, \quad u=x,y,z. \tag{9}$$

где ω_{0nu} – n -я частота свободных колебаний стержня;

R_u^n – модальная сила.

Решению этого уравнения при нулевых начальных условиях можно придать вид, не зависящий от закона изменения по времени модальной силы:

$$a_u^n(t) = \int_0^t W_u^n(t-\tau) R_u^n(\tau) d\tau \tag{10}$$

Здесь введена характеристика стержня, которая не зависит от внешнего воздействия, а только от его формы, распределения свойств по объему и условий закрепления. Это набор функций $W_u^n(t)$, которые нами названы *импульсно-переходными характеристиками*, (ИПХ), иначе – весовыми функциями. Общий вид для ИПХ получается из решения (9) с помощью преобразования Лапласа: ее изображение – передаточная функция (ПФ) - имеет вид:

$$W_u^{n*}(s) = \frac{1}{s^2 + \omega_{0nu}^2 [1 - \gamma^*(s)]}. \tag{11}$$

Для экспоненциального ядра $\gamma(t) = A\beta e^{-\beta t}$ ПФ имеет простейший вид, представляемый суммой простых дробей:

$$\begin{aligned}
 W_u^{n*}(s) &= \frac{1}{s^2 + \omega_{0nu}^2 \left[1 - \frac{A\beta}{\beta + s} \right]} = \\
 &= \frac{\beta + s_1}{(s - s_1)(s_2 - s_1)(s_3 - s_1)} + \frac{\beta + s_2}{(s - s_2)(s_2 - s_2)(s_3 - s_2)} + \frac{\beta + s_3}{(s - s_3)(s_1 - s_3)(s_2 - s_3)},
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где s_1, s_2, s_3 – корни характеристического уравнения:

$$s^3 + \beta s^2 + s + \beta(1 - A) = 0 \tag{13}$$

Оригинал – ИПХ – находится элементарно:

$$W_u^n(t) = \frac{(\beta + s_1)e^{s_1 t}}{(s_1 - s_2)(s_1 - s_3)} + \frac{(\beta + s_2)e^{s_2 t}}{(s_2 - s_1)(s_2 - s_3)} + \frac{(\beta + s_3)e^{s_3 t}}{(s_3 - s_1)(s_3 - s_2)} \tag{14}$$

В случае одного вещественного и двух комплексно-сопряженных корней (13) ИПХ можно привести к виду:

$$W_u^n(t) = A_u(\omega_{0nu}, A, \beta) e^{s_1 t} + B_u(\omega_{0nu}, A, \beta) e^{-\gamma_n t} \sin(\omega_n t + \varphi_n) \tag{15}$$

Здесь s_1 – вещественный корень, $s_{2,3} = \alpha_n \pm i\gamma_n$ – комплексно-сопряженные корни. Так как вещественный корень и мнимая часть комплексно-сопряженных корней отрицательны в диапазоне реальных значений A и β , то свободные колебания стержня затухающие.

Таким образом, в рамках данной модели фундаментальную роль играет импульсно-переходная характеристика, которую можно определить как реакцию стержня на единичное

возмущение скоростью перемещений в задаче о свободных колебаниях при нулевых начальных перемещениях.

Далее рассматривались автоколебания резца при обточке. Полагалось, что заготовка идеально цилиндрическая и идеально установлена по оси станка. При расчетах учитывалось, что в плоскости сечения резца сила резания приложена в точке с координатой y_C, z_C относительно центра тяжести сечения, и дает дополнительный изгибающий момент. При этом математическая модель процесса имеет вид системы интегро-дифференциальных уравнений с заполненной матрицей.

$$\begin{aligned}
 \ddot{a}_{xk} + \omega_{0xk}^2 \left[a_{xk} - \int_0^t \gamma(t-\tau) a_{xk}(\tau) d\tau \right] &= \\
 = (-1)^{k+1} \frac{P_{x\ddot{y}\ddot{y}}}{\rho AL} \left(1 + \alpha_x \frac{k_h u(t)}{h} + \beta_x \frac{k_S \dot{v}(t)}{S} + \gamma_x \frac{4\pi k_V \dot{w}(t)}{D} \right); & \\
 \ddot{a}_{yk} + \omega_{0yk}^2 \left[a_{\delta k} - \int_0^t \gamma(t-\tau) a_{\delta k}(\tau) d\tau \right] &= \\
 = \frac{P_{y\ddot{y}\ddot{y}}}{\rho AL} \left[1 + \alpha_y \frac{k_h u(t)}{h} + \beta_y \frac{k_S \dot{v}(t)}{S} + \gamma_y \frac{4\pi k_V \dot{w}(t)}{D} \right] C_{uk} + & \\
 + \frac{z_C P_{y\ddot{y}\ddot{y}}}{\rho AL^2} \left[1 + \alpha_x \frac{k_h u(t)}{h} + \beta_x \frac{k_S \dot{v}(t)}{S} + \gamma_x \frac{4\pi k_V \dot{w}(t)}{D} \right] D_{uk}; & \\
 \ddot{a}_{zk} + \omega_{0zk}^2 \left[a_{zk} - \int_0^t \gamma(t-\tau) a_{zk}(\tau) d\tau \right] &= \\
 = \frac{P_{z\ddot{y}\ddot{y}}}{\rho AL} \left[1 + \alpha_z \frac{k_h u(t)}{h} + \beta_z \frac{k_S \dot{v}(t)}{S} + \gamma_z \frac{4\pi k_V \dot{w}(t)}{D} \right] C_{uk} + & \\
 + \frac{y_C P_{y\ddot{y}\ddot{y}}}{\rho AL^2} \left[1 + \alpha_x \frac{k_h u(t)}{h} + \beta_x \frac{k_S \dot{v}(t)}{S} + \gamma_x \frac{4\pi k_V \dot{w}(t)}{D} \right] D_{uk}. & \\
 C_{uk} = \frac{U_{uk}(L)}{L \int_0^L U_{uk}^2(x) dx}; D_{uk} = \frac{\frac{d}{dx} U_{uk}(L)}{L \int_0^L U_{uk}^2(x) dx} & \quad (16) \\
 k = 1, 2, \dots, M &
 \end{aligned}$$

Формулы (16) показывают, что автоколебания возникают независимо от закона изменения во времени номинальной силы резания. Моды колебаний взаимосвязаны и вершина резца описывает в пространстве сложную траекторию, определяемую спектром свободных колебаний «сопряженного» резца (т.е. упругого резца, имеющего ту же форму, распределение свойств по объему и те же условия закрепления, но лишенного реологических свойств [0]). Размер плоской фигуры, получающейся при пересечении предельных траекторий в установленном режиме автоколебаний и вертикальной плоскости, проходящей через ось резца, можно отождествить с высотой шероховатости R_z .

В связи с тем, что структура модели представляет собой диагональную левую часть и заполненную правую, для определения модальных коэффициентов применялся метод последовательных приближений:

$$\mathbf{a}^{(m)} = \int_0^t \text{diag} \left[\mathbf{W}(t-\tau) \bar{\mathbf{R}} \right] \mathbf{a}^{(m-1)}(t) d\tau, \quad (17)$$

где $\mathbf{a}^{(m)} = \begin{pmatrix} a_x^{(m)} \\ a_y^{(m)} \\ a_z^{(m)} \end{pmatrix}$ – вектор модальных коэффициентов;

$diag[W(t)]$ – диагональная матрица импульсно-переходных характеристик;

$\mathbf{R}(\mathbf{a})$ – вектор, составленный из правых частей уравнений (16).

За начальное приближение принимается решение задачи при постоянной силе резания.

Расчеты проводились для резца с бетонной державкой ($E_0=4.236 \cdot 10^{10}$ Па, $A=0.1645$, $\beta=1.131 \cdot 10^4$ 1/с); для сравнения проводились расчеты и для стальной державки. Режим резания варьировался: глубина – 0.2...2 мм, подача – 0.1 мм/об, число оборотов шпинделя – 185...630 об/мин. Во всех случаях параметры в формуле (2) для силы резания принимались из экспериментальных данных по обточке образцов из стали 40X. Графики оценки R_z приведены на рисунках 1, 2.

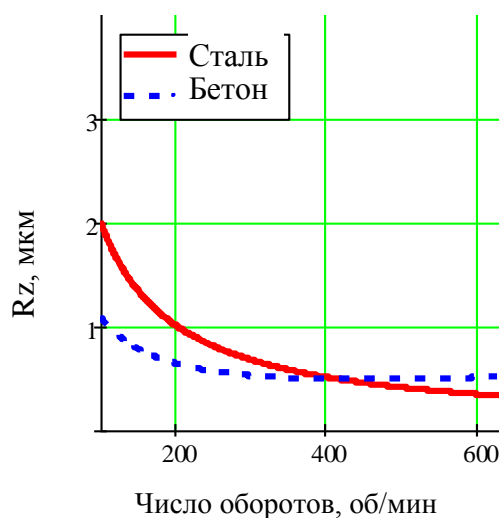
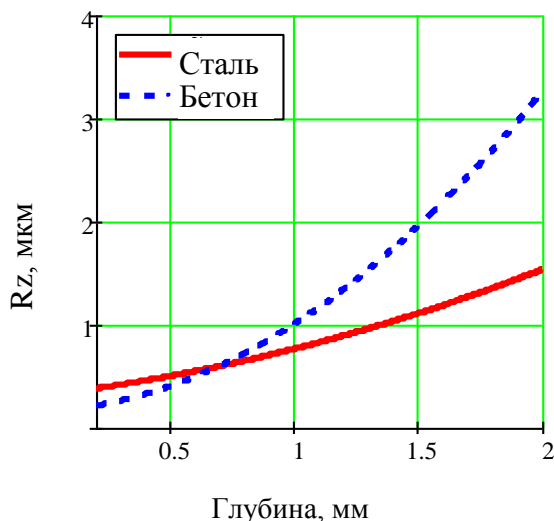


Рисунок 1 – Зависимость максимальной высоты шероховатости от глубины резания

Рисунок 2 – Зависимость максимальной высоты шероховатости от числа оборотов

Приведенные графики позволяют сделать вывод о том, что применение бетонных державок оправдано в области режимов резания, соответствующих чистовому и получистовому точению – умеренным припускам (порядка 0.2...0.7мм), малой подаче и умеренным оборотам шпинделя (100..350 об/мин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин, С.А. Прогнозирование виброустойчивости процесса точения / С.А. Васин, Л.А. Васин. – Тула: ТулГУ, 2000. – 108с.
2. Желтков, В.И. Переходные функции в динамике вязкоупругих тел / В.И. Желтков, Л.А. Толоконников, Н.Г. Хромова // ДАН: сер. Механика. – 1993. – т.329. – №6. – с.718 – 719.

Желтков Владимир Иванович

Тульский государственный университет, г. Тула
 Доктор физико-математических наук, профессор
 Тел. 8-910-158-20-56
 E-mail: glob4361@mail.ru

Волкова Яна Юрьевна

Тульский государственный университет, г. Тула
 Аспирант
 Тел.(4872) 47-58-32
 E-mail: bingo.6@mail.ru

Бородкин Николай Николаевич

Тульский государственный университет, г. Тула
 Кандидат технических наук, доцент
 Тел. 8-903-697-69-56
 E-mail: glob4361@mail.ru

Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОЧНОСТИ ЛИНЕЙНО УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

В работе предложены расчетные формулы для поверхностной энергии и предела прочности, полученные на основании модели упругой среды, основанной на представлении о нелокальном парном и тройном потенциальном взаимодействии ее частиц. Результаты расчетов для ряда материалов удовлетворительно соответствуют известным из литературы.

Ключевые слова: *градиентная модель упругой среды, потенциал взаимодействия, поверхностная энергия, свободная энергия, энергия и сила когезии, предел прочности.*

In the job the design formula for strength of flexure and the superficial energy, which received on the basis of model of the elastic environment based on representation about not local pair and triple potential interaction of its particles, are offered. Results of calculations for number of materials correspond to known of the literature satisfactorily.

Keywords: *the gradient model of the elastic environment, interaction potential, superficial energy, free energy, energy and force of cohesion, breaking point.*

ВВЕДЕНИЕ

Применение многослойных структур позволяет снизить вес, упростить конструкцию и технологию производства, обеспечить новые качественные характеристики изделий. Одно из основных требований к таким изделиям это прочность адгезионного соединения составляющих их элементов. Из-за сложности проведения опытов по проверке прочности, их высокой себестоимости, делать это удобнее всего теоретически с помощью, например, оценки поверхностной энергии и предела прочности через механические свойства материалов. Для многих конструкционных материалов механические свойства, такие как модули упругости, пределы прочности и текучести достаточно точно определены экспериментально. Но, тем не менее, данная информация не всегда является полной. Вопросы теории разрушения требуют знания предела прочности, в ряде случаев – значения поверхностной энергии. В работе предложены расчетные формулы для предела прочности и поверхностной энергии, полученные на основании модели упругой среды, основанной на представлении о нелокальном парном и тройном потенциальном взаимодействии ее частиц.

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Для построения расчета делаем следующие допущения.

1. Считается, что любое тело B сначала мысленно, а затем реально выделяется из бесконечной среды. Для упрощения рассуждений переходные процессы, сопровождающие выделение, не рассматриваются. Конфигурация тела B , лишь мысленно выделенного в бесконечно протяженной среде Ω , при условии отсутствия на нее внешних воздействий, принимается за отсчетную.

2. Материал среды Ω является сплошным, однородным, изотропным, упругим, недеформированным, с известными физическими свойствами.

3. Допускается, что образование свободной поверхности A , ограничивающей область (объем) V , занимаемую телом B , происходит в изотермическом, обратимом процессе мгновенного образования A .

4. Затраченная на выделение работа G преобразуется в суммарную поверхностную энергию тела B и отделенной от него части $C = \Omega - B$ так, что приращение свободной энергии ΔF одного тела [1] в случае, когда разделенные части симметричны относительно поверхности разделения, определяем формулой:

$$\Delta F = G/2 = \int_A W_p dA, \quad (1)$$

Учитывая, что при мгновенном выделении B из Ω у частиц dB тела B изменяется только множество соседей, потенциально, взаимодействующих с ними (деформаций разделенных частей и изменения их температуры, процесс изотермичен, не происходит), равенство (1) записывается в виде

$$\int_A W_p dA = \int_V \left[\int_{\Omega} \Psi^{(1)} dV_1 - \int_V \Psi^{(1)} dV_1 \right] dV + \int_V \left[\int_{\Omega} dV_1 \int_{\Omega} \Psi^{(1,2)} dV_2 - \int_V dV_1 \int_V \Psi^{(1,2)} dV_2 \right].$$

В этой записи $\Psi^{(1)} dV dV_1$, $\Psi^{(1,2)} dV dV_1 dV_2$ – потенциалы парного и тройного взаимодействий частиц dB сплошного тела B (соответственно частицы dB с частицей dB_1 – в первом случае и частицы dB с частицами dB_1 и dB_2 – во втором случае) [2, 3]. Перечисленные частицы имеют соответственно объемы dV , dV_1 и dV_2 . Их центры масс расположены в точках с радиус-векторами \vec{r} , \vec{r}_1 и \vec{r}_2 . Расстояние от dB до dB_1 и dB_2 соответственно равны $l_1 = |\vec{r}_1 - \vec{r}|$ и $l_2 = |\vec{r}_2 - \vec{r}|$.

Считается, что потенциалы $\Psi^{(1)}$ и $\Psi^{(1,2)}$ зависят только от расстояний l_1 и l_2 между взаимодействующими частицами (среда однородна). Для функций $\Psi^{(1)}$ и $\Psi^{(1,2)}$ использованы соотношения

$$\Psi^{(1)} = P \left(e^{-2\beta l_1} - 2e^{-\beta l_1} \right),$$

$$\Psi^{(1,2)} = H \left(e^{-2\beta l_1} - 2e^{-\beta l_1} \right) \left(e^{-2\beta l_2} - 2e^{-\beta l_2} \right).$$

Параметры β , P и H выражаются через среднее межатомное расстояние $l_0 = 1/\sqrt[3]{n}$, где n – число частиц (атомов, молекул) в единице объема окрестности. Параметры Ламэ λ , μ , считаются известными. Система уравнений для определения β , P и H имеет вид [4, 5]:

$$\left(\frac{12\pi}{5\beta^3} \right) P + \left(\frac{185\pi^2}{\beta^6} \right) H = \lambda, \quad \left(\frac{12\pi}{5\beta^3} \right) P + \left(\frac{120\pi^2}{\beta^6} \right) H = \mu, \quad \beta = \frac{45\sqrt{3}}{2l_0}.$$

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ

Поверхностная энергия W_p – это энергия, концентрирующаяся в поверхностном слое твердого тела B при образовании свободной поверхности A в изотермическом обратимом процессе, к которой он примыкает, отнесенная к единице ее площади [6].

Тело, для которого вычисляется поверхностная энергия, полубесконечно и в отсчетном состоянии занимает область, описываемую в прямоугольной декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) неравенствами:

$$V: 0 < x_1 < +\infty, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty;$$

свободная поверхность, для которой определяется поверхностная энергия это плоскость:

$$A: x_1 = 0, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty.$$

В этом случае поверхностную энергию можно вычислять по формуле:

$$W_p = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A} \left\{ \int_V \left[\int_{\Omega} \Psi^{(1)} dV_1 - \int_V \Psi^{(1)} dV_1 \right] dV + \int_V \left[\int_{\Omega} dV_1 \int_{\Omega} \Psi^{(1,2)} dV_2 - \int_V dV_1 \int_V \Psi^{(1,2)} dV_2 \right] \right\}. \quad (2)$$

Она построена с учетом определения величины W_p для момента времени, следующего за мгновенным изотермическим образованием поверхности A . В этот момент ни деформаций ни изменения температуры еще нет, изменилось только число соседей частиц тела B , приле-

гающих к границе A . Результаты расчета W_p по (2) для ряда материалов сравниваются с известным из литературы [7] (см. рисунок).

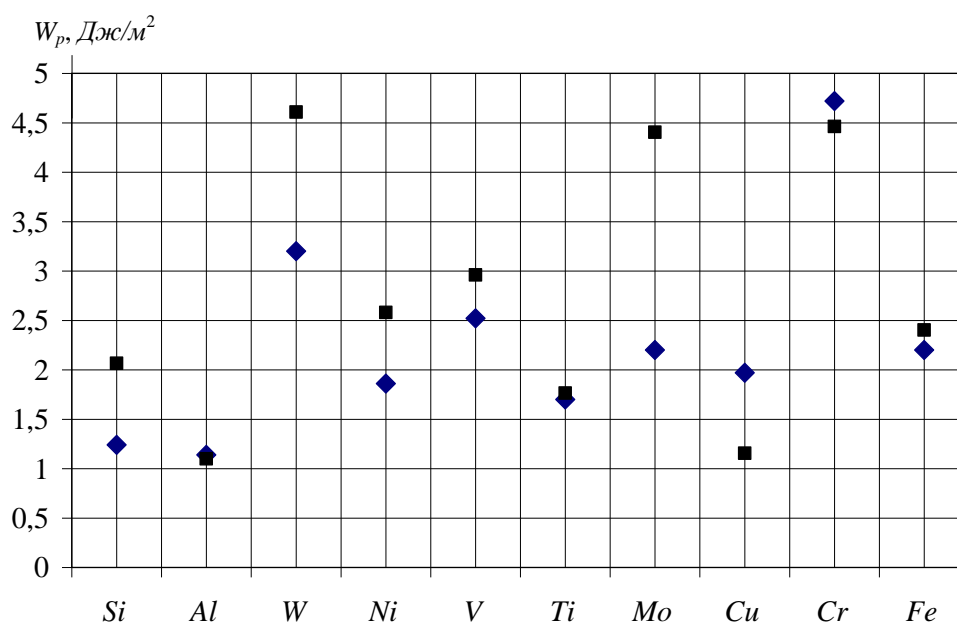


Рисунок – Результаты расчета поверхностной энергии и их сравнение с имеющимися в литературе данными

- ◆ - справочные данные W_p [6];
- - значения W_p вычисленные по формуле (2)

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА

Прочность материала на какой-либо площадке dA оценивается энергией когезии – энергией притяжения частей тела B взаимодействующих вдоль этой площадки [8]

$$\mathfrak{G} = 2W_p.$$

Она определяется свойствами материала, которые в нашем случае учитываются потенциалами Ψ^{α} и Ψ^{β} . Кроме того, прочность материала часто оценивается с помощью силы когезии – силы притяжения взаимодействующих частей тела приходящейся на единицу площади участка dA . Она рассчитывается по формуле

$$\vec{f} = - \int_{V_{\alpha}} dV_{\alpha} \int_{V_{\beta}} \left[\nabla_1 \Psi^{\alpha}(\vec{r}_1) + \int_{V_{\alpha}} \left(\Psi^{\alpha}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) + \nabla_2 \Psi^{\alpha}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \right) dV_{\alpha} \right] dV_{\beta},$$

где $\nabla_m \Psi^{\alpha} = \frac{d\Psi^{\alpha}}{d\vec{r}_m}$ – градиент потенциала Ψ^{α} при изменении \vec{r}_m ; $m = 1, 2$; $q = 2, 3$.

Формула для вычисления вектора \vec{f} выведена из его представления в виде суммы всех внутренних сил, действующих со стороны частиц части B_{α} тела B на частицы другой части B_{β} того же тела ($\alpha \neq \beta$, $\alpha, \beta = 1, 2$), совершающих работу на относительных смещениях взаимодействующих частиц. Полученный результат соответствует известному [8, 9].

Допущение о справедливости предложенной формулы расчета силы когезии проверено для нескольких однородных по составу материалов. Для них сила когезии одной части тела с другой, отнесенная к единице площади их контакта σ^* , должна совпадать с теоретическим пределом прочности исследуемого материала $\sigma_{теор}$. Он определен согласно [10] по формуле

$$\sigma_{теор} = E/5. \tag{3}$$

С учетом только парного взаимодействия частиц сплошной среды формула для расчета σ^* приобретает простой вид:

$$\sigma^* = \frac{6 \cdot \pi \cdot P}{4 \cdot \beta^3} \quad (4)$$

Результаты сопоставления представлены в таблице.

Таблица – Результаты расчетов предела прочности для ряда изготавливаемых промышленностью материалов по формулам (3) и (4)

Материал металлургического производства	$\sigma_{теор}, Па \cdot 10^{10}, (3), [10]$	$\sigma^*, Па \cdot 10^{10}, (4)$
<i>Al</i> (отжиг)	1,26	0,98
<i>Cr</i> (отжиг)	5,60	4,47
<i>V</i> (отжиг)	2,78	2,83
<i>Ti</i> (отжиг)	2,05	1,55
<i>Mo</i> (отжиг)	5,70	4,05

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета поверхностной энергии W_p и предела прочности σ^* на основании предложенных формул для ряда материалов сопоставлены с имеющимися в литературе данными. Характер соответствия удовлетворительный. Предложенный в работе метод ввиду его простоты может быть применен для расчета поверхностной энергии и пределов прочности конструкционных материалов сложного химического состава, так как в качестве предварительной информации для расчетов достаточно знания коэффициентов Ламэ и среднего межатомного расстояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л. Д. Статистическая физика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. – Т. 5, 1976. – 584 с.
2. V. Shorkin. Theory of the elasticity of the materials of the second order [Текст] / V. Shorkin, V. Gordon // High Performance Structures and Materials III. Editor: C.A. Brebbia. Wessex Institute of Technology, UK. WIT Press, 2006. – P. 581 – 589.
3. Азаров, А. С. Способ оценки значений дополнительных к классическим материальным констант градиентных сред с помощью учета тройного взаимодействия частиц [Текст] / А. С. Азаров, В. С. Шоркин // Известие ТулГУ, серия "Естественные науки". Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 28 – 40.
4. Азаров, А. С. Учет влияния трехчастичного взаимодействия в сплошной упругой среде на ее механические характеристики [Текст] / А. С. Азаров, В. С. Шоркин // Сборник трудов 47 Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". – Н.-Новгород, 2008. – С. 163 – 165.
5. Фроленкова, Л. Ю. Методика расчета энергии адгезии с учетом тройного взаимодействия частиц среды [Текст] / Л. Ю. Фроленкова [Текст] // Известие ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии", № 4, 2009. – С. 22 – 26.
6. Физический энциклопедический словарь [Текст]. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – Т 4. – 592 с.
7. Свойства элементов. Физические свойства: Справочник [Текст] / Е. Б. Самсонов. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
8. Ландау, Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика [Текст] / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц. – М: Наука, 1965. – 405 с.
9. Грот, С. Неравновесная термодинамика, пер. с англ. [Текст] / С. Грот, П. де, Мазур. – М.: Мир, 1964. 456 с.
10. Петч, Н. Металлографические аспекты разрушения [Текст] / Н. Петч // Разрушение. Ред. Либовиц Г. – М.: Мир, 1973. – Т. 1. – С. 376 – 420.

Фроленкова Лариса Юрьевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-44
E-mail: Lara@ostu.ru

В.Е. ПОЛЕВОЙ

АЛГОРИТМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Предлагается численный метод моделирования движения сложных пространственных механизмов, позволяющий не выводить дифференциальные уравнения движения, существенно усложняющиеся при появлении каждой новой степени свободы, а находить численно зависимости обобщённых сил, кинетической энергии и её производных от обобщённых координат и обобщённых скоростей по простому алгоритму. При решении задачи все звенья системы описываются единообразно, а формирование уравнений происходит автоматически.

Ключевые слова: динамика механических систем, моделирование пространственных механизмов.

Proposed numerical method of modelling of complex spatial mechanisms to suppress differential equations of motion, significantly growing complexities when each new degrees of freedom, and find a numerically based on the generalized forces, kinetic energy and its derived from generalized coordinates and generalized speeds on a simple algorithm. When addressing all describes uniformly and equations occurs automatically.

Key words: the dynamics of mechanical systems, modeling spatial arrangements.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механизм рассматривается как механическая система, имеющая N степеней свободы, и описывается зависимостями N обобщённых координат q_m , $m = 1, \dots, N$ от времени. Эти зависимости получаются в результате решения системы N уравнений Лагранжа [1]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_m} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_m} = Q_m, \quad (1.1)$$

где t – время;

K – кинетическая энергия механической системы;

Q_m – обобщённые силы.

Точка над символом обозначает дифференцирование по времени. Обобщённые силы в общем случае – это произвольные интегрируемые функции времени, обобщённых координат и обобщённых скоростей \dot{q}_m

$$Q_m = Q_m(q_n, \dot{q}_n); \quad m, n = 1, \dots, N.$$

Кинетическая энергия представляет собой положительно определенную квадратичную форму обобщённых скоростей [1] (здесь и ниже по повторяющимся индексам предполагается суммирование)

$$K = \frac{1}{2} a_{mn} \dot{q}_m \dot{q}_n; \quad m, n = 1, \dots, N. \quad (1.2)$$

Элементы симметричной квадратной матрицы $A = (a_{mn})$ являются регулярными функциями обобщённых координат.

Преобразуем систему (1.1) в систему $2N$ уравнений первого порядка. С этой целью введём в рассмотрение обобщённые импульсы [1]

$$p_m = \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_m}; \quad m = 1, \dots, N. \quad (1.3)$$

Из выражения (1.2) следует, что

$$p_m = a_{mn} \dot{q}_n; \quad m, n = 1, \dots, N. \quad (1.4)$$

Здесь учтено, что матрица A симметрична. Разрешая уравнения (1.4) относительно обобщенных скоростей (это всегда возможно в силу положительной определенности квадратичной формы (1.2)), получаем

$$\dot{q}_n = b_{nm} p_m; \quad m, n = 1, \dots, N, \quad (1.5)$$

где матрицы A и $B = \left(b_{nm} \right)$ взаимно обратны.

Равенства (1.1) с учётом выражений (1.3) преобразуются к виду

$$\dot{p}_m = Q_m + \frac{\partial K}{\partial q_m}; \quad m = 1, \dots, N. \quad (1.6)$$

Уравнения (1.5), (1.6) представляют собой систему $2N$ обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно $2N$ неизвестных $q_m, p_m; \quad m = 1, \dots, N$. Её решение при заданных начальных условиях – решение задачи Коши – легко получается каким-либо численным методом, например, методом Рунге-Кутты [2]. Правые части уравнений – это, вообще говоря, некоторые функции времени, обобщенных координат и обобщенных импульсов. При численном решении необходимо определять их значения при известных аргументах t, q_m, p_m . Поэтому дальнейшее рассмотрение проводится в предположении, что величины t, q_m, p_m заданы.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Пусть функция

$$K = K(q_m, \dot{q}_m); \quad m = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

известна в том смысле, что определен алгоритм, позволяющий вычислять её значение при заданных величинах аргументов. Зная, что она имеет вид (1.2), найдём элементы матрицы A . Для всех i от 1 до N полагаем последовательно

$$\dot{q}_m = 0; \quad m = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, N; \quad \dot{q}_i = 1.$$

Из сопоставления выражений (1.2) и (2.1) следует, что при этом $a_{ii} = 2K$. В данном случае суммирование по i не производится.

После того, как найдены диагональные элементы матрицы A , для всех i от 1 до N и всех j от $i+1$ до N полагается

$$\dot{q}_m = 0; \quad m = 1, \dots, N; m \neq i; m \neq j; \quad \dot{q}_i = \dot{q}_j = 1.$$

Из сопоставления выражений (1.2) и (2.1) следует, что

$$a_{ij} = a_{ji} = K - \left(a_{ii} + a_{jj} \right) / 2.$$

Таким образом, матрица A определена. Далее решается система уравнений (1.4). В результате определяются правые части уравнений (1.5) и одновременно значения обобщенных скоростей \dot{q}_m .

Пользуясь выражением (2.1) и конечно-разностным представлением производной [2], можно определить величины $\partial K / \partial q_m$, входящие в правые части уравнений (1.6)

$$\frac{\partial K}{\partial q_i} = \frac{K(q_1, \dots, q_i + \Delta q_i, \dots, q_N, \dot{q}_m) - K(q_1, \dots, q_i - \Delta q_i, \dots, q_N, \dot{q}_m)}{2\Delta q_i},$$

где значения Δq_i предполагаются заданными.

Внешние силы, действующие на механическую систему, обычно известны в каждый момент времени своими разложениями в некотором декартовом базисе. Пусть P – такая сила, а v – скорость её точки приложения. Мощность силы P определяется формулой [1]

$$W = P \cdot v = P_k v_k; \quad k = 1, 2, 3. \quad (2.2)$$

Здесь точкой обозначено скалярное произведение векторов.

Скорость v представляет собой линейную функцию обобщенных скоростей [1]

$$v_k = c_{km} \dot{q}_m; \quad k = 1, 2, 3; \quad m = 1, \dots, N, \quad (2.3)$$

где элементы прямоугольной матрицы $C = \{c_{km}\}$ зависят от обобщенных координат.

Подстановка соотношений (2.3) в формулу (2.2) даёт

$$W = P_k c_{km} \dot{q}_m = \Delta Q_m \dot{q}_m, \quad (2.4)$$

где ΔQ_m – вклад силы P в m -ую обобщенную силу.

Пусть скорость точки приложения силы P известна как функция обобщенных координат и обобщенных скоростей

$$v = v \{q_m, \dot{q}_m\}; \quad m = 1, \dots, N, \quad (2.5)$$

причем, функциональная зависимость понимается здесь так же, как и при определении функции (2.1). Применяя ту же процедуру, что и при определении диагональных элементов матрицы A , и вычисляя W по формуле (2.2), из выражения (2.4) получим

$$\Delta Q_i = W.$$

Таким образом, для определения правых частей уравнений (1.5), (1.6) необходимо найти кинетическую энергию механической системы как функцию обобщенных координат и обобщенных скоростей (выражение (2.1)) и скорости точек приложения внешних сил как функции тех же параметров (выражение (2.5)).

СКОРОСТИ ТОЧЕК ЗВЕНА И ЕГО КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Кинетическая энергия аддитивна [1], поэтому для получения функции (2.1) достаточно указать алгоритм её вычисления для одного звена. Рассмотрим некоторое звено (номер звена для упрощения записи опускаем). Пусть y_k – система декартовых координат, жёстко связанная с рассматриваемым звеном; j_k – векторный базис этой системы (на протяжении этого раздела все индексы принимают значения от 1 до 3). Начало координат системы y_k находится в шарнире, соединяющем рассматриваемое звено с предыдущим звеном. Пусть, далее, x_k – система декартовых координат, жёстко связанная с предыдущим звеном, а i_k – соответствующий векторный базис. Схематично оба звена и соответствующие системы координат изображены на рисунке 1.

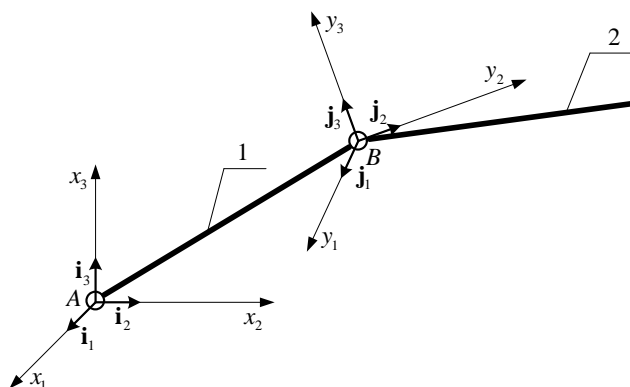


Рисунок 1 – Звенья механизма и системы координат
1 – предыдущее звено; 2 – рассматриваемое звено.

Движение звена представляет собой суперпозицию переносного движения (движения вместе с предыдущим звеном) и относительного движения [1]. Относительное движение в данном случае представляет собой вращение относительно полюса B (шарнира). Таким образом, в общем случае каждое звено добавляет механической системе три степени свободы. Им соответствуют три обобщенные координаты – углы поворота системы координат y_k относительно системы координат x_k .

Их можно ввести различным образом, в частности, это могут быть углы Эйлера [1]. Вариант, представленный ниже, удобен для численного расчёта механизмов, но отнюдь не обязателен.

Пусть φ – угол поворота системы координат x_k вокруг оси x_3 . Как следует из рисунка 2

$$\begin{cases} e_1 = \cos\varphi i_1 + \sin\varphi i_2; \\ e_2 = -\sin\varphi i_1 + \cos\varphi i_2; \\ e_3 = i_3. \end{cases}$$

Матрица перехода от базиса i_k к базису e_k

записывается в виде [3]

$$H_\varphi = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Следующее преобразование – поворот координатных осей ξ_k вокруг оси ξ_2 на угол θ . Аналогично получаем

$$\begin{cases} f_1 = \cos\theta e_1 - \sin\theta e_3; \\ f_2 = e_2; \\ f_3 = \sin\theta e_1 + \cos\theta e_3. \end{cases} \quad H_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

И, наконец, поворот координатных осей η_k вокруг оси η_1 на угол ψ . При этом

$$\begin{cases} j_1 = f_1; \\ j_2 = \cos\psi f_2 + \sin\psi f_3; \\ j_3 = -\sin\psi f_2 + \cos\psi f_3. \end{cases} \quad H_\psi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Матрица перехода от базиса i_k к базису j_k определяется формулой [3]

$$H_{\varphi, \theta, \psi} = H_\varphi \cdot H_\theta \cdot H_\psi. \quad (3.4)$$

Так как матрицы (3.1-3.4) – матрицы поворота, обратные им матрицы равны транспонированным [3].

Пусть U – матрица-столбец координат некоторого вектора в базисе i_k , а U' – в базисе j_k . Связь между ними определяется формулой [3]

$$U' = H^T U, \quad (3.5)$$

где индекс T обозначает транспонирование матрицы.

Скорость некоторой точки M звена представляется в виде суммы [6]

$$v = v^t + v^r,$$

где v^t – скорость переносного движения;

v^r – скорость относительного движения.

Скорость переносного движения определяется формулой [1]

$$v^t = v^B + \omega^t \times r,$$

где v^B – скорость точки B (см. рисунок 1);

ω^t – угловая скорость переносного движения;

r – радиус-вектор, проведенный из точки B в точку M ;

символ \times обозначает векторное произведение.

Так как относительное движение представляет собой вращение, можно записать

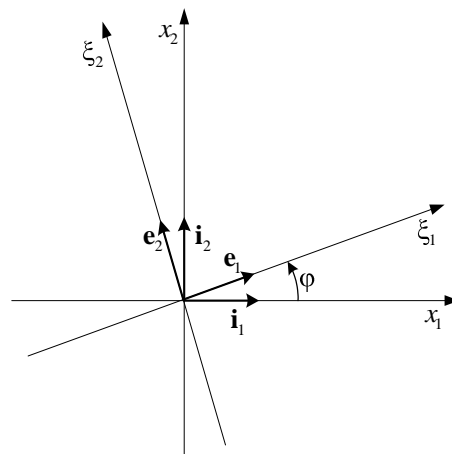


Рисунок 2 – Поворот системы координат вокруг оси x_3

$$v^r = \omega^r \times r; \quad \omega = \omega^t + \omega^r; \quad v = v^B + \omega \times r \quad (3.6)$$

где ω^r – угловая скорость относительного движения;
 ω – угловая скорость относительно инерциальной системы отсчета.

Скорости v^B и ω^t известны из анализа движения предыдущего звена (для первого звена они равны нулю) и заданы своими компонентами в базисе i_k . По формуле (3.5) вычисляются их компоненты в базисе j_k . Ниже во всех формулах, где встречаются компоненты векторов и тензора инерции, имеются в виду компоненты в базисе j_k . Для скорости точки M (третья из формул (3.6)) получаем

$$v_k = v_k^B + \varepsilon_{klm} \omega_l y_m; \quad \omega_l = \omega_l^t + \omega_l^r \quad (3.7)$$

где ε_{klm} – символ Леви-Чивита [3];
 y_m – координаты точки M .

При заданных координатах y_m в формуле (3.7) не определена только угловая скорость относительного движения ω^r . Чтобы связать её с обобщенными координатами и обобщенными скоростями, учтём, что скорость относительного движения равна

$$v^r = \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(y_m j_m \right) = y_m \frac{dj_m}{dt},$$

при условии неподвижности базиса i_k . Сопоставляя это выражение с первой из формул (3.6), приходим к соотношениям

$$v_k^r = \varepsilon_{klm} \omega_l^r y_m = y_m \frac{dj_m}{dt} \cdot j_k \Rightarrow \omega_l^r = \frac{1}{2} \varepsilon_{lmk} \frac{dj_m}{dt} \cdot j_k. \quad (3.8)$$

Здесь учтено, что точка M с координатами y_m выбрана произвольно, а для базисных векторов справедливы соотношения

$$j_k \cdot j_m = \delta_{km} \Rightarrow g_{mk} = \frac{dj_k}{dt} \cdot j_m = -\frac{dj_m}{dt} \cdot j_k,$$

где δ_{km} – символ Кронекера.

Из соотношений (3.1)-(3.4) следует

$$j_m = h_{nm} i_n; \quad g_{km} = \dot{h}_{nm} h_{lk} \delta_{nl} = \dot{h}_{nm} h_{nk} \Leftrightarrow G = H^T \dot{H},$$

где $G = \mathcal{G}_{km}$,

h_{km} – элементы матрицы H .

Выполнив дифференцирование, с учётом того, что для матриц (3.1-3.4) обратная матрица равна транспонированной, получим

$$G = H_{\psi}^T H_{\theta}^T H_{\varphi}^T H'_{\varphi} H_{\theta} H_{\psi} \dot{\varphi} + H_{\psi}^T H_{\theta}^T H'_{\theta} H_{\psi} \dot{\theta} + H_{\psi}^T H'_{\psi} \dot{\psi},$$

где штрихом обозначено дифференцирование матрицы по соответствующей обобщенной координате.

Непосредственно устанавливаются следующие соотношения

$$D_{\varphi} = H_{\varphi}^T H'_{\varphi} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad D_{\theta} = H_{\theta}^T H'_{\theta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad D_{\psi} = H_{\psi}^T H'_{\psi} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Приходим к выражению, определяющему угловую скорость относительного движе-

ния как функцию обобщенных координат и обобщенных скоростей

$$\omega_n^r = \omega_{\varphi n}^r \dot{\varphi} + \omega_{\theta n}^r \dot{\theta} + \omega_{\psi n}^r \dot{\psi}, \quad (3.9)$$

где обозначено

$$\omega_{\varphi n}^r = \frac{1}{2} \varepsilon_{nmk} g_{\varphi km}; \quad \omega_{\theta n}^r = \frac{1}{2} \varepsilon_{nmk} g_{\theta km}; \quad \omega_{\psi n}^r = \frac{1}{2} \varepsilon_{nmk} g_{\psi km}.$$

$$G_{\varphi} = H_{\psi}^T H_{\theta}^T D_{\varphi} H_{\theta} H_{\psi}; \quad G_{\theta} = H_{\psi}^T D_{\theta} H_{\psi}; \quad G_{\psi} = D_{\psi}.$$

Таким образом, зависимость скорости произвольной точки M звена от обобщенных координат и скоростей установлена. Это значит, в частности, что при заданных проекциях внешней силы и координатах точки её приложения можно, пользуясь приведенными формулами, рассчитать её вклад в обобщенные силы. Аналогично вычисляются скорости переносного движения последующего звена.

Теперь, зная алгоритм вычисления скорости, легко найти вклад звена в кинетическую энергию. Исходной служит формула [1]

$$\Delta K = \frac{1}{2} \int_V \rho v \cdot v dV,$$

где ρ – плотность материала звена;

V – объём звена.

Подставим в это выражение равенство (3.7) и получим

$$\Delta K = \frac{1}{2} v_k^B v_k^B \int_V \rho dV + \varepsilon_{klm} v_k^B \omega_l \int_V \rho y_m dV + \frac{1}{2} \varepsilon_{klm} \varepsilon_{kij} \omega_l \omega_i \int_V \rho y_m y_j dV.$$

С учётом формулы [3]

$$\varepsilon_{klm} \varepsilon_{kij} = \delta_{li} \delta_{mj} - \delta_{lj} \delta_{mi}$$

это выражение преобразуется к виду

$$\Delta K = \frac{M}{2} v_k^B v_k^B + M \varepsilon_{klm} v_k^B \omega_l y_{Cm} + \frac{1}{2} I_{lm} \omega_l \omega_i \quad (3.10)$$

где M – масса звена;

y_{Cm} – координаты центра тяжести;

I_{lm} – тензор инерции, определяемые соотношениями [1]

$$M = \int_V \rho dV; \quad y_{Cm} = \frac{1}{M} \int_V \rho y_m dV; \quad I_{lm} = \int_V \rho (I_{lm} y_i y_i - y_l y_m) dV.$$

Сумма выражений (3.10) по всем звеньям представляет собой функцию (2.1). Таким образом, все величины, необходимые для решения задачи, определены.

ПРИМЕР РАСЧЁТА

Схема двухзвенного механизма, моделирующего движение стрелка при автоматической стрельбе, представлена на рисунке 3. Оба звена рассматриваются как круговые цилиндры длиной l и радиусом R . К каждому цилиндру приложена сила тяжести G , направленная вертикально вниз и равная по модулю Mg , где g – ускорение свободного падения. Ось y_3 системы координат, жёстко связанной с первым звеном, направлена по оси цилиндра, ось y_1 в начальном положении лежит в плоскости чертежа. Шарнирное закрепление в точке A таково, что звено имеет две степени свободы, описываемыми ненулевыми в общем случае обобщенными координатами – углами φ_1 и θ_1 (здесь индекс обозначает номер звена). Изменение

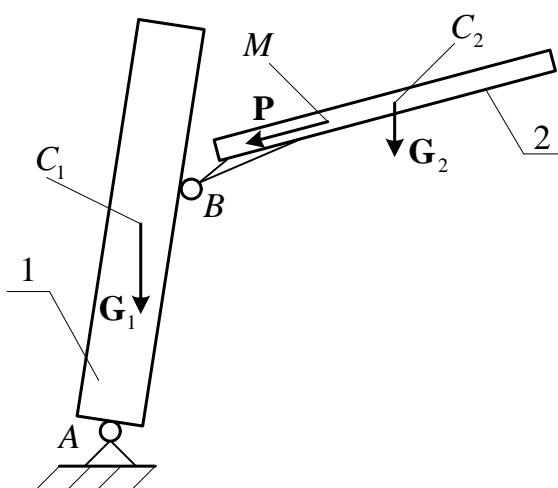


Рисунок 3 – Расчетная схема двухзвенного механизма

1 – стрелок; 2 – оружие; C_1, C_2 – центры тяжести звеньев; M – точка приложения силы P .

Моменты сопротивления в шарнире B характеризуются соотношениями

$$M_{\theta_2} = M_{\theta_{20}} - k_{\theta_2} (\theta_2 - \theta_{20}); \quad M_{\psi_2} = M_{\psi_{20}} - k_{\psi_2} (\psi_2 - \psi_{20}),$$

где $M_{\theta_{20}}, M_{\psi_{20}}$ – равновесные (начальные) значения моментов;

k_{θ_2}, k_{ψ_2} – жесткости крепления;

θ_{20}, ψ_{20} – начальные значения углов.

К звену 2, помимо силы тяжести, приложена также сила P , направленная по оси цилиндра. Модуль этой силы зависит от времени по закону

$$|P| = \begin{cases} P, & t \in [kT - 1, kT + \tau) \\ 0, & t \notin [kT - 1, kT + \tau) \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots$$

где T – интервал времени от начала предыдущего выстрела до начала следующего;

τ – время действия нагрузки;

k – номер выстрела.

Таким образом, рассматриваемая механическая система имеет четыре степени свободы, и решение задачи сводится к решению задачи Коши для восьми дифференциальных уравнений первого порядка. Для решения этой задачи использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности [2]. Исходные данные для первого звена приведены в таблице 1, а для второго – в таблице 2. Координаты в таблице 1 даны в системе координат, жестко связанной с первым звеном, а в таблице 2 – со вторым. Остальные исходные данные таковы: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $T = 0,1 \text{ с}$; $\tau = 0,001 \text{ с}$; $P = 7000 \text{ Н}$. Так как движение начинается из состояния покоя, начальные значения обобщенных скоростей и обобщенных импульсов равны нулю. Начальные значения $M_{\phi_{10}}, M_{\theta_{10}}, M_{\theta_{20}}, M_{\psi_{20}}$ определяются из уравнений (1.6) при $t = 0$.

Таблица 1 – Исходные данные для первого звена

$M, \text{ кг}$	$l, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	Координаты точки $C_1, \text{ м}$			Координаты точки $B, \text{ м}$			$k_{\phi_1}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$k_{\theta_1}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$\phi_{10}, \text{ град}$	$\theta_{10}, \text{ град}$
			y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3				
75	1,8	0,15	0	0	0,9	0,05	-0,14	1,3	100	500	0	0

Таблица 2 – Исходные данные для второго звена

$M,$ кг	$l,$ м	$R,$ м	Координаты точки $C_2, м$			Координаты точки $M, м$			$k_{\theta 2},$ $H \cdot м$	$k_{\psi 2},$ $H \cdot м$	$\theta_{20},$ град	$\psi_{20},$ град
			y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3				
3,5	0,5	0,05	-0,05	0	0,55	0	0	0,35	50	10	90	0

На рисунках 4, 5 представлены результаты расчёта: приращения углов

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{10}; \quad \Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{10}; \quad \Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{20}; \quad \Delta\psi_2 = \psi_2 - \psi_{20}$$

как функции времени.

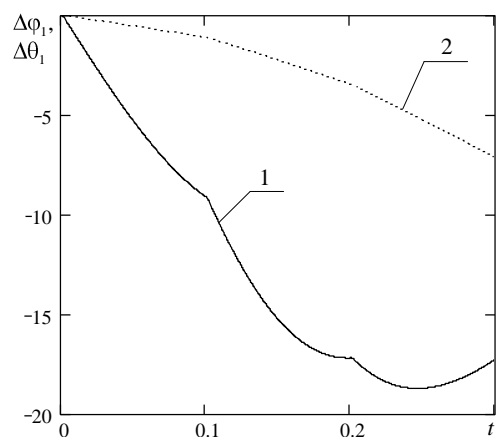


Рисунок 4 – Приращения углов поворота первого звена (град) в зависимости от времени (с)

1 – $\Delta\varphi_1$ (град); 2 – $\Delta\theta_1$ (град)

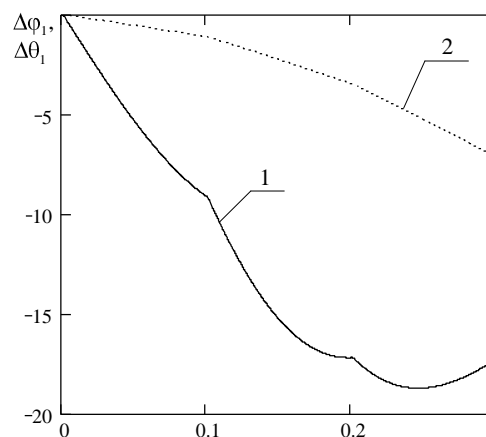


Рисунок 5 – Приращения углов поворота второго звена (град) в зависимости от времени (с)

1 – $\Delta\theta_2$ (град); 2 – $\Delta\psi_2$ (град)

Такие зависимости представляют интерес для инженерной практики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод отличается отсутствием трудоёмкого и требующего высокой квалификации процесса составления уравнений движения. Кроме того, все звенья описываются математически единообразно. Поэтому усложнение механической системы приводит лишь к удлинению времени счёта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голдстейн, Г. Классическая механика / Г. Голдстейн. – М.: Наука, 1975. – 416 с.
2. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
3. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
4. Вукобратович, М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / М. Вукобратович, Д. Стокич, Н Кирчански. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
5. Fischer, I.S. Numerical analysis of displacements in spatial mechanism with ball joints / I.S. Fischer // Mech. and Mach. Theory. – 2000. – Vol. 35, № 11. – P. 1623-1640.

Полевой Валерий Евгеньевич

Тульский артиллерийский инженерный институт

Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и ремонт ракетно-артиллерийского вооружения»

Тел. (4872) 31-57-90, 35-23-21

E-mail: polevoyoficer@rambler.ru

М.Б. БОРОДИНА, Л.А. САВИН

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

В статье рассмотрены принципы работы и конструктивное исполнение нового типа предохранительных муфт с гидромеханическим исполнительным механизмом. Приведена постановка и результаты теоретических и экспериментальных исследований муфт с передаточным дифференциальным механизмом типа винт-гайка. Сделан анализ возможности применения предохранительных муфт данного типа в приводах тяжело нагруженных машин.

Ключевые слова: предохранительная муфта, гидромеханический механизм, передаточный дифференциальный механизм, винт-гайка, математическая модель, время срабатывания.

In this article is described theoretical and experimental research of the hydro mechanical safety muff's dynamics of driving gears of heavily loaded machines. The construction of the hydro mechanical safety muffs of such type is worked out rather faintly. Their potential possibilities are high enough. That is why the further elaborations and developments are needed. The research of the dynamics of muff's work pointed out that in case of an emergency overload, the muff ensures the reliable protection of an electric motor.

Key words: safety clutch, hydro-mechanical mechanism, differential gear mechanism, screw nut, mathematical model, response time.

Конструкции предохранительных муфт с гидромеханическим исполнительным механизмом разработаны довольно слабо. Однако их потенциальные возможности достаточно велики, и они требуют дальнейшей разработки и совершенствования. В СТИ НИТУ МИСиС разработан новый класс предохранительных гидромеханических муфт, включающий 7 вариантов исполнения передаточного механизма и 3 варианта исполнения гидросистемы [1]. Для разработки методики расчета нового класса муфт необходимо провести цикл теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования проводились для схемы муфты с дифференциальным передаточным механизмом винт-гайка (рисунок 1). Передача момента от ведущего вала I, связанного с электродвигателем через редуктор (на рисунке 1 не показаны), к ведомому валу II осуществляется посредством передаточного дифференциального механизма винт-гайка. Винт 1 связан с ведущей полумуфтой через шлицевую втулку 4 и, вращаясь вместе с валом I, может перемещаться относительно втулки 4, а гайка 2 связана с полумуфтой II посредством зубчатой передачи. Кроме того, винт 1 через подшипниковый узел 5 связан с поршнем гидроцилиндра 3 гидросистемы муфты. Гидроцилиндр 3, в свою очередь, гидравлически связан либо с демпфером 7, либо с гидроаккумулятором 8, в зависимости от положения гидрораспределителя 9.

Муфта работает следующим образом. В рабочем состоянии подвижный элемент гидрораспределителя 9 находится в положении, как показано на рисунке 1, что обеспечивает гидравлическую связь поршневой полости гидроцилиндра 3 с демпфером 7. При возрастании момента на муфте, нарушается баланс в дифференциальном механизме, что приводит к замедлению вращения вала II, осевому смещению винта 1 и сжатию гидроцилиндра 3. Давление в поршневой полости гидроцилиндра 3 повышается, и часть рабочей жидкости перетекает в демпфер 7 до тех пор, пока в дифференциальном механизме не установится состояние равновесия. При снижении момента на валу II, процесс протекает в обратном порядке. Таким образом, осуществляется демпфирование периодически изменяющихся и случайных пиковых нагрузок со стороны технологического оборудования на привод.

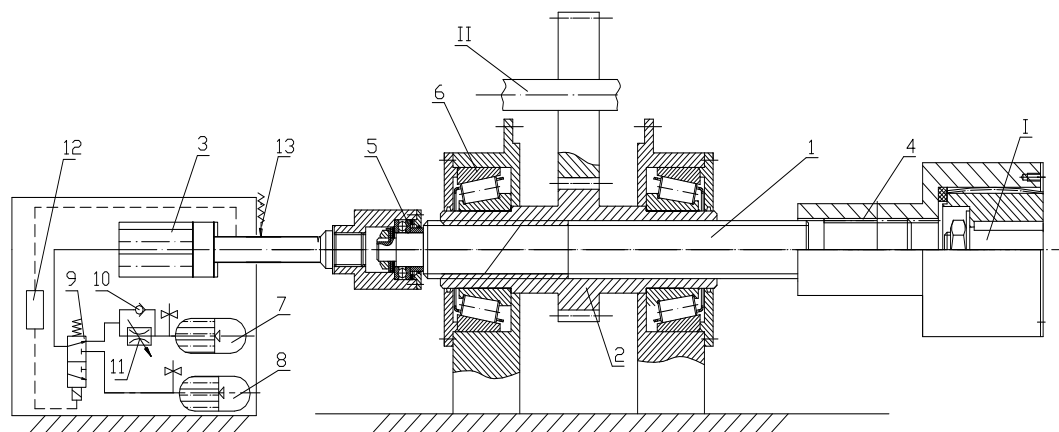


Рисунок 1 – Макет муфты с передаточным дифференциальным механизмом винт-гайка

Если момент на муфте превышает допустимый достаточно продолжительное время, то система управления по моменту на муфте 12 обеспечивает смещение подвижного элемента гидрораспределителя 9 в крайнее положение. При этом демпфер 7 отсекается от линии гидроцилиндра, и к ней подключается гидроаккумулятор 8, рабочее давление в котором в этот момент значительно ниже, чем в поршневой полости гидроцилиндра 3. Остатки рабочей жидкости из гидроцилиндра 3 перетекают в гидроаккумулятор 8, винт 1 занимает крайнее левое положение (на рисунке 1) и фиксируется устройством 13, шлицы винта 1 выходят из зацепления со шлицами на втулке 4, что обеспечивает кинематическое размыкание полумуфт (валов I и II). При этом отключается электродвигатель.

Автоматически или по команде оператора система управления 12 обеспечивает отключение устройства фиксации 13, при этом жидкость из гидроаккумулятора 8 перетекает в гидроцилиндр 3, смещая винт вправо. После чего система управления 12 возвращает в исходное положение подвижный элемент гидрораспределителя 9. Демпфер 7 соединяется с поршневой полостью гидроцилиндра 3, винт 1 занимает исходное положение и муфта приходит в исходное состояние, то есть восстанавливается. Для снижения скорости обратного хода при восстановлении установлен в гидросистему обратный клапан 10 и регулируемый дроссель 11.

В соответствии с рассмотренной конструкцией макета муфты представим её расчётную схему (рисунок 2).

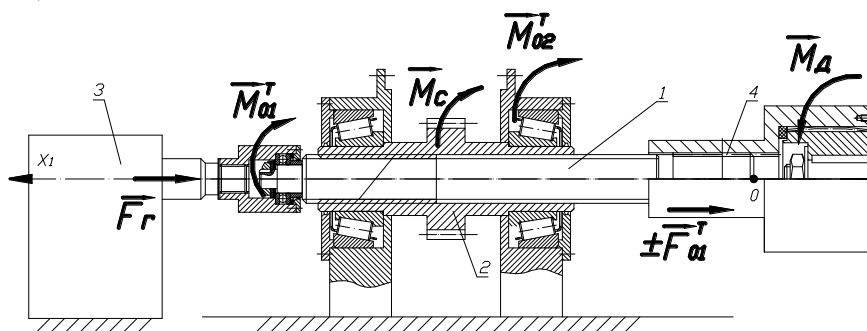


Рисунок 2 – Расчётная схема макета муфты

Можно выделить следующие движения основных элементов муфты: на входе – вращательное движение винта φ_1 ; на выходе – перемещение винта x_1 вдоль оси X_1 и вращение гайки φ_2 . Таким образом, математическая модель муфты должна описывать движение системы, имеющей две степени свободы.

В качестве обобщённых координат выберем осевое смещение винта $q_1 = x_1$ и вращение гайки $q_2 = \varphi_2$.

Угол поворота винта можно выразить через обобщённые координаты:

$$\delta\varphi_1 = \delta\varphi_2 + \frac{\delta x_1}{t} = \delta\varphi_2 + \frac{\delta x_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (1)$$

Момент от привода M_d определяется с помощью уравнений динамики работы электродвигателя на линейном участке характеристики ($M_{эд} < 0,8 \cdot M_K$): $M_{эд} = \beta \cdot (\omega_0 - \omega_1)$, где: β – модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики [4]; ω_0 – угловая скорость не нагруженного вала электродвигателя; ω_1 – текущее значение угловой скорости вала электродвигателя.

С учётом редуктора момент, передаваемый от привода к винту:

$$M_{\dot{A}} = i_{ред}^2 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \dot{\varphi}_1 \right) \quad (2)$$

где $i_{ред}$ – передаточное отношение редуктора;

$\dot{\varphi}_1$ – угловая скорость вала винта.

Со стороны гидросистемы 3 к винту 1 приложена осевая сила $\overline{F_r}$, которая зависит от давления в гидросистеме. На данном этапе исследований представим гидросистему, как упругий элемент $F_r = F_{r0} + C_{rc} \cdot x_1$, где F_{r0} - усилие, создаваемое начальным давлением в гидросистеме 3; C_{rc} - коэффициент жёсткости гидросистемы; x_1 - ход винта.

Со стороны гайки 2 на резьбу винта 1 будет передаваться усилие $\overline{N_{21}}$ (рисунок 3,а), вращательная составляющая $\overline{F'_b}$ которого обеспечивает момент M_{21} на винте, а осевая составляющая $\overline{F'_o}$ - преодолевает силу давления со стороны гидросистемы 3.

Движение элементов муфты опишем с использованием вариационных принципов на основе уравнений Лагранжа второго рода.

Кинетическая энергия системы складывается из кинетической энергии винта T_1 и кинетической энергии гайки T_2 .

$$T = T_1 + T_2 = \frac{x_1^2}{2} \cdot \left(m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha} \right) + \frac{\dot{\varphi}_2^2}{2} \cdot (J_1 + J_2) \pm \dot{\varphi}_2 \cdot \dot{x}_1 \cdot \frac{J_1}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha}$$

где J_1, J_2 – моменты инерции винта и гайки;

m_1 – масса винта;

$\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ – угловые скорости винта и гайки;

\dot{x}_1 – скорость поступательного движения винта.

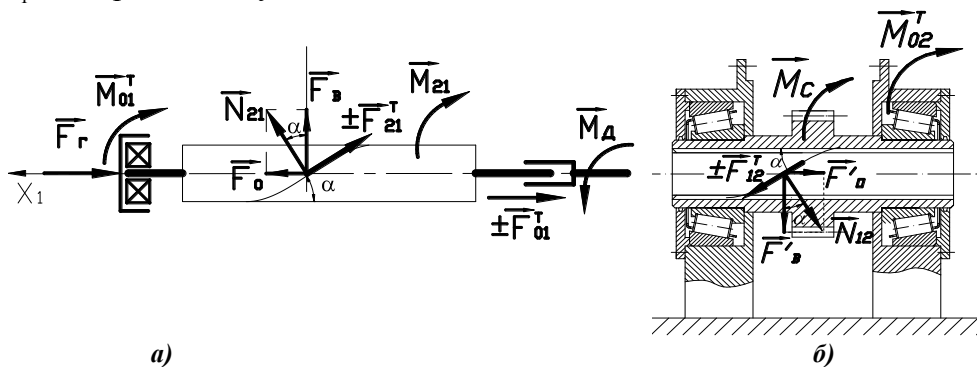


Рисунок 3 – Расчётные схемы: а) винта, б) гайки

Обобщённые силы Q_i :

для винта:
$$Q_1 = \frac{\delta A_1}{\delta x_1} = \frac{2 \cdot M_{21} - M_d + M_{01}^T}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} - F_r - F_{01}^T - F_{21}^T \cdot \cos \alpha ;$$

$$\text{для гайки: } Q_2 = \frac{\delta A_2}{\delta \varphi_2} = M_{12} - M_C - M_{02}^T .$$

Тогда динамика работы муфты, с учётом (2), опишется системой:

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{x}_1 \cdot \left(m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + \ddot{\varphi}_2 \cdot \frac{J_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} &= \\ = \frac{2 \cdot M_C + 2 \cdot M_{02}^T - M_D + M_{01}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - F_{Г0} - C_{Г} \cdot x_1 - F_{01}^T - F_{21}^T \cdot \cos \alpha \\ \ddot{\varphi}_2 \cdot (J_2 + J_1) + \ddot{x}_1 \cdot \frac{J_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} &= M_D - M_C - M_{02}^T - M_{01}^T \\ M_D &= i_{ред}^2 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \left(\dot{\varphi}_2 + \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Наиболее ответственным для работы предохранительной муфты является режим работы, на котором нагрузка в технологической машине превышает предельно допустимые значения. Самой опасной является аварийная ситуация, в которой, M_C изменяется скачкообразно, причём его величина значительно превышает предельное значение момента на валу привода $M_{C_{np}}$ (заклинивание механизма). При этом муфта должна разомкнуться, защитив привод.

Рассмотрим этот случай. Пусть в начальный момент времени $M_C \gg M_{C_{np}}$, тогда гайка останавливается $\dot{\varphi}_2 = 0$, и в передаточном механизме муфты остаётся одна степень свободы, а значит из уравнения (2):

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

Тогда система уравнений (3), описывающая динамику работы муфты, примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{x}_1 \cdot \left(m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) &= \frac{M_D - M_{01}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - F_{Г0} - C_{Г} \cdot x_1 - F_{01}^T - F_{21}^T \cdot \cos \alpha \\ M_D &= i_{ред}^2 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Смещение винта в начальный момент времени определим из установившегося режима работы:

$$x_1 = x_H, \quad \dot{x}_1 = 0, \quad \ddot{x}_1 = 0, \quad \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \omega_H, \quad \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 = 0, \quad M_C = M_{C_H},$$

где x_H – номинальное смещение винта;

ω_H – номинальная угловая скорость вала привода;

M_{C_H} – номинальный момент сил сопротивления.

Из первого уравнения системы (3) определим среднее значение x_H :

Номинальное осевое смещение винта:

$$x_{H_{cp}} = \frac{2 \cdot M_{C_H} - M_{D_H} + M_{01}^T + 2 \cdot M_{02}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot C_{Г}} - \frac{F_{Г0}}{C_{Г}} = \frac{M_{C_H} + M_{02}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot C_{Г}} - \frac{F_{Г0}}{C_{Г}} \quad (5)$$

Из второго уравнения системы (4) можно найти скорость осевого смещения винта, появившуюся в результате резкой остановки гайки:

$$\dot{x}_{10} = \dot{x}_{1H} = \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \frac{M_{D_H}}{i_{ред}^2 \cdot \beta} \right) \cdot r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

Подставив значение M_D и значения сил и моментов трения в первое уравнение системы (4) и преобразовав его, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение 2-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$a \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot \dot{x}_1 + c \cdot x_1 = d \tag{7}$$

$$\text{где } a = \left(m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha} \right),$$

$$b = \frac{i_{\text{ред}}^2 \cdot \beta}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} \cdot \left(\frac{1}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} - \frac{f_{01}}{r_B'} - \frac{f_{21}}{r_1} \right),$$

$$c = C_f \cdot \left(1 + \frac{f_{01}^n \cdot r_B}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} - \frac{f_{01} \cdot f_{01}^n \cdot r_B}{r_B'} - \frac{f_{21} \cdot f_{01}^n \cdot r_B}{r_1} \right),$$

$$d = i_{\text{ред}} \cdot \beta \cdot \omega_0 \cdot \left(\frac{1}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} - \frac{f_{01}}{r_B'} - \frac{f_{21}}{r_1} \right) - F_{\Gamma 0} \cdot \left(1 + \frac{f_{01}^n \cdot r_B}{r_1 \cdot \text{tg} \alpha} - \frac{f_{01} \cdot f_{01}^n \cdot r_B}{r_B'} - \frac{f_{21} \cdot f_{01}^n \cdot r_B}{r_1} \right)$$

Аналитически интегрируя уравнение (7), находим закон осевого движения винта и его скорость. В качестве примера, подставим числовые значения параметров макета муфты и получим:

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_1 = \tilde{N}_1 \tilde{a}^{-0,0264t} + C_2 \tilde{a}^{-986803t} + 2,684, \\ \dot{\tilde{\alpha}}_1 = \tilde{N}_1 \cdot (-0,0264) \cdot \tilde{a}^{-0,0264t} + C_2 \cdot (-986803) \cdot \tilde{a}^{-986803t} \end{cases}$$

Начальные условия из уравнений (5) и (6): при $t = 0$, $x_{10} = x_H$, $\dot{x}_{10} = \dot{x}_{1H}$.

С учётом начальных условий: $C_1 = -2,669$, $C_2 = -2,21 \cdot 10^{-11}$.

Момент на валу привода определяем из второго уравнения системы (4):

$$M_D = 5,32 \cdot 1600 \cdot \left(\frac{104,67}{40} - \frac{0,7046 \cdot e^{-0,0264t} + 21,8 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-986803t}}{0,0275} \right)$$

Графики полученных функций представлены на рисунке 4.

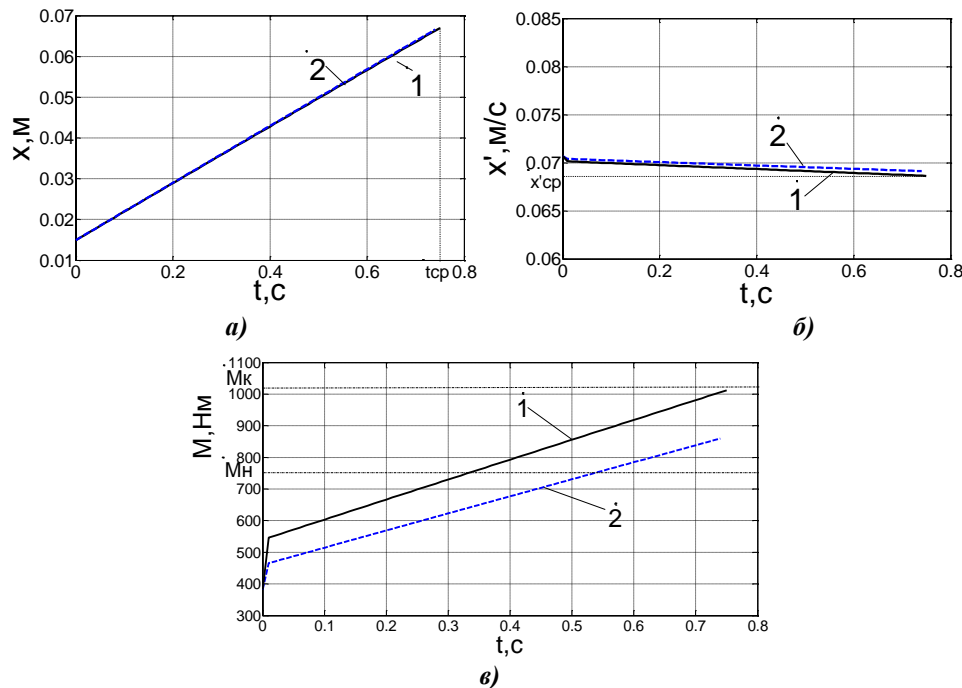


Рисунок 4 – Зависимости а) осевого смещения винта; б) скорости осевого смещения винта; в) момента на приводе (1 – при $f = 0,1$; 2 – при $f = 0,05$)

Исследования аварийного режима работы муфты показали, что:

1) В случае аварийной перегрузки (заклинивание технологической машины), муфта надёжно защищает электродвигатель, срабатывая за 0,750с. При этом перегрузка электродвигателя по отношению к заданному моменту срабатывания не превышает 33%.

2) При снижении коэффициента трения в паре винт-гайка и в шлицевом соединении (с 0,1 до 0,05), время срабатывания муфты практически не меняется, но уменьшается величина момента, превышающего момент настройки на срабатывания;

3) При «мгновенном» нарастании момента сопротивления со стороны технологической машины, нарастание момента на валу привода происходит плавно и практически линейно;

4) При единичных импульсных аварийных нагрузках и нагрузках повышенной интенсивности, время которых не превышает 0,7с, муфта не размыкается, что позволяет избежать «ложных» срабатываний.

Установили, влияние конструктивных и рабочих параметров на время срабатывания муфты (рисунок 5).

Исследовав математическую модель муфты в системе MathLab с учётом параметров до-работанного экспериментального стенда (введена ступень клиноремённой передачи), определили время срабатывания $t_{cp} = 2,016$ с (при коэффициентах трения $f_{12} = 0,07$, $f_{01} = 0,07$ и общем передаточном отношении $i_{общ} = 110$).

При поддержке государственного Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (госконтракт № 3425р/5861 от 18.08.2005) был спроектирован и изготовлен макет муфты с передаточным дифференциальным механизмом типа винт-гайка и экспериментальный стенд для исследования макета муфты.

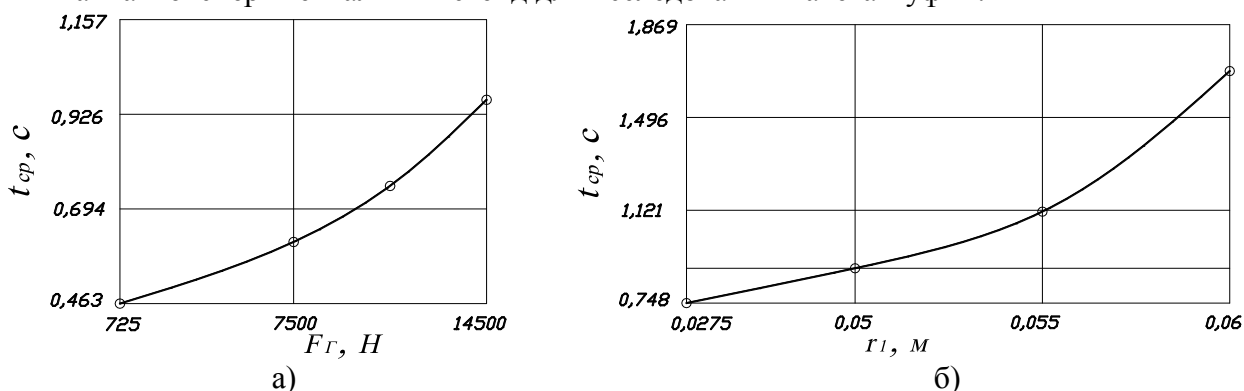


Рисунок 5 – Зависимость времени срабатывания от
 а) начального усилия на штоке гидроцилиндра,
 б) величины среднего радиуса резьбы

Экспериментальный стенд с макетом гидростатической муфты показан на рис.6.

Привод стенда осуществляется от электродвигателя 1 через ремённую передачу 2 и двухступенчатый редуктор 3. Макет предохранительной муфты состоит из шлицевой втулки 4, передаточного механизма винт – гайка 6, упорного подшипника 7, гидроцилиндра 8 и гидросистемы 9. Момент сопротивления имитируется нагрузочным устройством 10, которое представляет собой блок из двух дисковых колодочных тормозов с гидравлической системой привода от автомобиля «Газель». Все элементы стенда закреплены на общей раме.

При проведении экспериментов измерялись показания: давления в гидросистеме 9 и в тормозной колодке 10 датчиками давления 11 и 12 соответственно; осевого перемещения винта 5 потенциометрическим датчиком 13; периода вращения вала двигателя 1 контактным тахометром 14 (рисунок 6).

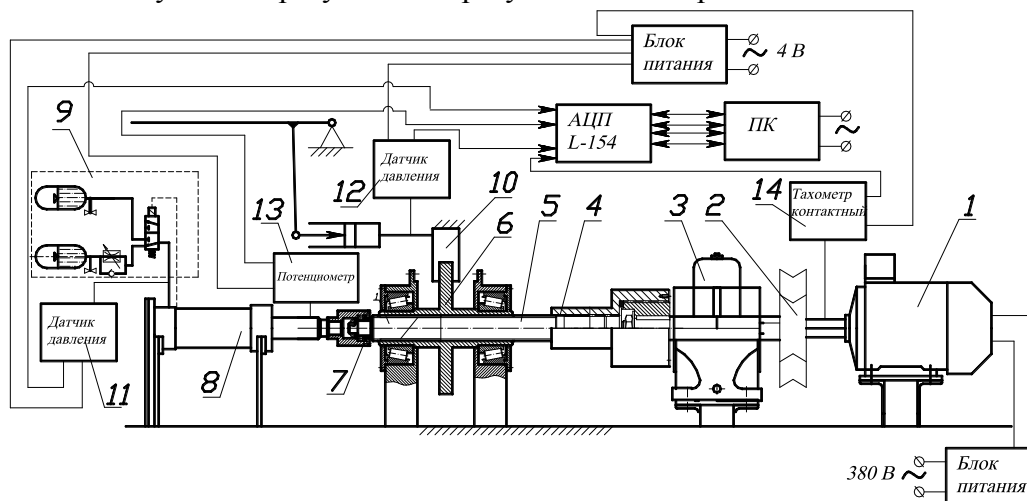
После отладки конструкции макета муфты и стенда был проведен предварительный цикл экспериментальных исследований (порядка 40 запусков). При этом:

– экспериментально подтверждена функциональная работоспособность конструкции предохранительной муфты с передаточным устройством типа винт-гайка и гидросистемы муфты;

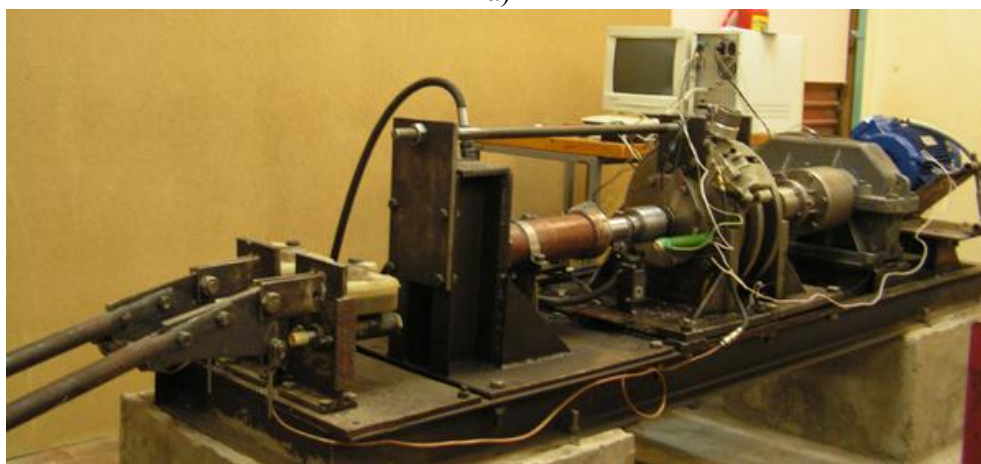
- при подаче момента сопротивления на гайку выше предельного, муфта всегда срабатывает и восстанавливается после соответствующей команды за 0,8-2,4 с.;
- при проведении первых экспериментов была выявлена довольно высокая скорость обратного хода винта при восстановлении муфты после срабатывания, для снижения которой был установлен в гидросистему муфты дополнительный регулируемый дроссель и обратный клапан;

Для экспериментальных исследований макета муфты поставлены задачи:

- определить рабочие параметры и время срабатывания муфты в аварийном режиме;
- сравнить полученные результаты с результатами теоретических исследований.



а)



б)

Рисунок 6 – Схема (а) и фотография (б) экспериментального стенда для исследования работы предохранительной муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом

Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены на рисунке 7.

В результате проведённых экспериментальных исследований установлено:

- подтверждена функциональная работоспособность предохранительной гидромеханической муфты с передаточным дифференциальным механизмом винт-гайка;
- подтверждена функциональная работоспособность гидросистемы с золотниковым гидрораспределителем;
- время аварийного срабатывания муфты составляет 2,19-2,36с. (теоретический результат $t_{cp} = 2,301$ с)
- закон поступательного движения винта является практически линейной функцией, экспериментальные значения отличаются от теоретических не более чем на 10,9%;
- характер изменения момента на валу двигателя (измерялся косвенно по показаниям датчика давления в гидросистеме 11 и контактного тахометра 14) согласуется с теоретическими расчётами и погрешность не превышает 21,6%.

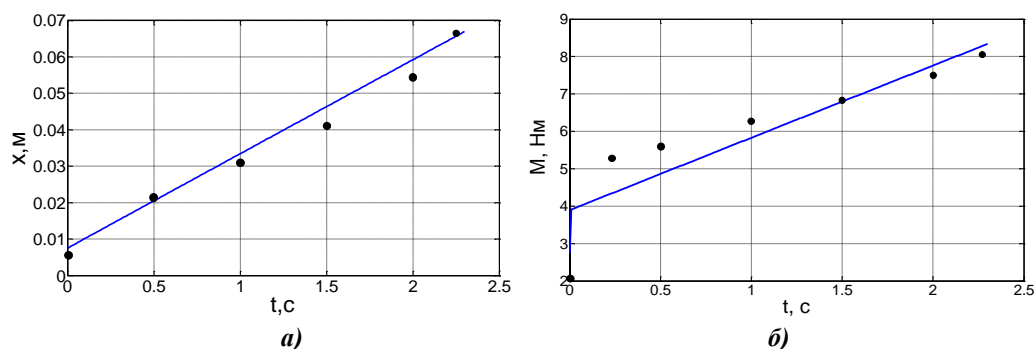


Рисунок 7 – Результаты теоретических (линия) и экспериментальных (точки) исследований: а) закон поступательного движения винта, б) характер изменения момента на валу двигателя

Исследования макета предохранительной муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом показали, что использование данного типа муфт в приводах тяжело нагруженных машин является перспективным и решает задачи снижения аварийности и затрат на восстановления работоспособности привода после аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование гидростатических муфт для защиты приводов тяжело нагруженного оборудования. / Шевченко Б.А., Булавин К.А., Бородина М.Б.// журнал «Сталь», №3, 2006 г. с. 68-72.
2. Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б., Сопилкин А.Г., Сопилкин Г.В., Шевченко Б.А. Гидростатическая муфта. Патент РФ № 2186270 Бюл.21, 2002. F16D 25/06, 25/08.
3. Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б., Сопилкин А.Г., Шевченко Б.А. Гидростатическая муфта. Патент РФ на изобретение № 2310778, Бюл.1, 2006. МКИ F 16D 25/06, 25/12, 31/00.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для ВУЗов. – 2-е издание перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. с.205-212.

Бородина Марина Борисовна

Старооскольский технологический институт
 Старший преподаватель кафедры «Прикладная механика»
 Тел. 8-910-369-71-21
 E-mail: borodina_marina@mail.ru

Савин Леонид Алексеевич

Орловский государственный технический университет
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»
 Тел. (4862) 41-98-85
 E-mail: savin@ostu.ru

Э.Г. КУЗНЕЦОВ

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЗАТВОРНОГО ТОРЦОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТИПА

В статье рассмотрена проблема повышения эффективности работы уплотнительных устройств. Изложен принцип работы нового типа торцевых уплотнений. Приведены теоретические соотношения для расчета и проектирования импульсного газозатворного уплотнения.

Ключевые слова: газозатворное уплотнение, торцевой зазор, статическая характеристика, математическая модель, импульс, уравнение Рейнольдса, баланс расходов.

In the article the problem of the need to improve the effectiveness of the seals. The principle of work of a new type of mechanical seal. The theoretical relations for the calculation and design of pulsed gas seal.

Key words: gas bolt seal, faec gap, static characteristics, mathematical model, momentum, Reynolds equation, balance of expenditure.

Проблема уменьшения утечек по валу перекачиваемых жидкостей и газов в окружающую среду для насосов и компрессоров является очень актуальной. С серьезными трудностями приходится сталкиваться при герметизации валов машин, которые перекачивают агрессивные, токсичные, взрыво- и пожароопасные среды. Согласно современным требованиям по обеспечению безопасности труда в таких насосах и компрессорах должны использоваться двойные уплотнения с затворной средой, давление которой превышает уплотняемое на 0,05 – 0,2 МПа. В настоящее время в оборудовании химических производств широко используются двойные торцевые уплотнения на жидкостной смазке, однако за последнее десятилетие 20-го века ведущие зарубежные компании разработали целый ряд конструкций двойных газовых торцевых уплотнений для насосов и аппаратов химических производств, которые по своим эксплуатационным характеристикам значительно превосходят уплотнения на жидкостной смазке [1–3]. Подавляющее большинство этих уплотнений используют газодинамический принцип действия, т.е. на уплотнительных поясках их колец выполнены спиральные, логарифмические, Т-образные или иные микроканавки, которые при вращении создают дополнительную газодинамическую силу, обеспечивающую функционирование этих уплотнений с микронным зазором в торцевой паре.

В данной работе рассмотрена конструкция, принцип действия и инженерная методика расчета основных характеристик импульсного затворного уплотнения, в котором одна пара уплотнительных колец выполняет функции двойного торцевого уплотнения. Конструкция проста, компактна и, благодаря более совершенному принципу создания зазора в торцевой паре, способна сохранять работоспособность в широком диапазоне уплотняемых и затворных давлений. Имеющийся опыт эксплуатации уплотнений этого типа на насосах химических производств подтвердил их высокую эффективность, надежность и безопасность [4].

Конструкция рассмотренного в статье затворного уплотнения показана на рисунке 1. Газозатворное уплотнение содержит только одну пару уплотнительных колец, одно из которых статорное 1 (т.е. невращающееся) неподвижно установлено в крышке 3 и уплотнено двумя резиновыми уплотнительными кольцами 5 круглого поперечного сечения. Роторное (вращающееся) уплотнительное кольцо 2 имеет возможность перемещаться в осевом направлении и установлено на втулке 6, которая закреплена на валу машины. Пружины 7 обеспечивают контакт уплотнительных колец на стоянке. В статорном уплотнительном кольце выполнены питающие отверстия 8 (питатели), через которые затворная среда, в данном случае газ, подается прямо в торцевой зазор. На уплотнительном пояске роторного кольца имеются замкнутые камеры 9, которые при вращении роторного кольца 2 имеют возможность соединяться с питающими отверстиями 8 статорного кольца.

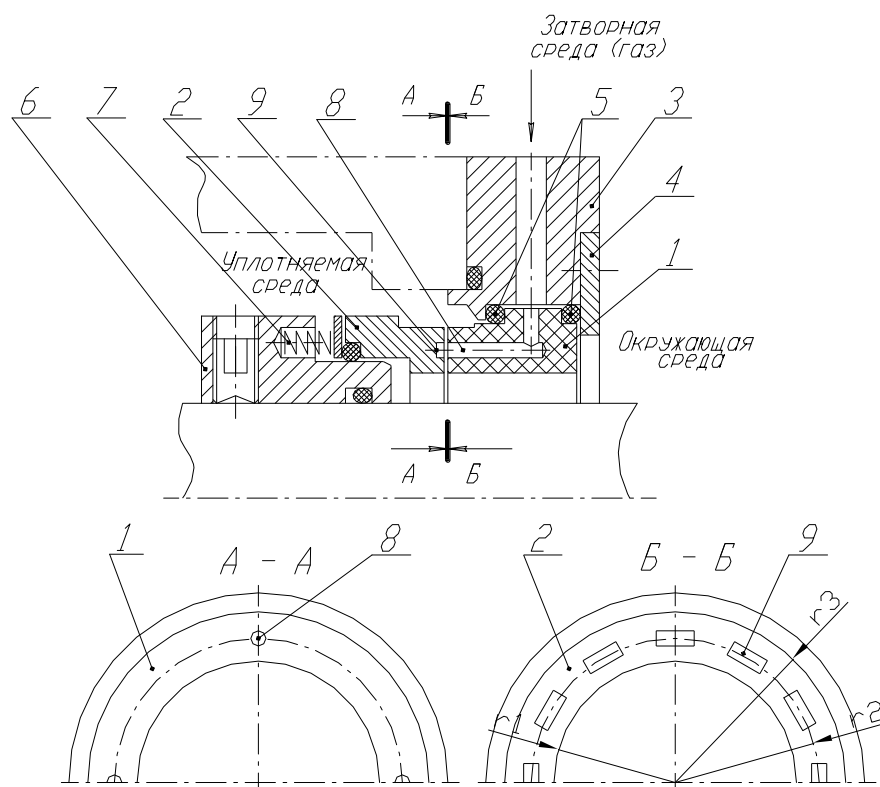


Рисунок 1 – Конструкция газозатворного импульсного торцевого уплотнения

Уплотнение функционирует следующим образом - на стоянке, при отсутствии вращения вала, давления затворного газа недостаточно для того, чтобы раскрыть торцовую пару и уплотнение работает как стояночное. Благодаря очень малой вязкости, газ равномерно заполняет торцовый зазор и препятствует протеканию через него уплотняемой среды. При вращении вала замкнутые камеры 9 поочередно сообщаются с питающими каналами 8, через которые в камеры поступает газ. За счет сжимаемости затворного газа, давление в камерах повышается до величины затворного, а после того как очередная камера покинет питающее отверстие, давление в ней плавно уменьшается за счет истечения из нее газа. Скорость падения давления в камере зависит от величины торцового зазора, образующегося между уплотнительными кольцами при вращении вала, т.к. из камер газ вытекает в рабочую среду и в атмосферу, поэтому чем больше сопротивление торцовых поясков над и под камерой, тем меньше будет амплитуда изменения давления в камере и наоборот. Кроме того величина минимального давления p_{2min} газа в замкнутой камере зависит от скорости вращения ротора, то есть промежутка времени $T-t$ между двумя последовательными запитками одной и той же камеры. При определенном образом подобранной геометрии уплотнительных поясков колец торцовой пары, коэффициента гидравлической нагрузки и сочетания уплотняемого p_4 и затворного p_1 давлений минимальное давление газа в замкнутых камерах p_{2min} остается выше чем p_4 . Принимая во внимание, что расстояние между камерами в окружном направлении невелико, давление на межкамерном промежутке можно считать равным осредненному давлению в камерах \bar{p}_2 . Следовательно, внутри торцового зазора (на кольцевом пояске, занятом камерами) создается сплошная зона, в которой давление газа превосходит давление среды перед уплотнением p_4 . Таким образом затворный газ в уплотнении выполняет две функции – создает сплошной слой смазки и обеспечивает запираение рабочей среды, т.е. препятствует ее вытеканию в атмосферу.

Подобные комбинированные затворные торцовые уплотнения, в которых затворная среда выполняет сразу две функции, не являются новинкой. В литературе [5-7] достаточно давно описаны гидростатические уплотнения, в которых затворная жидкость через питающие отверстия подается в сплошную кольцевую канавку (или карманы, разделенные тонки-

ми перемычками), выполненную на торцовом пояске статорного уплотнительного кольца (рисунок 2). Но такие затворные уплотнения не получили широкого распространения из-за того, что для нормальной работы им необходим ограничитель расхода затворной среды (дроссель), который должен достаточно тонко регулироваться, чтобы обеспечить требуемые характеристики (торцовый зазор величиной 0,002...0,004 мм, минимальный расход затворной среды и высокую статическую жесткость смазывающего слоя).

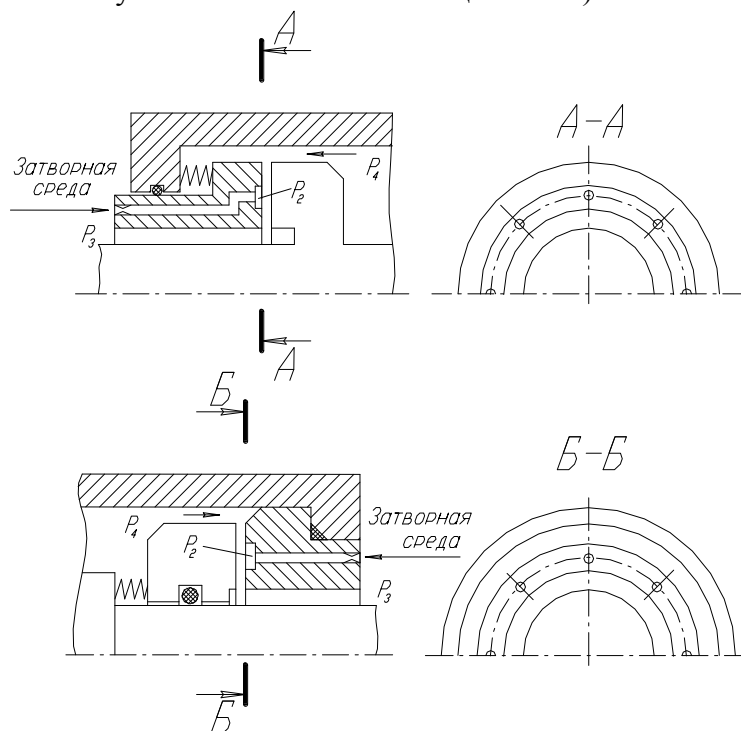


Рисунок 2 – Гидростатические торцевые уплотнения

Представленное в статье затворное импульсное уплотнение, несмотря на кажущееся сходство с гидростатическим, имеет принципиальные отличия в конструкции и способе создания торцового зазора, а самое главное, обладает совершенно отличной, гораздо более жесткой расходной и статической характеристикой. Иными словами, в достаточно широком, не менее 0,2 МПа, диапазоне изменения перепада давлений между затворным газом и уплотняемой средой $\Delta p = p_1 - p_4$ расходная и статическая характеристики изменяются мало. Это стало возможным благодаря импульсному принципу действия уплотнения, где ограничителем расхода затворного газа (дросселем) являются сами замкнутые камеры и плоские торцовые пояски (щель между уплотнительными поясками колец). Отдельно взятая камера не может вобрать в себя затворного газа больше, чем ей позволит ее объем, сжимаемость газа и разность давлений $\Delta p = p_1 - \bar{p}_{2\min}$. При увеличении затворного давления p_1 осредненное давление в камерах вырастает незначительно, т. к. время $t = \frac{\alpha_k + 2\alpha_p}{\omega}$, в течение которого камера соединена с питающим каналом, ограничено и при этом гораздо меньше, чем время $T - t$, за которое затворный газ вытекает из камеры через торцовую щель в уплотняемую среду и атмосферу.

В отличие от двойных уплотнений на газовой смазке представленное в статье газозатворное импульсное торцовое уплотнение имеет уникальную особенность, связанную с возможностью достаточно тонко регулировать величину торцового зазора путем изменения давления затворного газа. За счет этого значительно повышается надежность и долговечность герметизирующего узла, так как в случае нарушения бесконтактного режима работы торцовой пары, что можно зафиксировать по резкому увеличению расхода затворного газа, достаточно увеличить затворное давление при помощи регулятора и тем самым создать в

торцовой паре дополнительную раскрывающую силу достаточную для отстройки от опасного режима.

Несмотря на кажущуюся простоту торцовые уплотнения, функционирующие с микронным зазором в паре, являются сложной гидро-газомеханической системой, в которой зазор должен автоматически поддерживаться в области оптимальных значений (0,002-0,004 мм) при изменяющихся внешних факторах. Основной задачей расчета импульсных торцовых уплотнений является определение таких размеров уплотнительных колец, которые обеспечивают работоспособность уплотнения в заданном диапазоне скоростей вращения, уплотняемых и затворных давлений при минимально возможных потерях затворной среды и исключают возможность прорыва уплотняемой среды через торцовый зазор, то есть в торцовой щели должна быть создана непрерывная в окружном направлении область, в которой давление затворного газа выше давления уплотняемой среды. Для этого необходимо вывести зависимости, связывающие величину зазора в торцовой паре с давлениями затворной и уплотняемой сред, скоростью вращения, после чего можно определить расход затворной среды через уплотнение и величину осредненного давления затворного газа на пояске, где расположены замкнутые камеры.

Для инженерных расчетов торцовых уплотнений с саморегулируемым зазором принято использовать следующие допущения:

- течение газа в торцовом зазоре установившееся, изотермическое, ламинарное, дозвуковое;
- свойства затворной среды соответствуют свойствам идеального газа;
- уплотнительные поверхности колец образуют плоский торцовый зазор;
- давление в замкнутых камерах нарастает и убывает во времени по линейному закону;
- течение затворного газа в торцовом зазоре напорное, радиальное и осесимметричное, т.е. в окружном направлении давление не изменяется;
- малые высокочастотные (с частотой ωi_k , где i_k число камер) осевые колебания аксиально-подвижного кольца не учитываются;
- силы инерции газа в торцовом зазоре и силы трения во вторичном уплотнении пренебрежимо малы и в расчете их не учитываем.

Для определения давления затворного газа в замкнутых камерах рассмотрим баланс массовых расходов газа через кольцевой участок торцовой щели уплотнения с центральным углом α_k , равным угловой протяженности замкнутой камеры. При работе уплотнения затворный газ попадает в камеру только при сообщении ее с питающим каналом, поэтому баланс расходов газа из камеры в уплотняемую полость и в атмосферу будет определяться выражением

$$Q_{m3} t = Q_{m1} (T - t) + Q_{m2} (T - t), \quad (1)$$

где Q_{m1} – массовый расход затворного газа в уплотняемую полость через внешний торцовый дроссель с центральным углом α_k и ограниченными радиусами r_3 , r_{k2} за время $T - t$ (период между запитками камеры затворным газом через питающие каналы), где $T = \frac{2\pi}{\omega z}$, а z – количество питающих каналов.

Q_{m2} – массовый расход затворного газа в окружающую среду через внутренний (под камерой) торцовый дроссель с углом α_k и радиусами r_{k1} , r_1 за время $T - t$;

$$Q_{m3} = \frac{V_k}{RT^0} \left(p_{2\max} - p_{2\min} \right) \frac{1}{t} - \text{расход на сжатие газа в замкнутой камере с объемом } V_k$$

за время $t = \frac{\alpha_k + 2\alpha_p}{\omega}$, в течение которого камера соединена с питателем; α_p – центральный угол питающего канала; R – газовая постоянная; T^0 – абсолютная температура затворного газа в торцовом зазоре.

Согласно методике расчета импульсного уплотнения на жидкостной смазке [5-6], запишем уравнение баланса расходов (1) через проводимости

$$g_{m3} (p_1 - \bar{p}_2) = g_{m1} (\bar{p}_2^2 - p_4^2) + g_{m2} (\bar{p}_2^2 - p_3^2), \quad (2)$$

где p_1 – давление затворного газа на входе в уплотнение;

\bar{p}_2 – осредненное за время между двумя запитками давление затворного газа в замкнутой камере;

p_4 – давление уплотняемой среды в полости перед уплотнением;

p_3 – давление окружающей среды за уплотнением (обычно атмосферное).

Формулы для расчета проводимостей имеют вид

$$g_{m1} = \frac{\alpha_k x^3}{24\mu RT^o \ln\left(\frac{r_3}{r_{k2}}\right)} \left(1 - \frac{\alpha_k + 2\alpha_p}{2\pi}\right), \quad g_{m2} = \frac{\alpha_k x^3}{24\mu RT^o \ln\left(\frac{r_{k1}}{r_1}\right)} \left(1 - \frac{\alpha_k + 2\alpha_p}{2\pi}\right), \quad g_{m3} = \frac{2V_k}{RT^o T}. \quad (3)$$

За базовую принимаем величину торцового зазора на номинальном режиме $x_b = x_n$, тогда, выражая проводимости через базовые величины, запишем

$$g_{m1} = g_{m1b} u^3, \quad g_{m2} = g_{m2b} u^3, \quad g_{m3} = g_{m3b} \Omega = \frac{2V_k}{RT^o T_b p_b} \Omega. \quad (4)$$

Затем определяем осредненное за время между запитками камеры $T-t$ давление газа в камерах \bar{p}_2 . Для этого запишем уравнение баланса расходов (2) в безразмерном виде, разделив правую и левую часть на базовые величины - x_b, p_b, ω_b и базовую проводимость g_{m3b} . В качестве базовых принимаются величины торцового зазора x , давления затворной среды p_1 , угловой скорости ω на номинальном режиме работы уплотнения.

Безразмерное уравнение баланса расходов имеет вид

$$\Omega (\psi_1 - \psi_2) = \frac{g_{m1b}}{g_{m3b}} u^3 (\psi_2^2 - \psi_4^2) + \frac{g_{m2b}}{g_{m3b}} u^3 (\psi_2^2 - \psi_3^2), \quad (5)$$

где $u = \frac{x}{x_b}$ – безразмерный торцовый зазор;

$\Omega = \frac{\omega}{\omega_b}$ – безразмерная угловая скорость вращения;

$\psi_1 = \frac{p_1}{p_b}$, $\psi_2 = \frac{\bar{p}_2}{p_b}$, $\psi_3 = \frac{p_3}{p_b}$, $\psi_4 = \frac{p_4}{p_b}$ – безразмерные давления уплотняемой среды, в камерах, за уплотнением и в уплотняемой полости соответственно.

Принимая во внимание, что $\alpha_{m13} = \frac{g_{m1b}}{g_{m3b}}$, $\alpha_{m23} = \frac{g_{m2b}}{g_{m3b}}$, а $G_m = \alpha_{m13} + \alpha_{m23}$, получим из уравнения (5) статическую характеристику уплотнения, т.е. зависимость торцового зазора u от давления затворного газа ψ_1 , давления уплотняемой среды ψ_3 и частоты вращения Ω

$$u = \left[\frac{\Omega(\psi_1 - \psi_2)}{G_m \psi_2^2 - G_{m1}} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

где $G_{m1} = \alpha_{m13} \psi_4^2 + \alpha_{m23} \psi_3^2$.

Зависимость безразмерного осредненного давления затворного газа в замкнутой камере от зазора имеет вид

$$\psi_2 = \sqrt[3]{\frac{\Omega^2 + 4G_m u^3 (G_{m1} u^3 + \Omega \psi_1)}{2G_m u^3}} - \Omega. \quad (7)$$

Для построения статической характеристики уплотнения необходимо в выражение (6) подставить давление в камерах ψ_2 , которое в свою очередь зависит от нагрузки на аксиально-подвижное кольцо и распределения давления в торцовой щели. Для определения неизвестного давления запишем условие равновесия аксиально-подвижного кольца уплотнения под действием осевых сил

$$F_c = F_s, \quad (8)$$

где $F_c = p_4 S_4 + p_3 S_3 + F_{pr}$ – сила, действующая на тыльную поверхность аксиально-подвижного кольца (закрывающая торцовый зазор);

F_s – сила, действующая на уплотняющий пояс аксиально-подвижного кольца.

Площади определяются по формулам $S_3 = \pi(r_3^2 - r_4^2)$, $S_4 = \pi(r_4^2 - r_1^2)$;

F_{pr} – усилие предварительного поджатия пружин.

В отличие от жидкости в плоской щели эпюра давления газа имеет выпуклую форму. Закон распределения давления газа по радиусу уплотнительного пояса определяется путем интегрирования одномерного уравнения Рейнольдса для газовой смазки [8]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r x^3 \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0. \quad (9)$$

и для изотермического $\frac{p}{\rho} = const$ напорного течения газа

$$p(r) = \sqrt{p_{in}^2 - (p_{in}^2 - p_{out}^2) \left(\frac{r_{in} - r}{r_{in} - r_{out}} \right)}, \quad (10)$$

где p_{in}, p_{out} – давление на входе и выходе из торцовой щели соответственно;

r_{in}, r_{out} – радиус на входе и выходе из торцовой щели.

Силы, действующие на наружный и внутренний кольцевые пояски, ограниченные радиусами r_3, r_{k2}, r_{k1}, r_1 определяются путем интегрирования выражения (10) при соответствующих граничных условиях

$$F_1 = \frac{2}{3} \frac{(\bar{p}_2^3 - p_4^3)}{(\bar{p}_2^2 - p_4^2)} S_1, \quad F_0 = \bar{p}_2 S_0, \quad F_2 = \frac{2}{3} \frac{(\bar{p}_2^3 - p_3^3)}{(\bar{p}_2^2 - p_3^2)} S_2, \quad (11)$$

где $S_1 = \pi(r_3^2 - r_{k2}^2)$, $S_0 = \pi(r_{k2}^2 - r_{k1}^2)$, $S_2 = \pi(r_{k1}^2 - r_1^2)$.

С учетом (11) запишем выражение для силы в торцовом зазоре в безразмерном виде

$$\varphi_s = \frac{F_s}{p_b S_b} = \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_4^3}{\psi_2^2 - \psi_4^2} \frac{S_1}{S_b} + \psi_2 \frac{S_0}{S_b} + \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_3^3}{\psi_2^2 - \psi_3^2} \frac{S_2}{S_b}. \quad (12)$$

Уравнение равновесия аксиально-подвижного кольца в безразмерном виде

$$\psi_4 \frac{S_4}{S_b} + \psi_3 \frac{S_3}{S_b} + \chi = \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_4^3}{\psi_2^2 - \psi_4^2} \frac{S_1}{S_b} + \psi_2 \frac{S_0}{S_b} + \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_3^3}{\psi_2^2 - \psi_3^2} \frac{S_2}{S_b}, \quad (13)$$

где $S_b = 0,5S_1 + S_0 + 0,5S_2$ – базовая площадь;

$\chi = \frac{F_{pr}}{S_b p_b}$ – безразмерное усилие предварительного поджатия пружин.

Учитывая сложность выражения (13), решаем его численно относительно осредненного давления в камерах ψ_2 , после чего, подставляя его в уравнение (6), можем построить статическую характеристику газозатворного уплотнения.

Затворный газ поступает в уплотнение только через питатели, поэтому массовый расход газа через уплотнение за один оборот вала определяется по формуле

$$Q_{m0} = z i_k Q_{mk} t_{mk} + Q_{m3} t_{\rightarrow}, \quad (14)$$

где $Q_{mk} = \frac{\alpha_p \left(\frac{C_b u}{24 \mu R T^o \ln \frac{r_3}{r_{k2}}} \right) (p_1^2 - p_4^2)}{24 \mu R T^o \ln \frac{r_{k2}}{r_1}} \left(\frac{C_b u}{24 \mu R T^o \ln \frac{r_3}{r_{k2}}} \right) (p_1^2 - p_3^2)$ – расход газа через один питающий канал в уплотняемую среду и в атмосферу на межкамерном промежутке;

$t_{mk} = \frac{\alpha_{mk}}{\omega}$ – время, в течение которого питатель проходит межкамерный промежуток ($\alpha_{mk} = \frac{2\pi - i_k \alpha_k}{i_k} - \alpha_p$).

Объемный расход затворного газа через уплотнение за минуту (в Нл/мин)

$$Q_0 = n \frac{Q_{m0}}{\rho} 10^3,$$

где n - скорость вращения вала (об/мин).

Жесткость газовой пленки в торцовом зазоре является важнейшей характеристикой уплотнения, определяющей его надежность, т.е. стабильность величины торцового зазора при изменении условий эксплуатации или непрогнозируемых внешних воздействий на уплотнение (подвижка ротора в осевом направлении при износе подшипников и др.). Безразмерный коэффициент статической жесткости газозатворного торцового уплотнения находится путем дифференцирования выражения (12) по безразмерному зазору

$$-\chi_s = \frac{\partial \varphi_s}{\partial u}. \quad (15)$$

Так как выражение для безразмерного усилия φ_s , открывающего торцовую пару, имеет сложный вид, то ограничимся его численным дифференцированием.

Условием статической устойчивости уплотнения является наличие отрицательной обратной связи между регулируемой величиной (торцовым зазором) и внешними воздействиями (давлением уплотняемой среды, усилием поджатия пружин), поэтому область статической устойчивости уплотнения определяется из условия

$$\chi_s < 0. \quad (16)$$

При помощи представленной методики были спроектированы и изготовлены газозатворные импульсные уплотнения для насосов и компрессоров химических производств. Перед установкой на машины уплотнения проходили обкатку на экспериментальном стенде в лаборатории виброненадежности и герметичности центробежных машин кафедры Общей Механики и Динамики Машин Сумского государственного университета. Сравнение расчетных и экспериментальных расходных характеристик газозатворных уплотнений показало, что в большинстве случаев обнаруживается хорошее качественное и количественное их совпадение.

В завершение статьи следует отметить, что представленная методика расчета характеристик газозатворных уплотнений построена на основе широко известного подхода к расчету уплотнений импульсного типа, рассмотренного в монографиях [5-6]. В них принято допущение, что давление в замкнутой камере и давление на перемычке между камерами мало отличается друг от друга, поэтому для определения давления на кольцевом пояске занятом камерами достаточно рассмотреть баланс расходов через отдельно взятую камеру и допустить, что такое же осредненное давление как и в камере имеет место в любой точке этого пояска. С точки зрения авторов упомянутое упрощение правомерно, если расстояние между камерами мало и не превышает нескольких миллиметров, поэтому, к сожалению, остаются открытыми вопросы, связанные с учетом влияния количества камер на характер распределения давления затворной среды на пояске занятом камерами в окружном направлении.

Последние экспериментальные исследования газозатворных уплотнений показали, что варьируя количеством камер на торцовом пояске, можно добиться существенного изменения расходных и статических характеристик. Причем изменяются не только их количественные, но и качественные показатели, в том числе и статическая жесткость. Поэтому основной задачей предстоящих исследований следует считать создание математической модели импульсных уплотнений, позволяющей получить более достоверную картину распределения давления в торцовом зазоре, учитывая количество и расположение замкнутых камер на торцовом пояске аксиально-подвижного уплотнительного кольца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dry-running double seal for process pumps.\ BW/IP, Sealing Technology Newsletter No. 16, April, 1995, pp.2-3.
2. William V. Adams. Innovative technology uses gas in place of liquid to lubricate double mechanical seals.\ Sealing Technology Newsletter No. 11, November, 1994, pp. 9-12.

3. Patrick M. Flatch. Dry-running seal technology for emission containment. \ Sealing Technology Newsletter No. 10, October, 1994, pp. 8-11.
4. Y.Gaft et al. Development and application of double pulse gas-liquid seals. // Proc. 16th International Conf. on Fluid Sealing. – Brugge, Belgium, 2000.- P.255-269.
5. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. М.: Машиностроение. 1980.- 200 с.
6. Марцинковский В.А., Ворона П.Н. Насосы атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат. 1987.- 256 с.
7. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник./ Под общей ред. Голубева А.И. и Кондакова Л.А.-М.: Машиностроение, 1986, 464 с.
8. Лучин Г.А., Пешти Ю.В., Снопов А.И. Газовые опоры турбомашин. М.: Машиностроение, 1989.-240 с.

Кузнецов Эдуард Генадьевич

Сумской государственный университет

Старший преподаватель кафедры «Информационные технологии проектирования»

Тел.

E-mail: ed_kuznets@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

УДК 621.9

А.А. БАННИКОВ, А.И. БАННИКОВ, Я.А. СОМОВА, Д.В. СЛЕПЫШКОВА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ФРИКЦИОННОЙ РАЗРЕЗКИ ГОРЯЧИХ ТРУБ ФРИКЦИОННОЙ ДИСКОВОЙ ПИЛОЙ С ЗУБЬЯМИ

Недостаточная стойкость фрикционных дисковых пил с зубьями и образование крупных заусенцев на торцах трубы ставят задачу исследования температурных режимов при фрикционной резке горячих труб. Для решения этой задачи создана математическая модель теплового баланса фрикционной резки горячих труб фрикционной дисковой пилой с зубьями, позволяющая рассчитать распределение тепловых потоков.

Ключевые слова: фрикционное резание, тепловой баланс процесса резания, контактная температура, толщина расплавленного слоя.

Insufficient durability of friction cutting saws with tooth blades and formation of large burrs on the pipe end sets the problem of investigation temperature rates at friction cutting of hot pipes. The mathematical model of a heat balance of friction cutting of hot pipes by the means of friction cutting saw with tooth blades has been created to solve the problem. This mathematical model allows to calculate the heat streams.

Key words: friction cutting, heat cutting balance, contact temperature, melt quantity.

Основные показатели процесса фрикционной резки [1,3], как и сама возможность его осуществления, в основном определяются тепловыми процессами, сопровождающими резку. Поэтому управление процессом фрикционной резки – это в значительной степени управление тепловыми потоками, контактной температурой, температурными полями в заготовке и инструменте [2].

При термофрикционном резании пилой происходит процесс трения по задней поверхности зуба пилы с выделением тепла и образованием тонкого расплавленного слоя.

Тепловой поток, равномерно выделяющийся по площадке трения, найдется из зависимости [3]:

$$q_0 = \frac{N_{рез}}{B \cdot l_3 \cdot z_k} \quad (1)$$

где q_0 – тепловой поток, выделяющийся из зоны трения, Дж/м²·с;

l_3 – длина контактной площадки по задней грани пилы, м;

z_k – число зубьев в контакте;

B – ширина пилы, м;

$N_{рез}$ – мощность резания, Вт.

Длина контактной площадки по задней грани пилы $l_3 = 3,5$ мм; число зубьев в контакте для максимальной длины контакта 42 мм и расстояния между зубьями пилы 16 мм, равно $z_k=2$; ширина пилы $B = 8$ мм.

Следовательно, по формуле (1) интенсивность теплового потока по задней грани от трения при резании равна:

$$q_0 = \frac{160}{0,008 \cdot 0,0035 \cdot 2} \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

Тепловой поток, возникающий при трении зуба пилы по обрабатываемому материалу (рисунок 1), распределяется в трубу, с образованием расплавленного слоя, и в зуб пилы в со-

отношении $\frac{1-b}{b}$.

*Статьи разделов «Моделирование технологических процессов» – «Инновации и кадры в машиностроении», «Инновации и кадры в машиностроении» публикуются по материалам XII Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы машиностроения – ТЕХНОЛОГИЯ-2010»

$$q_0 = \frac{q_3}{b} = \frac{q_{mp}}{1-b},$$

где q_3 – тепловой поток, уходящий в зуб фрезы, Дж/м²·с;
 q_{mp} – тепловой поток, уходящий в трубу, Дж/м²·с;
 b – коэффициент баланса.

Для нахождения величины b рассмотрим контакт зуба пилы, движущейся со скоростью v , и плоской пластины. По площадке контакта оба тела имеют равную среднюю температуру: $T_{cp1} = T_{cp2}$.

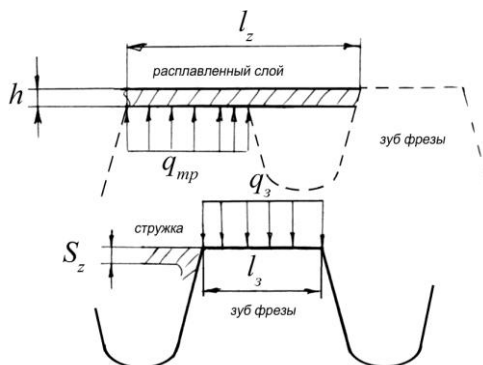


Рисунок 1 – Распределение тепловых потоков из зоны контакта в зуб пилы и трубу q_3 – тепловой поток, уходящий в зуб фрезы, q_{mp} – тепловой поток, уходящий в трубу, l_3 – длина контактной площадки по задней грани пилы, l_z – расстояние между зубьями пилы, h – толщина расплавленного слоя, S_z – подача на зуб пилы

На пластину действует полосовой быстродвижущийся источник тепла. Температура контактной площадки со стороны пластины найдется из выражения [3]:

$$T_{mp} \ll 0 \gg = \frac{2q_{mp} \sqrt{\omega_{mp} \cdot l_3}}{\lambda_{mp} \sqrt{\pi \cdot v}} \cdot \sqrt{\psi},$$

$$\psi = \frac{x}{l_3},$$

где ω_{mp} – коэффициент температуропроводности материала трубы, м²/с;
 v – скорость вращения пилы, м/с;
 λ_{mp} – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/м·град;
 l_3 – длина контактной площадки по задней грани пилы, м.

Средняя температура на контактной поверхности:

$$T_{cp1} = \frac{4q_{mp} \sqrt{\omega_{mp} \cdot l_3}}{3\lambda_{mp} \sqrt{\pi \cdot v}}.$$

На зуб действует мгновенный неподвижный источник тепла. Температура контактной площадки со стороны зуба найдется из выражения:

Средняя температура на контактной поверхности зуба пилы [3]:

$$T_{cp2} = \frac{q_3 \cdot \sqrt{\omega_3 \cdot \tau_k}}{\sqrt{\pi \cdot \lambda_3}},$$

где ω_3 – коэффициент температуропроводности материала пилы, м²/с;
 λ_3 – коэффициент теплопроводности материала пилы, Вт/м·град;
 τ_k – продолжительность рабочего хода, с.

Приравняв температуру тел на контактных поверхностях и учитывая, что

$$q_3 = b \cdot q_0,$$

$$q_{mp} = (-b) \cdot q_0,$$

получим коэффициент баланса:

$$b = \frac{1}{1 + \frac{3\lambda_{mp} \sqrt{\omega_3 \cdot v \cdot \tau_k}}{4\lambda_3 \sqrt{l_3 \cdot \omega_{mp}}}} \quad (2)$$

Расчет коэффициента баланса ведется для следующих условий: коэффициенты температуропроводности материала пилы (сталь 65Г) и трубы (сталь 20) $\omega_3 = 0,0000100 \text{ м}^2/\text{с}$ и $\omega_{mp} = 0,0000069 \text{ м}^2/\text{с}$, соответственно. Продолжительность рабочего хода $\tau_k = 0,0005 \text{ с}$. Скорость резания $v = 102 \text{ м/с}$. Коэффициенты теплопроводности материала пилы и трубы $\lambda_{mp} = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ и $\lambda_3 = 29 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$, соответственно. Для классической фрикционной пилы с зубьями величина площадки контакта по задней грани $l_3 = 3,5 \text{ мм}$.

Следовательно, по формуле (2) коэффициент баланса для фрикционной пилы с зубьями равен:

$$b = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot 29 \cdot \sqrt{0,0000100 \cdot 102 \cdot 0,0005}}{4 \cdot 20 \cdot \sqrt{0,0035 \cdot 0,0000069}}} = 0,294$$

Весь тепловой поток, уходящий в трубу, расходуется на нагрев до температуры плавления и расплавление стружки и тонкого слоя металла трубы, а также на дополнительный нагрев трубы (рисунок 2).

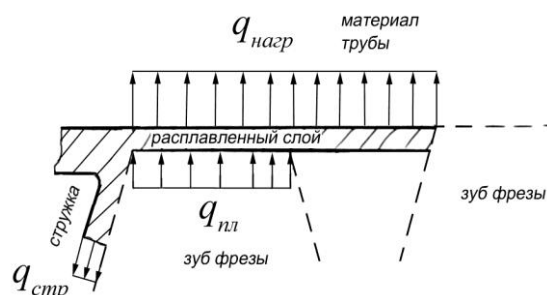


Рисунок 2 – Распределение тепловых потоков из зоны контакта в зуб пилы, расплавленный слой и трубу $q_{пл}$ – тепловой поток, расходующийся на расплавление тонкого слоя металла, $q_{стп}$ – тепловой поток, требующийся на расплавление стружки, $q_{нагр}$ – тепловой поток, требующийся на расплавление стружки

Тепловой поток, вызывающий нагрев материала трубы до температуры плавления:

$$q_{нагр} = \frac{\lambda_{mp} \cdot S_m}{6 \cdot 10^4 \cdot \omega_{mp}} (T_{пл} - T_{mp}), \quad (3)$$

где ω_{mp} – коэффициент температуропроводности материала трубы, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ_{mp} – коэффициент теплопроводности материала трубы, $\text{Вт/м}\cdot\text{град}$;

$T_{пл}$ – температура плавления материала трубы, $^\circ\text{C}$;

T_{mp} – температура основного материала трубы, $^\circ\text{C}$;

S_z – подача на зуб пилы, мм/зуб .

Тепловой поток, требующийся на расплавление стружки:

$$q_{стп} = \frac{C \cdot S_z \cdot \rho}{10^3 \cdot \tau_z} \quad (4)$$

где C – удельная теплота плавления, Дж/кг ;

ρ – плотность материала трубы, кг/м^3 ;

$S_z = 0,007 \text{ мм/зуб}$;

$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$;

τ_z – время поворота пилы на один зуб, с :

$$\tau_z = \frac{l_z}{v}$$

где l_z – расстояние между зубьями пилы, м.

При расчете по формулам (3) и (4) получены следующие значения: $q_{нар} = 36,2 \cdot 10^6$ Дж/м²·с, $q_{сгр} = 79,9 \cdot 10^6$ Дж/м²·с.

Уравнение теплового баланса для количества тепла, уходящего из зоны трения в трубу, примет вид:

$$(-b) \cdot q_0 \cdot l_z = (q_{нар} + q_{сгр} + q_{нл}) \cdot l_z$$

Из полученного выражения найдем тепловой поток, расходующийся на расплавление тонкого слоя металла:

$$q_{нл} = (-b) \cdot q_0 \cdot \frac{l_z}{l_z} - (q_{нар} + q_{сгр}) \quad (5)$$

При расчете по формуле (5) теплового потока для фрикционной пилы с зубьями получено значение $q_{нл} = 330,7 \cdot 10^6$ Дж/м²·с.

Толщину расплавленного слоя найдем из выражения:

$$h_{нл} = \frac{q_{нл} \cdot \tau_z}{C \cdot \rho} \quad (6)$$

Для дисковой фрикционной пилы Ø950мм, расчет толщины расплавленного слоя проводился для условий: удельная теплота плавления $C = 205000$ Дж/кг, плотность материала трубы $\rho = 7800$ кг/м³, время поворота пилы на один зуб $\tau_z = 0,0002$ с. Толщина расплавленного слоя, определяемая по формуле (6), $h_{нл} = 0,032$ мм.

Выводы: созданная математическая модель теплового баланса фрикционной резки горячих труб фрикционной дисковой пилой с зубьями показывает, что в процессе резания классической пилой происходит избыточное тепловыделение по контактной поверхности зубьев пилы, что приводит к разогреву до температуры плавления слоя металла, превышающего подачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизый, Ю.А. Тепловой баланс процесса фрикционной резки / Ю.А. Сизый, Э.В. Савченко, А.С. Шатерников // Резание и инструмент. – 1985. – №34. – с.129-134.
2. Сизый, Ю.А. Температурное поле в детали при фрикционной резке / Ю.А. Сизый, Э.В. Савченко, Н.Н. Волкова // Резание и инструмент. – 1987. – №38 – с. 111-116.
3. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 287 с.

Банников Алексей Александрович

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
Аспирант
404130, г. Волжский, ул. Карла Маркса 20, кв. 3
(8443)31-17-60
E-mail : alc16@mail.ru

Банников Александр Иванович

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
Кандидат технических наук, доцент
404130, г. Волжский, ул. Карла Маркса 20, кв. 3
(8443)31-17-60
E-mail : alc19@mail.ru

Сомова Яна Альбертовна

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
Студент группы ТМС-500
404120, Г. Волжский, ул. Советская 77, кв. 41
(8443)39-27-83
E-mail : voljyanka@yandex.ru

Слепешкова Дарья Валерьевна

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград
Студент группы ТМС-500
404132, г. Волжский, ул. Дружбы 58, кв. 68
E-mail: daria_88sdv@mail.ru

В.В. КУЦ

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ. СТАТИКА

В статье приводится методика преобразования на ранних стадиях проектирования модели формообразующей системы проектируемого станка в эквивалентную стержневую модель, определяются проектные параметры этой модели, устанавливаются основные расчетные зависимости.

Ключевые слова: статика, статический баланс, проектирование станков, стержневая модель.

In article the transformation technique on early design stages of model of form-building system of the projected machine tool in equivalent rod model is resulted, design parameters of this model are defined, the basic settlement dependences are established.

Key words: a statics, static balance, designing of machine tools, rod model.

Для формирования пространства параметров металлорежущих станков на ранних стадиях проектирования необходимо осуществить переход от модели его формообразующей системы описываемой координатным и компоновочным кодом проектируемого станка [1], а также основным уравнением теории формообразования и построенным на их основе балансе точности станка, к комплексу математических моделей описывающих протекающие, в процессе эксплуатации станка, процессы различных скоростей [2].

Исходя из модели формообразующей системы станка, металлорежущий станок можно рассматривать как систему, состоящую из узлов, где каждый узел рассматривается как некий объект со своей системой координат, и геометрических связей узла с соседними узлами (рисунок 1).

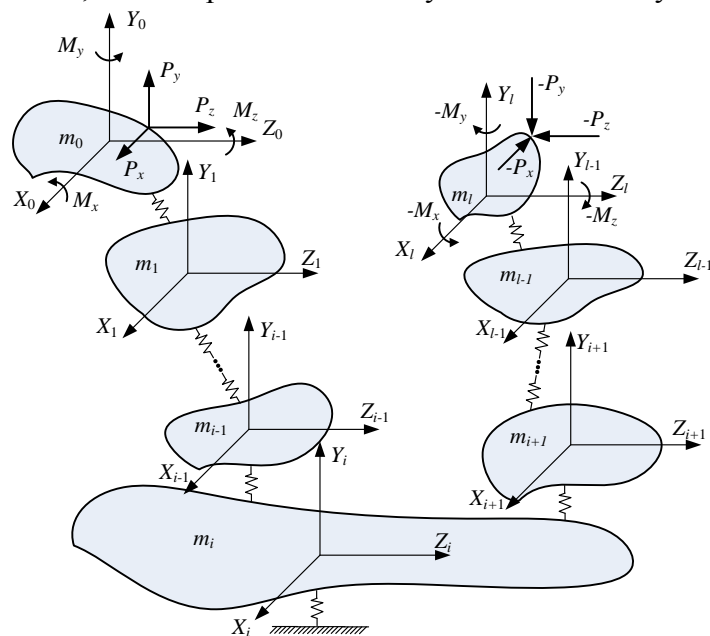


Рисунок 1 – Модель станка и пространство его параметров исходя из модели его формообразующей системы

Наличие геометрической связи у узла можно рассматривать как задание опорных точек в соответствии с принятой схемой базирования. Предполагается, что базирование подвижного узла осуществляется путем наложения пяти двухсторонних геометрических связей с соседним узлом. Связи на узлы накладываются последовательно с двух направлений, начиная от нулевого узла (детали) до i -го неподвижного узла станка (станины, обозначенной в компоновочном коде 0), и от l -го подвижного узла в обратном направлении до i -го неподвижного узла станка.

вижного узла станка. Базирование неподвижного узла (станины) осуществляется путем наложения шести двухсторонних геометрических связей с фундаментом станка.

Таким образом, на начальной стадии проектирования пространство параметров проектируемого станка будет состоять из матриц обобщенных перемещений каждого узла со своим параметром движения и принятой схемы базирования для каждого узла.

Для описания статических процессов протекающих в станке необходимо осуществить переход от начальной модели станка к эквивалентной стержневой модели. Поэтому каждый узел станка необходимо представить в виде стержня, а каждую двухстороннюю геометрическую связь между узлами в виде эквивалентной упругой опоры. Представление подвижного узла станка в виде стержня можно выполнить на основе его матрицы обобщенного перемещения (таблица 1).

Таблица 1 – Соответствие матриц обобщенных перемещений узлов станка эквивалентным стержневым элементам

Матрицы перемещений	Эквивалентный стержневой элемент	Матрицы перемещений	Эквивалентный стержневой элемент
A^1		A^4	
A^2		A^5	
A^3		A^6	

Также необходимо задать матрицы переходов между системами координат стержневых элементов. Направление переходов должно соответствовать направлению наложения связей на узлы станка (рисунок 2). Таким образом, должно быть задано $l-1$ матриц

$A_{01}(L_{01}), A_{12}(L_{12}), \dots, A_{(i-1)i}(L_{(i-1)i})$ и $A_{l(l-1)}(L_{l(l-1)}), A_{(l-1)(l-2)}(L_{(l-1)(l-2)}), \dots, A_{(i+1)i}^{k_1}(L_{(i+1)i})$, где $L_{01}, L_{12}, \dots, L_{(i-1)i}$ и $L_{l(l-1)}, L_{(l-1)(l-2)}, \dots, L_{(i+1)i}$ – параметры установки соответствующих систем координат.

В соответствии с лишаемой степенью свободы, каждую двухстороннюю связь представим в виде опоры: упругоосевой – если связь лишает узел возможности перемещаться вдоль одной оси; упругопоротной – если связь лишает узел возможности вращаться вокруг одной оси. В таблице 2 представлены различные способы установки опор в соответствии с лишаемой степени свободы. Положение упругоосевых опор будет полностью определяться параметрами $l_{01}, l_{02}, \dots, l_{0N_{10}}, l_{11}, l_{12}, \dots, l_{1N_{11}}, \dots, l_{l1}, l_{l2}, \dots, l_{lN_{1l}}$.

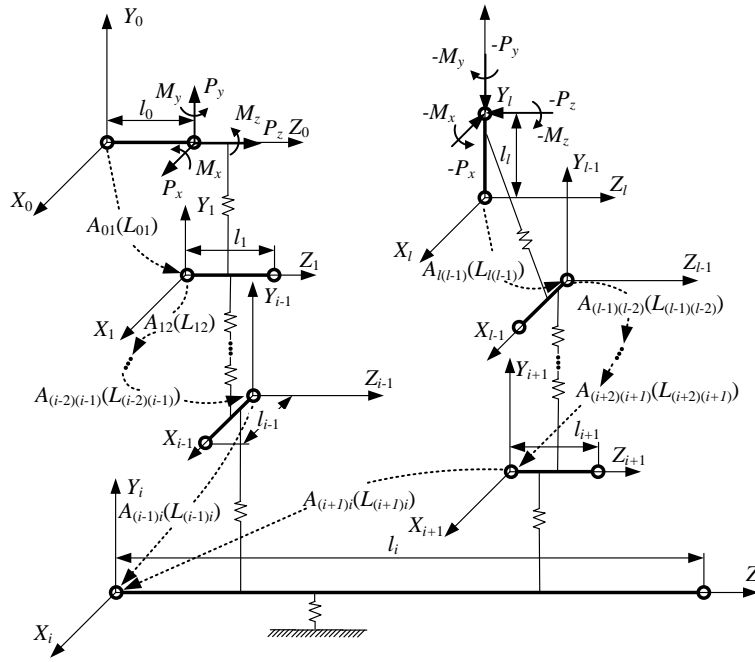


Рисунок 2 – Представление узлов станка эквивалентными стержневыми элементами

Таблица 2 – Параметры эквивалентных опор при лишении узла степени свободы

Обозначение связи	Схемы установки эквивалентной опоры	Параметры опор
1	2	3
1		<p>опора $i1$: $\bar{r}_{i1} = (0,0,l_{i1},1)^T$, $\bar{a}_{i1} = (-1,0,0,0)^T$, $\bar{m}_{i1} = \bar{r}_{i1} \times \bar{a}_{i1} = (0,l_{i1},0,0)^T$</p> <p>опора $i1'$: $\bar{r}_{i1'} = (0,l_{i1'},0,1)^T$, $\bar{a}_{i1'} = (1,0,0,0)^T$, $\bar{m}_{i1'} = \bar{r}_{i1'} \times \bar{a}_{i1'} = (0,0,l_{i1'},0)^T$</p> <p>опора $i1''$: $\bar{r}_{i1''} = (l_{i1''},0,0,1)^T$, $\bar{a}_{i1''} = (1,0,0,0)^T$, $\bar{m}_{i1''} = \bar{r}_{i1''} \times \bar{a}_{i1''} = (0,0,0,0)^T$</p>
2		<p>опора $i2$: $\bar{r}_{i2} = (0,0,l_{i2},1)^T$, $\bar{a}_{i2} = (0,1,0,0)^T$, $\bar{m}_{i2} = \bar{r}_{i2} \times \bar{a}_{i2} = (l_{i2},0,0,0)^T$</p> <p>опора $i2'$: $\bar{r}_{i2'} = (l_{i2'},0,0,1)^T$, $\bar{a}_{i2'} = (0,-1,0,0)^T$, $\bar{m}_{i2'} = \bar{r}_{i2'} \times \bar{a}_{i2'} = (0,0,-l_{i2'},0)^T$</p> <p>опора $i2''$: $\bar{r}_{i2''} = (0,l_{i2''},0,1)^T$, $\bar{a}_{i2''} = (0,-1,0,0)^T$, $\bar{m}_{i2''} = \bar{r}_{i2''} \times \bar{a}_{i2''} = (0,0,0,0)^T$</p>

1	2	3
3		<p>опора $i3$: $\bar{r}_{i3} = (0, l_{i3}, 0, 1)^T$, $\bar{a}_{i3} = (0, 0, 1, 0)^T$, $\bar{m}_{i3} = \bar{r}_{i3} \times \bar{a}_{i3} = (-l_{i3}, 0, 0, 0)^T$ опора $i3'$: $\bar{r}_{i3'} = (l_{i3'}, 0, 0, 1)^T$, $\bar{a}_{i3'} = (0, 0, -1, 0)^T$, $\bar{m}_{i3'} = \bar{r}_{i3'} \times \bar{a}_{i3'} = (0, -l_{i3'}, 0, 0)^T$ опора $i3''$: $\bar{r}_{i3''} = (0, 0, l_{i3''}, 1)^T$, $\bar{a}_{i3''} = (0, 0, -1, 0)^T$, $\bar{m}_{i3''} = \bar{r}_{i3''} \times \bar{a}_{i3''} = (0, 0, 0, 0)^T$</p>
4		<p>опора $i4$: $\bar{a}_{i4} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i4} = (1, 0, 0, 0)^T$ опора $i4'$: $\bar{a}_{i4'} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i4'} = (1, 0, 0, 0)^T$</p>
5		<p>опора $i5$: $\bar{a}_{i5} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i5} = (0, 1, 0, 0)^T$ опора $i5'$: $\bar{a}_{i5'} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i5'} = (0, 1, 0, 0)^T$</p>
6		<p>опора $i6$: $\bar{a}_{i6} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i6} = (0, 0, 1, 0)^T$ опора $i6'$: $\bar{a}_{i6'} = (0, 0, 0, 0)^T$, $\bar{m}_{i6'} = (0, 0, 1, 0)^T$</p>
<p>Обозначение: \bar{a} – единичный вектор направления реакции опоры; \bar{m} – вектор момента реакции опоры</p>		

Условие статического баланса построенной таким образом эквивалентной стержневой модели будет описываться матричным уравнением

$$C \cdot \Delta = P, \quad (1)$$

где C – матрица жесткости;

Δ – вектор обобщенных погрешностей узлов станка;

P – вектор обобщенных внешних сил действующей на узлы станка.

Вектор обобщенных погрешностей узлов станка с размерностью $[(l+1) \times 1]$ имеет следующую структуру

$$\Delta = \langle \Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_l \rangle^T,$$

где $\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_l$ – вектора обобщенной погрешности узлов станка.

В общем виде вектор обобщенной погрешности i -го узла имеет размерность $[6 \times 1]$ и может быть представлен как

$$\Delta_i = \langle \delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \rangle^T,$$

где $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ – малые абсолютные смещения i -го звена станка соответственно вдоль осей X, Y и Z ;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – малые углы поворота i -го звена станка соответственно вокруг осей X, Y и Z .

Элементы вектора Δ определяются из баланса точности станка.

Вектор обобщенных внешних сил действующих на узлы станка имеет структуру

$$P = \langle P_0, P_1, \dots, P_l \rangle^T,$$

где P_0, P_1, \dots, P_l – вектора обобщенной внешней силы действующей на узлы станка;

$P_i = \langle P_{xi}, P_{yi}, P_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} \rangle^T$ – вектор обобщенной внешней силы действующей на i -й узел станка;

P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} – суммарные внешние силы действующие на i -й узел станка соответственно в направлении осей X, Y и Z ;

M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} – суммарные внешние моменты действующие на i -й узел станка соответственно в направлении осей X, Y и Z .

Предполагается, что вектора P_0 и P_l могут быть определены из начальных условий проектирования или заданы на начальном этапе проектирования исходя из принятой схемы формообразования и съема припуска, при этом $P_l = -P_0$. Остальные вектора представляют собой обобщенную силу появляющуюся в результате действия реакций опор и должны быть определены.

Матрица жесткости станка имеет размерность $[(l+1) \times (l+1)]$ и следующую структуру

$$C = \begin{pmatrix} C_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_l \end{pmatrix},$$

где C_0, C_1, \dots, C_l – матрицы жесткости узлов станка.

Матрицу жесткости C_i для i -го узла станка имеет размерность $[6 \times 6]$ и её элементы можно определить формуле

$$c_{ijn} = \sum_{k=1}^{N_i} T_{ik} R_{ijk} R_{ink},$$

где N_i – количество упругих опор на i -м узле;

T_i – вектор жесткостей упругих опор на i -м узле;

$$T_i = \begin{pmatrix} C_i \\ \tau_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{i1}, \dots, c_{iN_{1i}} \\ \tau_{i1}, \dots, \tau_{iN_{2i}} \end{pmatrix},$$

где C_i – вектор жесткостей упругоосевых опор для i -го узла станка;

τ_i – вектор жесткостей упругоповоротных опор для i -го узла станка;

N_{1i} и N_{2i} – соответственно количество установленных на i -м узле станка упругоосевых и упругоповоротных опор ($N_{1i} + N_{2i} = N_i$);

$c_{i1}, \dots, c_{iN_{1i}}$ – жесткости упругоосевых опор установленных на i -м узле станка;

$\tau_{i1}, \dots, \tau_{iN_{2i}}$ – жесткости упругоповоротных опор установленных на i -м узле станка.

$$R_{ik} = \begin{pmatrix} a_{ik} \\ m_{ik} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{xik}, a_{yik}, a_{zik}, 0 \\ m_{xik}, m_{yik}, m_{zik}, 0 \end{pmatrix},$$

где a_{ik} – единичный вектор направления реакции k -й опоры i -го узла станка

$$a_{ik} = \begin{pmatrix} a_{xik}, a_{yik}, a_{zik}, 0 \end{pmatrix};$$

m_{ik} – вектор направления момента реакции k -й опоры i -го узла станка

$$m_{ik} = \begin{pmatrix} m_{xik}, m_{yik}, m_{zik}, 0 \end{pmatrix}.$$

Для решения матричного уравнения (1) необходимо установить зависимости для расчета реакций и моментов опор узлов станка. Реакция или момент (p_{ik}) k -й опоры i -го узла станка может быть рассчитана по формуле

$$p_{ik} = -T_{ik} \begin{pmatrix} a_{xik} \delta_{xi} + a_{yik} \delta_{yi} + a_{zik} \delta_{zi} + m_{xik} \alpha_i + m_{yik} \beta_i + m_{zik} \gamma_i \end{pmatrix}.$$

В случае упругоосевой опоры величина p_{ik} является реакцией опоры, в случае упругоповоротной величина p_{ik} является моментом реакции опоры.

Таким образом, представленные зависимости позволяют сформировать пространство параметров для решения задач статики при проектировании металлорежущих станков и пространство параметров проектируемого станка будет уже содержать:

$L_{01}, L_{12}, \dots, L_{(i-1)i}$ и $L_{l(l-1)}, L_{(l-1)(l-2)}, \dots, L_{(i+1)i}$ – параметры установки систем координат узлов станка;

$$A_{01}(L_{01}), A_{12}(L_{12}), \dots, A_{(i-1)i}(L_{(i-1)i}), A_{l(l-1)}(L_{l(l-1)}), A_{(l-1)(l-2)}(L_{(l-1)(l-2)}), \dots, A_{(i+1)i}^{k_1}(L_{(i+1)i})$$

– матрицы установки систем координат узлов станка;

$c_{i1}, \dots, c_{iN_{1i}}, \tau_{i1}, \dots, \tau_{iN_{2i}} \quad i = \overline{0, l}$ – жесткости упругоосевых и упругоповоротных опор узлов станка;

$l_{01}, l_{02}, \dots, l_{0N_{10}}, l_{11}, l_{12}, \dots, l_{1N_{11}}, \dots, l_{l1}, l_{l2}, \dots, l_{lN_{1l}}$ – геометрические параметры установки упругоосевых опор узлов станка.

Данная работа выполнена в соответствии с ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков [Текст]/ Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
2. Пронников, А.С. Проектирование металлорежущих станков станочных систем [Текст]/ А.С., Пронников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Апполонов и др. В 3-х т. Т.1. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.: ил.

Куц Вадим Васильевич

Курский государственный технический университет, г. Курск

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление качеством, метрологии и сертификации»

Тел.: (4712) 32-61-00

E-mail: kuc-vadim@yandex.ru

И.В. ШМИДТ

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНОЙ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Разработана модель напряженного состояния слоистой системы с полимерно-композитными материалами при механической обработке – точении и шлифовании, учитывающая технологические параметры: способ крепления заготовки на станке, величины и схемы приложения действующих при обработке нагрузок. Математическая постановка задачи производилась для системы из n слоев и различных материалов. Решение поставленной задачи реализовано методом конечных элементов в среде ANSYS Workbench.

Ключевые слова: напряженное состояние, слоистые системы, полимерно-композитные материалы.

A model of the stress state of a layered system with polymeric composite materials in kind should machining - turning and grinding, taking into account the process parameters: the way to fix the workpiece on the machine tool, the value and application of existing schemes in the processing loads. The mathematical formulation of the problem was made for a system of n layers of different materials. The solution of the problem is realized by the finite elements in the environment of ANSYS Workbench.

Key words: stress state, layered systems, polymeric composite materials.

В машиностроении часто для получения необходимых свойств на рабочих поверхностях деталей и их восстановления используют различные виды термической и химико-термической обработки (закалка, наплавка, напыление и др.). При этом формируется слоистая система с обеспечением служебного назначения именно той поверхности, которой необходимо.

В последнее время наравне с давно известными методами создания модифицированных слоев на рабочих поверхностях деталей находят широкое применение слоистые системы с полимерно-композитными материалами.

Механическая обработка слоистых систем, как и монолитных деталей производится традиционными методами – точением, шлифованием.

Как известно из практики, нередко в процессе обработки слоистой системы образуются дефекты типа отслоения. Здесь сказывается различие свойств материалов, входящих в слоистую систему. Прочностные свойства ПКМ существенно ниже, чем у конструкционных материалов. Например, прочность при сжатии у ПКМ меньше, чем у стали в 1,5...7,5 раз меньше, а при растяжении – 10...16 раз меньше [1]. Такое различие предопределяет характер напряженного состояния, возникающего при механической обработке. Кроме того, существуют предельные силы сцепления между слоями. Каждый из слоев имеет свой максимально допустимый предел прочности (например, у ПКМ предел прочности на отрыв составляет 5...50 МПа), который будет влиять на назначение режимов резания при обработке слоистой системы. Следовательно, актуальна задача анализа напряженного состояния системы в целом под действием сил резания.

В данной работе ставится общая задача моделирования напряженного состояния слоистой системы, состоящей из n слоев из различных материалов, при разных видах механической обработки – точение и шлифование.

Рассматриваемая слоистая система из n слоев закрепляется по торцу окружности закрепления – элемента основной конструкции (вала), имитирующей установку в патроне и по двум торцам окружности закрепления, имитирующей установку в центрах. Действующие при обработке на слоистую систему силы прикладываются следующим образом:

- при точении (P_x, P_y, P_z) – точно (рисунок 1а);
- при шлифовании (P_y, P_z) – распределено по пятну контакта инструмента с заготовкой (рисунок 1б).

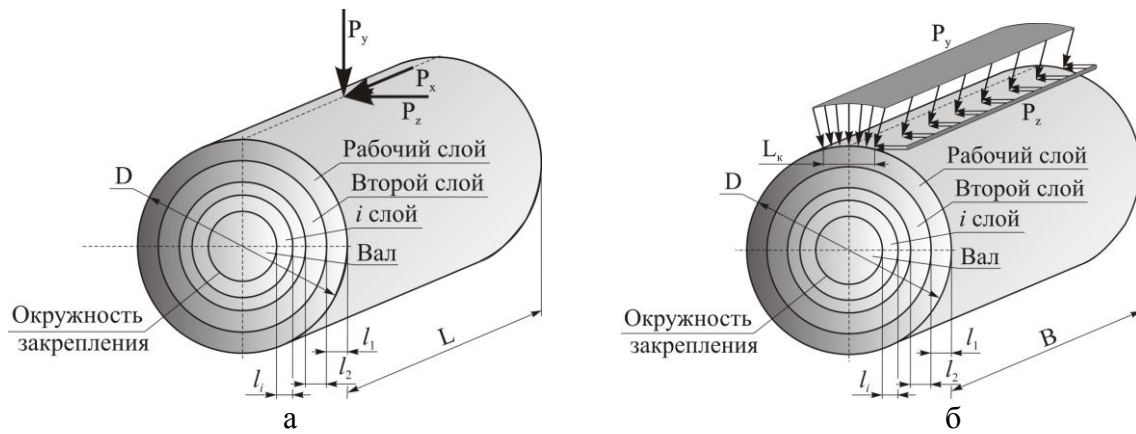


Рисунок 1 – Схема нагружения слоистой системы
 а – при продольном точении; б – при круглом врезном шлифовании

Математическое описание схемы (рисунок 1) имеет вид:

Уравнение равновесия в перемещениях при отсутствии массовых сил в цилиндрических координатах для расчетной схемы (рисунок 2) примет вид:

$$\begin{cases} \Delta u + \frac{1}{1-2\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{u}{r^2} = 0; \\ \Delta v + \frac{1}{1-2\sigma} \frac{\partial \theta}{r \partial \varphi} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{v}{r^2} = 0; \\ \Delta w + \frac{1}{1-2\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0; \\ 1-2\sigma = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \end{cases}$$

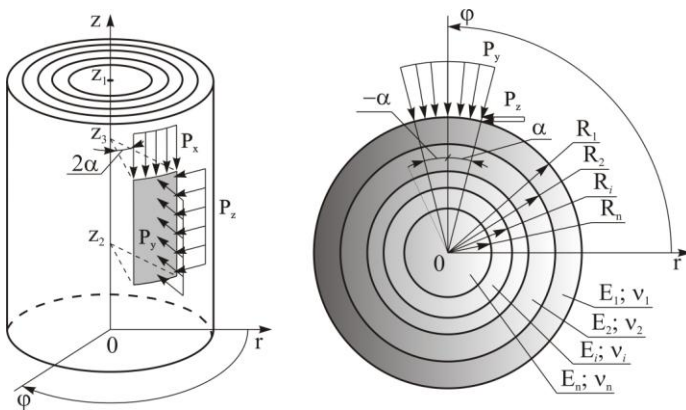


Рисунок 2 – Расчетная схема в цилиндрических координатах

где μ и λ – коэффициенты Ляме.

Закон Гука в цилиндрических координатах выглядит:

$$\begin{cases} \sigma_{r r_i} = \lambda_i \theta + 2\mu_i \frac{\partial u}{\partial r}; & i = 1, 2, \dots, n; \\ \sigma_{\varphi \varphi_i} = \lambda_i \theta + \frac{2\mu_i}{r_i} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} + u \right); & i = 1, 2, \dots, n; \\ \sigma_{z z_i} = \lambda_i \theta + 2\mu_i \frac{\partial w}{\partial z}; & i = 1, 2, \dots, n; \\ \sigma_{r \varphi_i} = \mu_i \left(\frac{1}{r_i} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + r_i \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r_i} \right) \right); & i = 1, 2, \dots, n; \\ \sigma_{\varphi z_i} = \mu_i \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right); & i = 1, 2, \dots, n; \\ \sigma_{z r_i} = \mu_i \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); & i = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Границы контактирующих тел описываются следующим образом:
 первое тело (рабочий слой системы) ($i=1$) $0 \leq \varphi \leq 2\pi; R_2 \leq r \leq R_1; 0 \leq z \leq Z_1$;
 n-ое тело (n-ый слой системы – вал) ($i=n$) $0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq r \leq R_n; 0 \leq z \leq Z_1$.

Граничные условия отражают приложенную нагрузку, условия контакта тел и условия закрепления.

Описание приложенной нагрузки сводится к заданию напряжений на внешней границе:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_z \\ \sigma_\varphi = P_y \\ \sigma_z = P_x \\ \sigma_r = \sigma_\varphi = \sigma_z = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \text{при } r = R_1; -\alpha \leq \varphi \leq \alpha; Z_2 \leq z \leq Z_3; \\ \text{при } r = R_1; \varphi \notin [\alpha, \alpha]; z \notin [Z_2, Z_3]. \end{cases}$$

Условия сопряжения контактирующих тел задается в виде ограничения на перемещения:

контакт между первым и вторым телом (слоем) $\begin{cases} u_1|_{r=R_2} = u_2|_{r=R_2} \\ v_1|_{r=R_2} = v_2|_{r=R_2} \\ w_1|_{r=R_2} = w_2|_{r=R_2} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n;$

контакт между $(i-1)$ -ым и i -ым телом (слоем) $\begin{cases} u_{i-1}|_{r=R_i} = u_i|_{r=R_i} \\ v_{i-1}|_{r=R_i} = v_i|_{r=R_i} \\ w_{i-1}|_{r=R_i} = w_i|_{r=R_i} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n.$

Условие закрепления системы тел: $\begin{cases} u|_{r=R_n} = 0 \\ v|_{r=R_n} = 0 \\ w|_{r=R_n} = 0 \end{cases} .$

Поставленную задачу решаем методом конечных элементов в среде пакета прикладных программ ANSYS Workbench. Результатом расчетов в ANSYS Workbench являются поля напряжений во всех слоях системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические свойства полимерных материалов: уч.-справ. пос. / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – СПб., Изд-во «Профессия», 2003. – 240 с.

Шмидт Ирина Владимировна

Южно-Уральский государственный университет
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Тел.: (351) 267-92-73
E-mail: shmidt174@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.923.4

Л.Г. ВАЙНЕР

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РОЛИКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ДВУСТОРОННИХ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

На основе проведенных экспериментальных исследований выявлены закономерности движения роликов в зоне шлифования, предложены параметры и характеристики для описания переменного вращения ролика в процессе обработки, рассмотрено влияние отдельных технологических факторов на характеристики вращения роликов, установлена связь характеристик вращения роликов с точностью обработки.

Ключевые слова: *двустороннее торцешлифование, цилиндрический ролик, характер вращения, технологические факторы, точность обработки.*

On the basis of experimental research regular pattern of roller motion in the grinding area was indicated, specifications and characteristics for description of rotation during grinding was suggested, influence of several processing factors on rotation characteristics was considered, a connection between rotation characteristic and machining accuracy was traced.

Key words: *double-disc grinding, cylindrical roller, rotation character, technological factors, accuracy.*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокопроизводительные двусторонние торцешлифовальные станки (ДТШС) выпускаются в России и за рубежом для использования в крупносерийном и массовом производстве, т.к. позволяют за один проход обработать два плоских торца детали одновременно [1]. Самое широкое применение они нашли в массовом производстве подшипников качения для обработки колец и роликов.

Используются четыре способа подачи деталей относительно шлифовальных кругов: прямолинейное поступательное движение, круговое с принудительным вращением деталей, круговое возвратно-поступательное и наиболее распространенное при обработке роликов - круговое движение свободных роликов, размещенных в гнездах диска-сепаратора (рисунок 1).

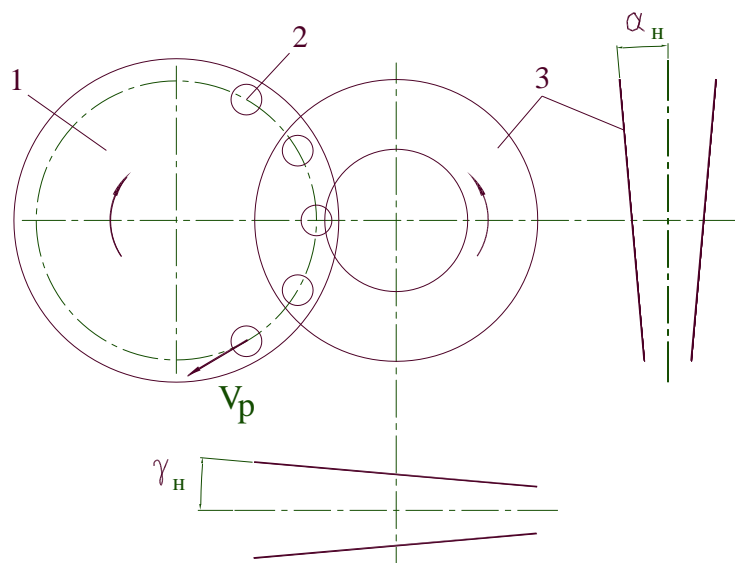


Рисунок 1 – Схема двустороннего торцешлифования
1 – диск-сепаратор; 2 – ролик; 3 – рабочие поверхности шлифовальных кругов

К числу основных производственных проблем можно отнести получение и стабилизацию во времени необходимой высокой точности обработки. Контролируемыми геометрическими параметрами точности обработки являются торцовое биение и погрешность формы торца, причем первый параметр является лимитирующим.

Сущностной спецификой процесса двустороннего торцешлифования (ДТШ) в отличие от известных классических схем шлифования (таких как плоское, круглое, бесцентровое) является то, что характер съема припуска за один проход и, соответственно, процесс формообразования определяется не назначенной величиной врезной подачи, а пространственной геометрией зоны шлифования вдоль траектории движения деталей (формой зоны шлифования). Она же в случае круговой подачи свободных роликов определяет и кинематику процесса. Главными настроечными параметрами процесса являются начальные углы поворота кругов в горизонтальной γ_n и вертикальной α_n плоскостях.

В работе [2] авторами на основе экспериментов с различными типоразмерами роликов впервые установлено, что в процессе обработки ролик совершает сложное движение: 1) поступательное - по круговой траектории в гнездах диска – сепаратора; 2) вращательное – вокруг своей оси; 3) ось ролика дополнительно смещается в пределах зазора между роликом и втулкой гнезда диска – сепаратора и это переменное смещение носит закономерный характер.

Необходимым условием минимизации погрешности обработанных торцов роликов по параметру торцового биения является их стабильное вращение в зоне шлифования.

В целях повышения точности обработки были поставлены задачи данного экспериментального исследования: 1) изучить характеристики вращения ролика в процессе шлифования при вариациях параметров настройки и режимов обработки (под характеристикой вращения ролика будем понимать характер изменения частоты вращения ролика при прохождении им зоны шлифования); 2) дать оценку связи показателей вращения роликов с точностью обработки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВРАЩЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В процессе эксперимента регистрировались: 1) частота вращения ролика при его поступательном круговом движении между шлифовальными кругами в зоне обработки; 2) смещение оси ролика в зазоре между роликом и базовой втулкой диска-сепаратора; 3) момент входа ролика в область шлифовальных кругов и продолжительность вращения ролика в зоне шлифования; 4) нормальная сила резания и мощность, затрачиваемая на шлифование (в контексте задач данной работы – для косвенного определения продолжительности съема припуска); 5) торцовое биение обрабатываемых роликов и их размеры до и после обработки.

Для возможности измерения указанных параметров ДТШС 3342 был оснащен измерительными системами с использованием стандартной и оригинальной аппаратуры.

С учетом производственного опыта использования ДТШС были выбраны следующие условия:

- 1) марка шлифовального круга 24А8НСТ29Б;
- 2) состав смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) – содовый раствор 1,5%, нитрит натрия 0,8% в воде;
- 3) способ подачи СОЖ – разбрызгивание через сопло, установленное поверх кругов и через отверстия в шпинделях;
- 4) режим правки – съем 0,3 мм, скорость продольной подачи алмаза – 0,12 м/мин, подача на двойной ход – 0,03 мм/дв.ход;
- 5) диапазон режимов обработки – скорость подачи изделий $V_p=2-10$ м/мин, припуск на два торца $\Delta t= 0,05 - 0,18$ мм, скорость вращения шлифовальных кругов $V_k= 8$ м/с;
- 6) диапазон углов установки кругов – в горизонтальной плоскости $\gamma_n = 0 - 0,5 \times 10^{-3}$ рад, в вертикальной плоскости $\alpha_n = 0 - 0,125 \times 10^{-3}$ рад;
- 7) основные эксперименты проводились для роликов с диаметром 14 мм.

Большинство экспериментов проводились по следующей схеме: разогрев станка – правка кругов – приработка профиля зоны шлифования (30-50 роликов) – шлифование контрольных роликов в соответствии с выбранными условиями.

Регистрация частоты вращения ролика осуществлялась двумя способами: с помощью индукционного и волоконно-оптического датчиков (ВОД). Оба способа позволяют производить измерения в труднодоступной зоне станка между двумя вращающимися шлифовальными кругами при движении объекта измерения, делают возможным исследование поведения роликов относительно малых размеров, не чувствительны к воздействию СОЖ, являются бесконтактными. Вместе с тем в силу очевидных преимуществ способ регистрации частоты вращения ролика с помощью ВОД был принят в работе за основной.

Использовался ВОД оригинальной конструкции – с двумя стандартными жгутами световодов (рисунок 2), один из которых (11) является осветительным, другой (12) – приемным каналом.

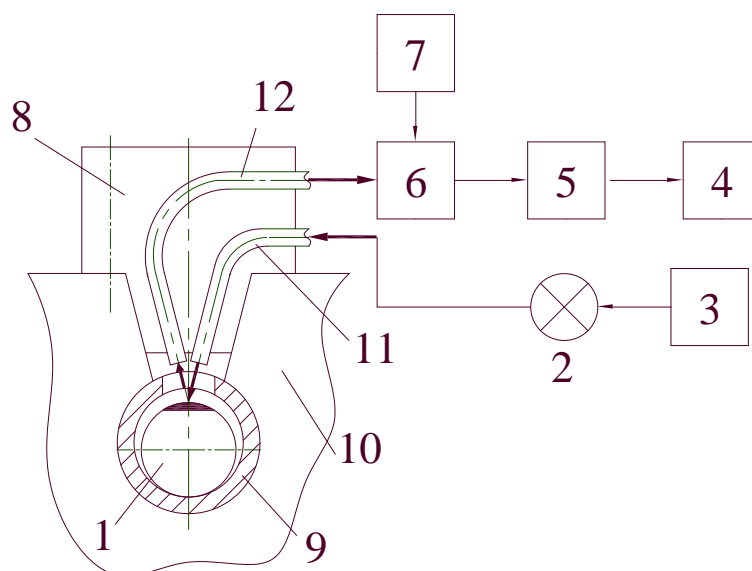


Рисунок 2 – Схема регистрации частоты вращения ролика с помощью волоконно-оптического датчика
 1 – ролик с «черным» пятном; 2 – излучатель с блоком питания;
 3; 4 – осциллограф; 5 – операционный усилитель; 6 – фотозлектронный умножитель с блоком питания; 7; 8 – разъемный корпус с криволинейными пазами под световоды; 9 – базировочная втулка с радиальным отверстием; 10 – диск-сепаратор; 11 – осветительный световод; 12 – приемный световод

Световой поток от излучателя 2, представляющего собой лампу с точечной нитью накала, подводится осветительным каналом 11 к цилиндрической поверхности ролика 1, на которой концентрированной азотной кислотой нанесено «черное» пятно. Различие в коэффициентах отражения от «черной» и исходной поверхности приводит к тому, что вращение ролика во втулке 9 вызывает модуляцию светового потока, поступающего в приемный канал 12. В фотозлектронном умножителе 6 световой поток преобразуется в электрический сигнал и после дополнительного усиления в операционном усилителе 5 поступает на гальванометр светолучевого осциллографа 4.

Для точной отсечки моментов «входа» и «выхода» контрольного ролика из зоны шлифования предусмотрен конечный выключатель с возможностью дистанционного включения режима регистрации осциллографа.

Общий вид кривой показаний ВОД на осциллограмме представляет собой наложение двух сигналов, являющихся следствием двух движений ролика: перемещения его оси в рамках зазора, что влечет за собой изменение текущего расстояния от торцов световодов до отражающей поверхности и вращения вокруг собственной оси.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРАЩЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ РОЛИКОВ

В соответствии с поставленными задачами экспериментального исследования по описанной выше методике были исследованы характеристики вращения роликов при вариациях технологических параметров ($\gamma_n, \alpha_n, \Delta t, V_p$). Под характеристикой вращения (ХВ) будем понимать кривую зависимости частоты вращения ролика f_p от его текущей координаты в зоне шлифования.

Наиболее характерные ХВ, соответствующие различным условиям шлифования, приведены на рис. 3, 4 и 5, где по оси абсцисс обозначена линейная координата оси ролика L или относительная координата $L_0 = L/L_3$, (относительная координата введена для удобства сопоставления ХВ роликов, обработанных на станках с разной протяженностью зоны шлифования L_3). Там же для наглядности показана кривая условного зацепления (кривая 5 на рисунке 3), построенная по максимально возможным текущим значениям частоты вращения ролика f_{pi} из условия

$$f_{pi} = f_k R_{ki} / r_p,$$

где f_k – частота вращения круга;

R_{ki} – текущий радиус круга;

r_p – радиус ролика.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в зависимости от параметров настройки и условий шлифования меняется характер вращения ролика. Все встречающиеся ХВ роликов можно отнести к трем основным видам.

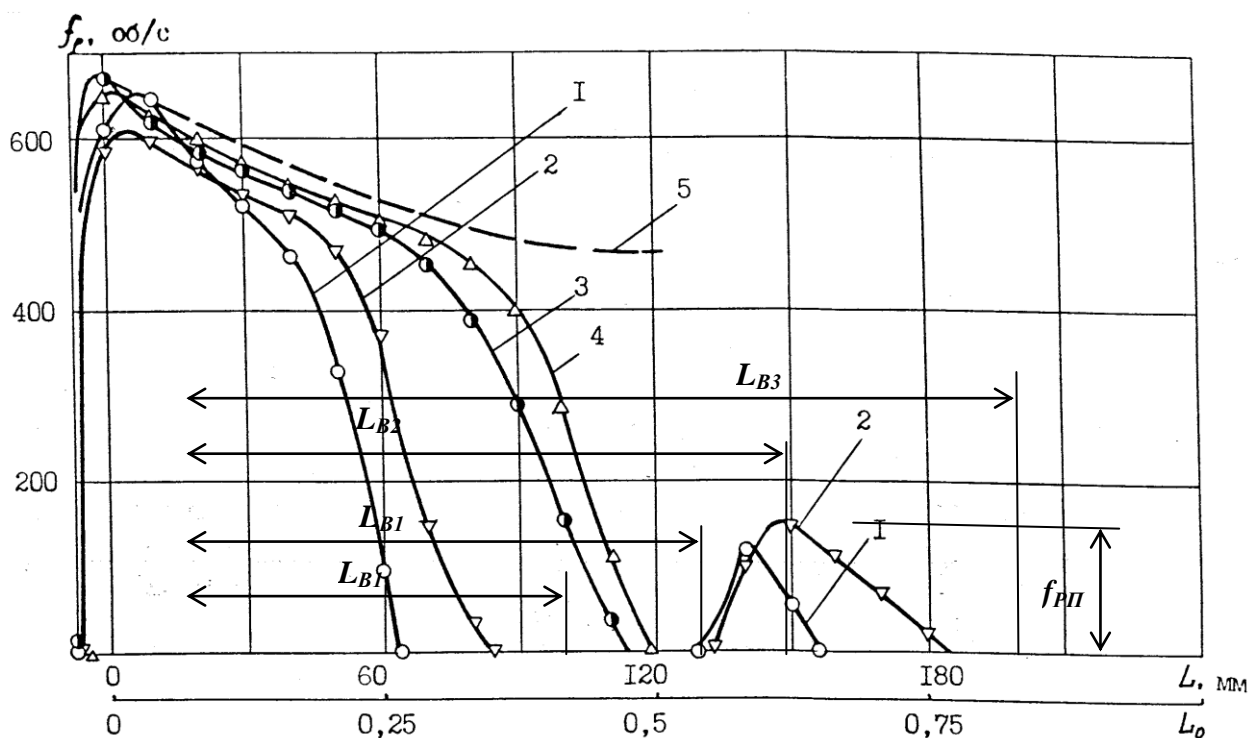


Рисунок 3 – Типовые характеристики вращения ролика при заданных параметрах настройки $\gamma_n=0, \alpha_n=0$ и вариациях припуска и скорости подачи
 1 – $\Delta t=0,06$ мм, $V_p=2,5$ м/мин; 2 – $\Delta t=0,06$ мм, $V_p=5$ м/мин; 3 – $\Delta t=0,15$ мм, $V_p=2,5$ м/мин; 4 – $\Delta t=0,15$ мм, $V_p=5$ м/мин; 5- кривая условного зацепления

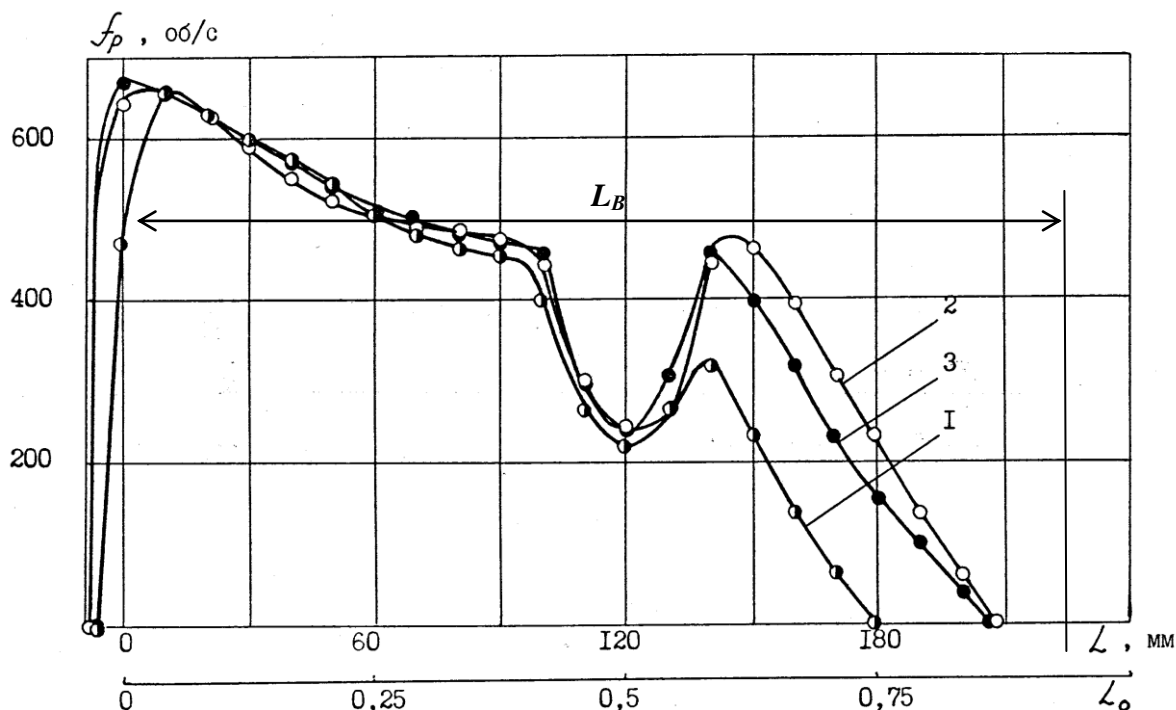


Рисунок 4 – Типовые характеристики вращения ролика при параметре настройки $\gamma_n = 5 \times 10^{-4}$ рад, припуске $\Delta t = 0,15$ мм, скорости подачи $V_p = 5$ м/мин и вариациях параметра настройки α_n :
 1 – $\alpha_n = 0$; 2 – $\alpha_n = 0,5 \times 10^{-4}$ рад; 3 – $\alpha_n = 1,25 \times 10^{-4}$ рад

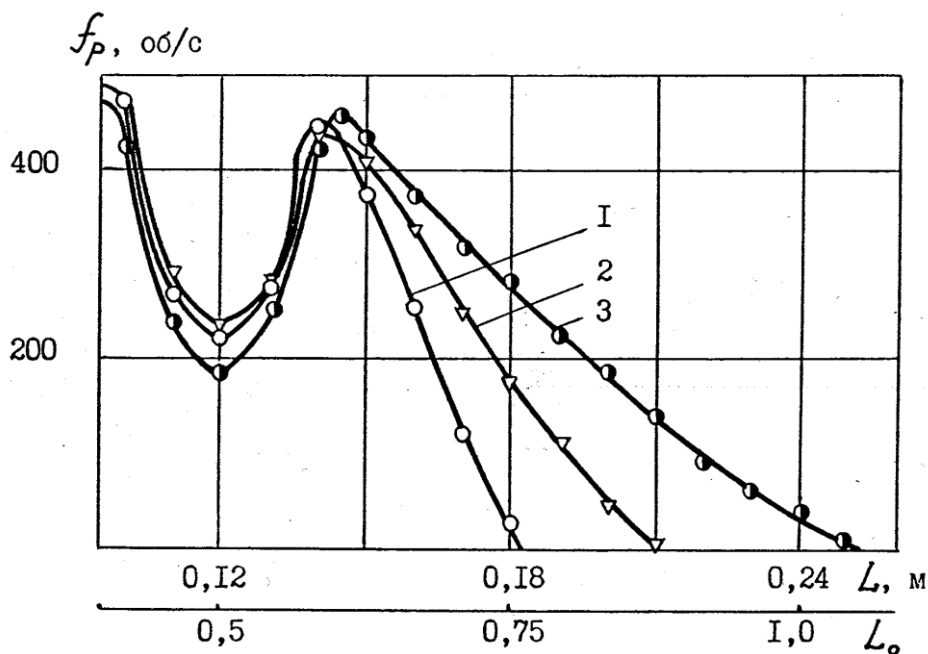


Рисунок 5 – Типовые характеристики вращения ролика при заданных параметрах настройки $\gamma_n = 5 \times 10^{-4}$ рад, $\alpha_n = \gamma_n = 0,5 \times 10^{-4}$ рад, припуске $\Delta t = 0,12$ мм и вариациях скорости подачи: 1 – $V_p = 2,5$ м/мин; 2 – $V_p = 5$ м/мин; 3 – $V_p = 8$ м/мин

Вид I (рисунок 3, кривые 3 и 4) – разгон ролика при входе в зону шлифования до окружной скорости равной скорости круга на периферии и его торможение до полной остановки в первой половине зоны. На рисунке длина участка вращения ролика обозначена L_{B1} .

Вид 2 (рисунок 3, кривые 1 и 2) – разгон ролика до окружной скорости равной скорости круга при входе в зону шлифования, падение частоты вращения до нуля в первой половине зоны, движение по зоне без вращения, второй разгон ролика после прохождения центра зоны до максимального значения f_{pII} с последующим торможением до нуля во второй поло-

вине зоны. На кривой 2 обозначены координаты ролика в зоне, соответствующие моментам прекращения вращения в первой половине зоны L_{B1} , возобновления вращения L_{B2} и окончательной остановки ролика L_{B3} .

Вид 3 (рисунок 4, кривые 1, 2 и 3) – разгон, по аналогии с первыми двумя видами ХВ, непрерывное вращение в первой половине зоны, крутой спад в момент касания торцом ролика кромки отверстия шлифовального круга и последующий подъем кривой ХВ в центральной области зоны до уровня f_{PI} , затем торможение ролика до полной остановки.

Вид ХВ является главным признаком, по которому можно систематизировать все многообразие ХВ. Другими признаками систематизации ХВ являются следующие их показатели: длина участка вращения при его непрерывности – L_B (рис. 4); максимальная частота вращения ролика после прохождения им центра зоны шлифования – f_{PI} .

Очевидно, наиболее важным, с точки зрения формирования точности обработки, является поведение ролика в зоне съема припуска. Поэтому введем еще один показатель (четвертый признак систематизации ХВ), связывающий ХВ с характером съема припуска, – суммарная протяженность участков, на которых ролик вращается со съемом припуска – L_{BP} .

Для определения показателя L_{BP} производилась одновременная регистрация оборотов ролика, силы резания и мощности, затрачиваемой на шлифование. По продолжительности действия силы и мощности определялась длина участка съема припуска L_P .

Поскольку координата окончания съема припуска является величиной переменной удобнее оперировать относительной характеристикой $L_{BP0}=L_{BP}/L_P$, обозначающей часть зоны съема припуска, на которой происходит вращение ролика.

Статистический анализ связи показателей ХВ с точностью обработки проводился отдельно по каждому показателю, однако подробное рассмотрение результатов данного анализа выходит за рамки настоящей статьи. Вместе с тем отметим, что для получения наивысшей точности обработки по параметру торцового биения необходима реализация ХВ третьего вида с симметричным провалом кривой относительно центра зоны шлифования и максимальными для данных условий шлифования значениями показателей f_{PI} , L_B и L_{BP0} .

Основное влияние технологических параметров на характеристики вращения роликов заключается в следующем:

- параметр угловой установки шлифовальных кругов в горизонтальной плоскости γ_H определяет вид характеристики вращения;
- параметр угловой установки шлифовальных кругов в вертикальной плоскости α_H оказывает доминирующее влияние на максимальную частоту вращения после центра зоны шлифования f_{PI} ;
- припуск на обработку Δt влияет на вращение ролика в первой половине зоны, с его увеличением вращение становится более стабильным и кривая частоты вращения приближается к кривой условного зацепления;
- увеличение скорости подачи V_p приводит к возрастанию длины участка непрерывного вращения ролика L_B и максимальной частоты вращения ролика после центра зоны f_{PI} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурье, Г.Б. Прогрессивные методы обработки на станках шлифовальной группы / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1981. – 52 с.
2. Вайнер, Л.Г. Повышение точности шлифования торцов ролика / Л.Г. Вайнер, С.С. Шахновский // Станки и инструмент, 1985, №5, с. 31-32.

Вайнер Леонид Григорьевич

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой начертательной геометрии и машинной графики

Тел. (4212)-22-43-83

E-mail: val@mail.khstu.ru, lgvainer@mail.ru

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Для контроля качества изготовления и испытаний сложных радиоэлектронных систем и приборов применяются средства измерений и средства контроля. От качества организации и планирования метрологического обслуживания технологического процесса зависит качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: жизненный цикл, радиоэлектронные системы, метрологическое обслуживание.

Means of measurements are applied to quality assurance of manufacturing and tests of complex radio-electronic systems and devices and means of the control. Quality of released production depends on quality of the organization and planning of metrological service of technological process.

Key words: life cycle, radio-electronic systems, metrological service.

Стадии полного жизненного цикла радиоэлектронных систем и устройств включают:

1. Исследования и проектирование приборов, на которой осуществляются исследования и обработка замысла, формирование уровня качества, испытание опытного образца, разработка конструкторской документации для изготовления, обращения и эксплуатации изделия.

2. Изготовление изделий (в т.ч.: технологическую подготовку производства, организацию производства, испытания изделий и др.).

3. Эксплуатацию, которая является основой в жизненном цикле (в т.ч.: целевое использование изделия в соответствии с назначением, техническое обслуживание и профилактику, ремонт и восстановление после отказа).

4. Утилизацию при максимальном использовании утилизированных материалов.

В процессе стадии жизненного цикла у потребителя радиоэлектронные устройства постоянно переходят из одного состояния в другое: исправное – по результатам поверки, диагностирование неисправного состояния, хранение, эксплуатация, техническое обслуживание, восстановление (ремонт).

Согласно теории массового обслуживания:

$P_i(t)$ – вероятность нахождения прибора в состоянии s_i ($i=1, 2, 3, 4 \dots n$);

P_{ij} – вероятность перехода из состояния s_i в состояние s_j за время Δt ;

$\lambda_{ij}(\Delta t)$ – плотность вероятности перехода из состояния s_i в состояние s_j за время Δt ;

$\lambda_{ij}(\Delta t) = 1/t$.

Переход средства измерений из состояния в состояние является случайным процессом. Ординарный поток событий без последействия (независимости будущих моментов наступления событий от предыдущих моментов) называется пуассоновским потоком. Наиболее близкой к реальности моделью такого процесса, позволяющей связать вероятностные характеристики переходов приборов из состояния в состояние представляет марковский случайный процесс. Случайный процесс, протекающий в системе S с дискретными состояниями $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots$, называется марковским, если для любого времени t_0 вероятность каждого из состояний системы в будущем (при $t > t_0$) зависит только от ее состояния в настоящем (при $t = t_0$) и не зависит от того, когда и как она пришла в это состояние; т.е. не зависит от ее поведения в прошлом (при $t < t_0$). Иначе говоря, для марковского случайного процесса "будущее" зависит от "прошлого" только через "настоящее" [2]. Полный граф возможных состояний отдельно взятого прибора при рассмотрении жизненного цикла изделия после поставки потребителю следует представить с учетом всех переходов, а также списания, утилизации, которая связана с разборкой приборов, учетом, сбором, сдачей драгметаллов, входящих в состав (ЭРИ) электрорадиоизделий в специализированные организации [1]. Полный граф плотностей вероятности перехода ($\lambda_{ij}=1/t_{ij}$) из состояния s_i в состояние s_j отдельного прибора представлен на рисунке 1.

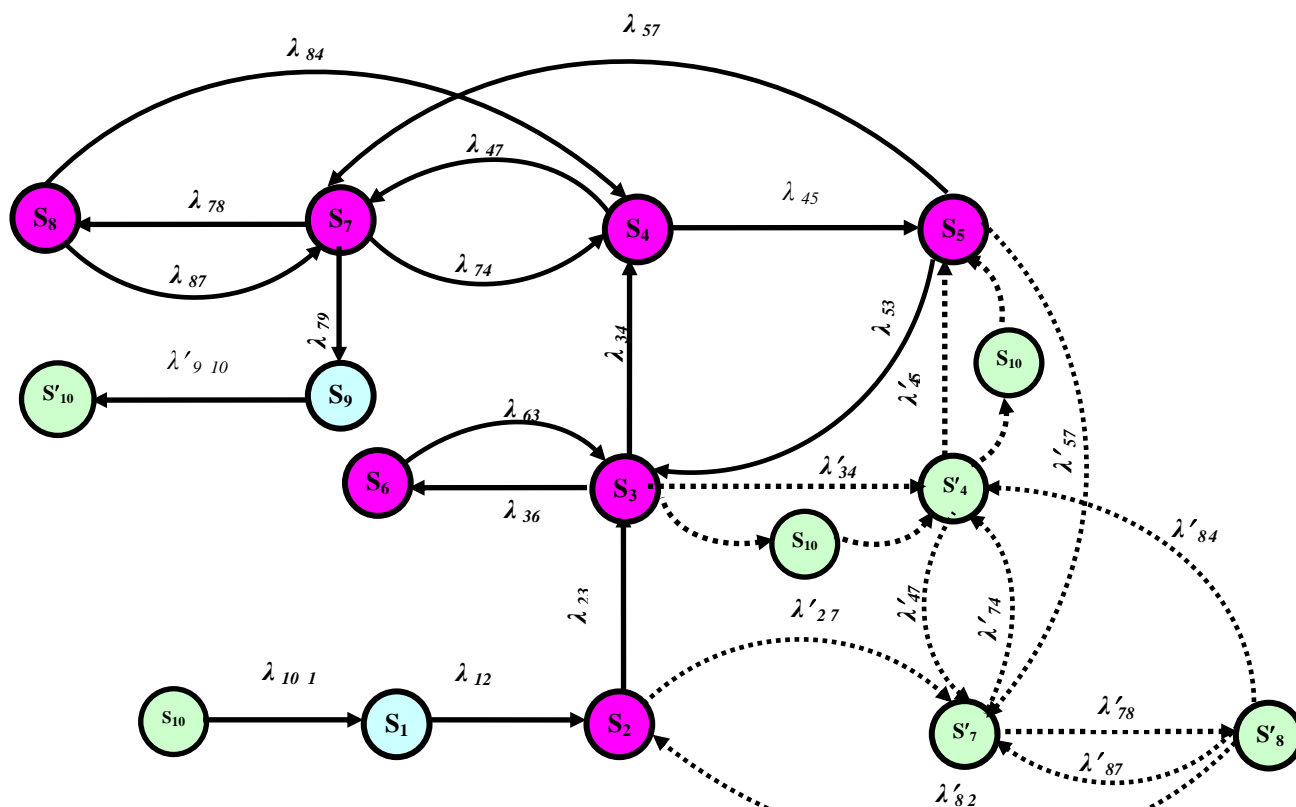


Рисунок 1 – Полный размеченный граф состояний системы
 s_1 – регистрация (постановка на учет); s_2 – входной контроль; s_3 – складирование;
 s_4 – поверка (калибровка) в МСЮЛ; s'_4 – поверка в сторонних организациях;
 s_5 – эксплуатация; s_6 – техническое обслуживание; s_7 – диагностирование;
 s_8 – ремонт (регулировка) в МСЮЛ; s'_7, s'_8 – диагностирование,
 ремонт в специализированных организациях (на заводе-изготовителе);
 s_9 – списание, сдача драгметаллов (утилизация цветных и черных металлов);
 s_{10} – транспортировка в период эксплуатации; s'_{10} – транспортировка на утилизацию

Состояния s_{10} (транспортировка приобретенного прибора), s_1 (регистрация или постановка на учет), s_2 (входной контроль) назовем состояниями – источниками, состояния s_9 (списание), s'_{10} (транспортирование драгметаллов) – поглощающими состояниями. При построении графа состояний S следует учитывать вероятность отправки прибора заводу-изготовителю при отрицательных результатах входного контроля на доработку или замену. Следует также учитывать состояние s_4 и s'_4 поверки в зависимости от области аккредитации организации на право поверки. Один и тот же прибор в определенные моменты эксплуатации может поверяться в сторонней организации – состояние s'_4 , или в МСЮЛ (метрологической службе юридического лица или индивидуального предпринимателя) – состояние s_4 . Немаловажным аспектом является состояние s_7 прибора – техническая диагностика, в результате которой прибор переходит в состояние эксплуатации s_5 после внеочередной поверки s_4 или в состояние ремонта s_8 .

Электронное устройство, имеющее один входной и соответственно один выходной параметр, работает как схема совпадения. Выходной параметр устройства имеется и находится в поле допуска в том и только в том случае, если само устройство исправно и на все его входы подаются необходимые энергетические воздействия (электропитание, другие физические величины) и требуемые сигналы. Радиоэлектронные устройства в отличие от механических приборов и машин содержат небольшое число подвижных частей и элементов, меняющих свой вид или положение во время работы, т.е. статичны. Большинство процессов преобразования информации или энергии, происходящих в электронных изделиях, невозможно наблюдать без

применения измерительных приборов, в качестве параметров выбираются физические величины, значения которых можно измерить или сравнить с эталонами [3].

Для средств измерений – это задача поверки (калибровки). Однако в процессе эксплуатации могут присутствовать скрытые отказы, которые не приводят к превышению поля допуска выходных параметров (кратковременные перегрузки, нарушение теплового режима и т.д.). В сложных радиоэлектронных изделиях невозможно все диагностируемые параметры вывести на панель управления прибора. Для ремонтпригодной радиоаппаратуры диагностирование имеет большое значение, в том числе и на этапе эксплуатации с точки зрения вида и объема требуемого ремонта, возможности выполнения ремонта силами эксплуатирующей организации и экономической целесообразности отправки на ремонт в специализированную организацию. Поэтому на графе плотностей вероятности перехода из состояния в состояние отдельного СИ (рис. 1) состояние диагностирования s_7 выделено отдельно от состояния ремонта s_8 .

При невозможности ремонта прибора силами эксплуатирующей организации (состояние s_8), прибор отправляется на ремонт в специализированную организацию (состояние s'_8). По результатам повторного технического диагностирования или проведения ремонта прибор может возвратиться в состояние эксплуатации s_5 через состояние s_4 – поверки, или же при выходе погрешности измерений за пределы допустимой, исходя из экономической целесообразности проведения повторного ремонта, переходит в состояние списания s_9 . Следует учитывать необходимость технического обслуживания прибора (состояние s_6) в процессе его хранения с периодичностью, указанной в эксплуатационной документации (например, включение вольтметров не менее 1 раза в 6 месяцев для формирования электролитических конденсаторов, входящих в схему прибора, в течение 30 минут, учитывая при этом время расконсервации до начала технического обслуживания и консервации после проведения технического обслуживания).

Дифференциальные уравнения Колмогорова для состояний s_i (рис. 1):

$$\left\{ \begin{array}{l} dP_1(t)/dt = -\lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{101}P_{10}(t), \\ dP_2(t)/dt = -\lambda_{23}P_2(t) - \lambda'_{27}P_2 + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda'_{82}P'_8(t), \\ dP_3(t)/dt = -\lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{36}P_3(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{63}P_6(t), \\ dP_4(t)/dt = -\lambda_{45}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{74}P_7(t) + \lambda_{84}P_8(t), \\ dP'_4(t)/dt = -\lambda'_{45}P'_4 - \lambda'_{47}P'_4(t) + \lambda'_{34}P_3(t) + \lambda'_{74}P_7(t) + \lambda'_{84}P'_8(t), \\ dP_5(t)/dt = -\lambda_{57}P_5(t) \left[\lambda'_{57}P_5(t) \right] + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{45}P_4(t) \left[\lambda'_{45}P'_4(t) \right], \\ dP_6(t)/dt = -\lambda_{36}P_3(t) + \lambda_{63}P_6(t), \\ dP_7(t)/dt = -\lambda_{74}P_7(t) - \lambda_{78}P_7(t) - \lambda_{79}P_7(t) + \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{57}P_5(t) + \lambda_{87}P_8(t), \\ dP'_7(t)/dt = -\lambda'_{74}P'_7(t) - \lambda'_{78}P'_7(t) + \lambda'_{27}P_2(t) + \lambda'_{47}P'_4(t) + \lambda'_{57}P_5(t) + \lambda'_{87}P'_8(t), \\ dP_8(t)/dt = -\lambda_{84}P_8(t) - \lambda_{87}P_8(t) + \lambda_{78}P_7, \\ dP'_8(t)/dt = -\lambda'_{82}P'_8(t) - \lambda'_{84}P'_8(t) - \lambda'_{87}P'_8(t) + \lambda'_{78}P'_7(t), \\ dP_9(t)/dt = -\lambda_{910}P_9(t) + \lambda_{79}P_7(t), \\ dP'_{10}(t)/dt = \lambda_{910}P_9(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

Однако не для всех состояний s_i размеченного графа (рис.1) характерно свойство эргодичности. Выполнение условия эргодичности означает: из любого состояния s_i можно перейти в любое состояние s_j , а затем через некоторое время возвратиться в состояние s_i .

Следовательно, любое состояние s_i и любое подмножество состояний $V \subset W$ системы **S** являются транзитивными для любой пары состояний s_i и s_j ($i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n$). Для приведения системы **S** (рис.1) к простейшей эргодической при рассмотрении вероятностей состояний прибора в процессе эксплуатации будем использовать только транзитивные состояния, или те состояния, в которые система может войти и выйти многократно.

Состояния s_{10} , s'_{10} , s_9 является граничными состояниями. Состояние транспортирования s_{10} в поверочную или ремонтную организации можно условно объединить с состоянием проверки или ремонта в сторонней организации. Состояние возврата прибора по результатам входного контроля заводу-изготовителю и обратно, состояние самого входного контроля представляют собой единичные неповторяющиеся состояния, составляют малый период времени от общего срока службы прибора. Поэтому их можно не учитывать.

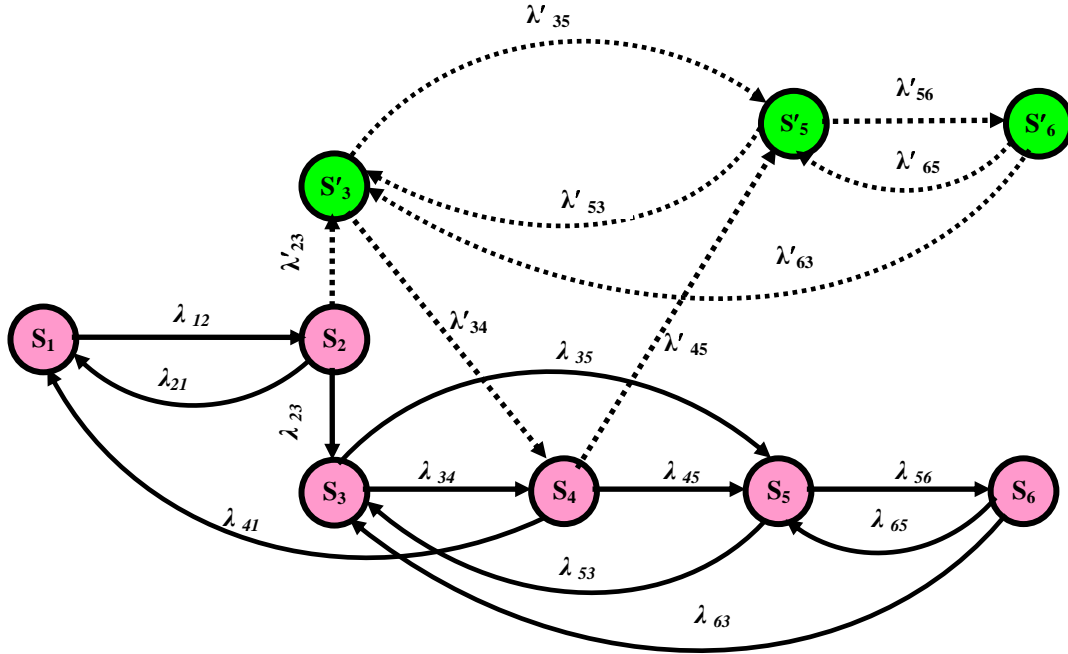


Рисунок 2 – Граф состояний системы в стационарном режиме функционирования

s_1 – складирование; s_2 – техническое обслуживание;

s_3 – проверка (калибровка) в МСЮЛ; s'_3 – проверка в сторонних организациях;

s_4 – эксплуатация СИ; s_5 – диагностирование в МСЮЛ;

s'_5 – диагностирование в специализированных организациях (на заводе-изготовителе);

s_6 – ремонт в МСЮЛ; s'_6 – ремонт в специализированных организациях (на заводе-изготовителе)

Для размеченного графа состояний, изображенного на рисунке 2, дифференциальные уравнения Колмогорова составляются по следующему мнемоническому правилу: производная вероятности любого состояния равна сумме потоков вероятности, переводящих систему в это состояние, минус сумма всех потоков вероятности, выводящих систему из этого состояния [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 dP_1(t)/dt = \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{12}P_1(t), \\
 dP_2(t)/dt = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{23}P_2(t) - \lambda'_{23}P_2(t) + \lambda_{21}P_2(t), \\
 dP_3(t)/dt = \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{35}P_3, \\
 dP'_3(t)/dt = \lambda'_{23}P_2(t) + \lambda'_{53}P'_5(t) + \lambda'_{63}P'_6(t) - \lambda'_{34}P'_3(t) - \lambda'_{35}P'_3, \\
 dP_4(t)/dt = \lambda_{34}P_3(t) - \lambda'_{34}P'_3(t) + \lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{45}P_4(t) - \lambda'_{45}P_4(t), \\
 dP_5(t)/dt = \lambda_{45}P_4(t) + \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{65}P_6 - \lambda_{53}P_5(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\
 dP'_5(t)/dt = \lambda'_{45}P_4(t) + \lambda'_{35}P'_3(t) + \lambda'_{65}P'_6 - \lambda'_{53}P'_5(t) - \lambda'_{56}P'_5(t), \\
 dP_6(t)/dt = \lambda_{56}P_5(t) - \lambda_{65}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t), \\
 dP'_6(t)/dt = \lambda'_{56}P'_5(t) - \lambda'_{65}P'_6(t) - \lambda'_{63}P'_6(t).
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Для стационарного режима функционирования дифференциальные уравнения Колмогорова можно представить системой однородных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами:

$$0 = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} p_j - p_i \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

или

$$p_i \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} p_j \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Формула (4) интерпретируется следующим образом: если простейшая эргодическая система находится в стационарном режиме, то сумма всех потоков вероятности, переводящих систему **S** из других состояний в состояние s_i , равна сумме всех потоков вероятности, переводящих систему **S** из состояния s_i в другие. Уравнение (4) приводим к более простому виду:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{ji} p_j}{\lambda_i} \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где интенсивность суммарного простейшего потока, переводящего систему из состояния s_i в другие:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (6)$$

Нормировочное условие для решения уравнений:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (7)$$

Предельная вероятность для Марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем:

$$P_i = \bar{t}_i / \bar{\tau}_i, \quad (8)$$

где \bar{t}_i – математическое ожидание времени однократного пребывания системы **S** в состоянии s_i ,

$\bar{\tau}_i$ – математическое ожидание времени цикла блуждания системы **S** относительно состояния s_i .

Формулу (8) можно записать в следующем виде:

$$P_i = \frac{\bar{t}_i}{\bar{t}_i + \bar{\theta}_i}, \quad (9)$$

где $\bar{\theta}_i$ – математическое ожидание времени однократного пребывания системы **S** вне состояния s_i .

Таким образом, финальная вероятность пребывания простейшей эргодической системы **S** в состоянии s_i равна отношению математического ожидания \bar{t}_i времени однократного пребывания системы **S** в состоянии s_i к сумме этого математического ожидания и математического ожидания $\bar{\theta}_i$ времени однократного пребывания системы **S** вне состояния s_i .

Из равенства (9) следует:

$$\bar{t}_i = \bar{\theta}_i P_i / (1 - P_i) \quad (10)$$

$$\bar{\theta}_i = \bar{t}_i (1 - P_i) / P_i \quad (11)$$

Физический смысл интенсивности $\lambda(t)$ потока событий это среднее число событий, приходящегося на единицу времени:

$$\bar{t}_i = 1 / \lambda_i \quad (12)$$

При поверке и ремонте СИ в метрологической службе система уравнений (для краткости записи аргумент t опускаем):

$$\begin{cases} \lambda_{21}P_2 + \lambda_{41}P_4 = \lambda_{12}P_1, & \lambda_{12}P_1 = P_2 \lambda_{21} + \lambda_{23}P_3, \\ \lambda_{23}P_2 + \lambda_{53}P_5 + \lambda_{63}P_6 = P_3 \lambda_{34} + \lambda_{35}P_5, & \lambda_{34}P_3 = P_4 \lambda_{41} + \lambda_{45}P_5, \\ \lambda_{45}P_4 + \lambda_{35}P_3 + \lambda_{65}P_6 = P_5 \lambda_{53} + \lambda_{56}P_6, & \lambda_{56}P_5 = P_6 \lambda_{63} + \lambda_{65}P_6. \end{cases} \quad (13)$$

Из системы уравнений (13) имеем:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\lambda_{21}P_2 + \lambda_{41}P_4}{\lambda_{12}}, P_2 = \frac{\lambda_{12}P_1}{\lambda_{21} + \lambda_{23}}, P_3 = \frac{\lambda_{23}P_2 + \lambda_{53}P_5 + \lambda_{63}P_6}{\lambda_{34} + \lambda_{35}}, \\ P_4 = \frac{\lambda_{34}P_3}{\lambda_{41} + \lambda_{45}}, P_5 = \frac{\lambda_{45}P_4 + \lambda_{35}P_3 + \lambda_{65}P_6}{\lambda_{53} + \lambda_{56}}, P_6 = \frac{\lambda_{56}P_5}{\lambda_{63} + \lambda_{65}}, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1. \end{cases} \quad (14)$$

В зависимости от места поверки (время поверки в сторонней организации увеличивается многократно) и места проведения ремонта СИ состав системы уравнений меняется.

При поверке и ремонте СИ в сторонних организациях система уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_{21}P_2 + \lambda_{41}P_4 = \lambda_{12}P_1, \quad \lambda_{12}P_1 = P_2 \lambda_{21} + \lambda'_{23}P_3, \\ \lambda'_{23}P_2 + \lambda'_{53}P_5 + \lambda'_{63}P_6 = P_3 \lambda'_{34} + \lambda'_{35}P_5, \quad \lambda'_{34}P_3 = P_4 \lambda_{41} + \lambda'_{45}P_5, \\ \lambda'_{45}P_4 + \lambda'_{35}P_3 + \lambda'_{65}P_6 = P_5 \lambda'_{53} + \lambda'_{56}P_6, \quad \lambda'_{56}P_5 = P_6 \lambda'_{63} + \lambda'_{65}P_6. \end{cases} \quad (15)$$

Из системы уравнений (15) имеем:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\lambda_{21}P_2 + \lambda_{41}P_4}{\lambda_{12}}, P_2 = \frac{\lambda_{12}P_1}{\lambda_{21} + \lambda'_{23}}, P_3 = \frac{\lambda'_{23}P_2 + \lambda'_{53}P_5 + \lambda'_{63}P_6}{\lambda'_{34} + \lambda'_{35}}, P_4 = \frac{\lambda'_{34}P_3}{\lambda_{41} + \lambda'_{45}}, \\ P_5 = \frac{\lambda'_{45}P_4 + \lambda'_{35}P_3 + \lambda'_{65}P_6}{\lambda'_{53} + \lambda'_{56}}, P_6 = \frac{\lambda'_{56}P_5}{\lambda'_{63} + \lambda'_{65}}, P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1. \end{cases} \quad (16)$$

Выражая все вероятности P_i ($i=1,2, 3, 5, 6$) через вероятность P_4 (состояние эксплуатации) в системах уравнений (14), (16), находят уравнения вероятностей состояний прибора при поверке и ремонте в метрологической службе юридического лица:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\lambda_{41}P_4 \lambda_{21} + \lambda_{23}P_3}{\lambda_{12}\lambda_{23}}, P_2 = \frac{\lambda_{41}P_4}{\lambda_{23}}, P_3 = \frac{P_4 \lambda_{41} + \lambda_{45}P_5}{\lambda_{34}}, \\ P_5 = \frac{\lambda_{63} + \lambda_{65}P_6}{\lambda_{34} \lambda_{53} \lambda_{65} + \lambda_{56} \lambda_{63} + \lambda_{53} \lambda_{63}}, P_6 = \frac{\lambda_{56}P_4 \lambda_{34} \lambda_{45} + \lambda_{35} \lambda_{41} + \lambda_{35} \lambda_{45}P_5}{\lambda_{34} \lambda_{53} \lambda_{65} + \lambda_{56} \lambda_{63} + \lambda_{53} \lambda_{63}}; \end{cases} \quad (17)$$

при поверке и ремонте в сторонней организации:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\lambda_{41}P_4 \lambda_{21} + \lambda'_{23}P_3}{\lambda_{12}\lambda'_{23}}, P_2 = \frac{\lambda_{41}P_4}{\lambda'_{23}}, P_3 = \frac{P_4 \lambda_{41} + \lambda'_{45}P_5}{\lambda'_{34}}, \\ P_5 = \frac{\lambda'_{63} + \lambda'_{65}P_6}{\lambda'_{34} \lambda'_{53} \lambda'_{65} + \lambda'_{56} \lambda'_{63} + \lambda'_{53} \lambda'_{63}}, P_6 = \frac{\lambda'_{56}P_4 \lambda'_{34} \lambda'_{45} + \lambda'_{35} \lambda_{41} + \lambda'_{35} \lambda'_{45}P_5}{\lambda'_{34} \lambda'_{53} \lambda'_{65} + \lambda'_{56} \lambda'_{63} + \lambda'_{53} \lambda'_{63}}. \end{cases} \quad (18)$$

Выразим все вероятности через P_4 с коэффициентами a_i :

$$P_1 = P_4 a_1, P_2 = P_4 a_2, P_3 = P_4 a_3, P_5 = P_4 a_5, P_6 = P_4 a_6.$$

Нормировочное уравнение будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^6 P_i(t) = P_4 + P_4 a_1 + P_4 a_2 + P_4 a_3 + P_4 a_5 + P_4 a_6 = 1,$$

откуда $P_4 = \frac{1}{1 + a_1 + a_2 + a_3 + a_5 + a_6}$.

В соответствии с формулой (12) находим математическое выражение времени нахождения прибора в эксплуатации:

$$\bar{t}_4 = \frac{1}{\lambda_4} = \frac{1}{\lambda_{41} + \lambda_{45}}$$

В соответствии с формулой (11) находим математическое ожидание θ_4 , в течение которого прибор не находится в состоянии эксплуатации:

$$\bar{\theta}_1 = \bar{t}_1 \left(-P_4 \right) P_4.$$

На предприятии установили численные значения интенсивностей переходов $\lambda_{ij}(t)$ из состояния s_i в состояние s_j отдельно взятого прибора за время t (в течение межповерочного интервала), все значения величин выражены в часах:

- среднее время технического обслуживания 8 час.: $1/\lambda_{21} = 1/\lambda_{23} = 0,125$;
- среднее время поверки СИ 10 час.: $1/\lambda_{34} = 0,1$;
- среднее время установления неисправности (диагностики) 20 час.: $1/\lambda_{56} = 0,05$;
- среднее время ложного ремонта 20 час.: $1/\lambda_{65} = 0,05$;
- среднее время текущего ремонта 80 час.: $1/\lambda_{63} = 0,0125$;
- среднее время хранения на складе в ожидании обслуживания 10 час.: $1/\lambda_{12} = 0,1$;
- среднее время установления непригодности к применению по результатам поверки 10 час.: $1/\lambda_{35} = 0,1$;
- среднее время диагностики ложного отказа 10 час.: $1/\lambda_{53} = 0,1$;
- среднее время наработки на внезапный отказ 200 час.: $1/\lambda_{45} = 0,005$;
- среднее время эксплуатации за межповерочный интервал, исходя из возможности непрерывной работы прибора в течение 8-ми часов, 2000 час.: $1/\lambda_{41} = 0,0005$.

Следовательно, значения a_i :

$$\dot{a}_1 = \frac{\lambda_{41} \lambda_{21} + \lambda_{23}}{\lambda_{12} \lambda_{23}} = 0,01, \quad \dot{a}_2 = \frac{\lambda_{41}}{\lambda_{23}} = 0,004, \quad \dot{a}_3 = \frac{\lambda_{41} + \lambda_{45}}{\lambda_{34}} = 0,055,$$

$$\dot{a}_5 = \frac{\lambda_{63} + \lambda_{65} \lambda_{34} \lambda_{45} + \lambda_{35} \lambda_{41} + \lambda_{35} \lambda_{45}}{\lambda_{34} \lambda_{53} \lambda_{65} + \lambda_{56} \lambda_{63} + \lambda_{53} \lambda_{63}} = 0,095454545$$

$$\dot{a}_6 = \frac{\lambda_{56} \lambda_{34} \lambda_{45} + \lambda_{35} \lambda_{41} + \lambda_{35} \lambda_{45}}{\lambda_{34} \lambda_{53} \lambda_{65} + \lambda_{56} \lambda_{63} + \lambda_{53} \lambda_{63}} = 0,076363636$$

Найдем вероятности состояний:

$$P_4 = 0,805919848, \quad P_1 = P_4 a_1 = 0,00805919848, \quad P_2 = P_4 a_2 = 0,00322367932, \\ P_3 = P_4 a_3 = 0,0443255916, \quad P_5 = P_4 a_5 = 0,0769287123, \quad P_6 = P_4 a_6 = 0,0615429691.$$

Величина математического ожидания времени, в течение которого прибор находится в эксплуатации:

$$\bar{t}_4 = 1 / (\lambda_{41} + \lambda_{45}) = 1 / (0,0005 + 0,005) = 181(\div \hat{a} \hat{n} \hat{t} \hat{a}).$$

Величина математического ожидания времени, в течение которого прибор не находится в эксплуатации:

$$\bar{\theta}_1 = \bar{t}_1 \left(-P_4 \right) P_4 = 181 \left(-0,805919848 \right) 0,805919848 = 43,6(\div \hat{a} \hat{n} \hat{t} \hat{a})$$

При абсолютной надежности прибора: $\lambda_{45} = 0$, состояния системы s_5 и s_6 не учитываются на графе состояний, при этом: $\lambda_{45} = 0, \lambda_{35} = 0, \lambda_{53} = 0, \lambda_{56} = 0, \lambda_{65} = 0, \lambda_{63} = 0$.

При сокращении времени поверки за счет применения современных быстродействующих эталонов в 2 раза: $\lambda_{34} = 0,2$. Коэффициенты a_i будут составлять:

$$\dot{a}_1 = 0,01, \quad \dot{a}_2 = 0,004, \quad \dot{a}_3 = 0,0025, \quad \dot{a}_5 = 0, \quad \dot{a}_6 = 0.$$

Вероятность нахождения прибора в эксплуатации:

$$P_4 = \frac{1}{1 + a_1 + a_2 + a_3} = 0,981354268, \bar{t}_4 = 1/\lambda_{41} = 1/0,0005 = 2000(\div \hat{a});$$

$$\bar{\theta}_1 = \bar{t}_1 \left(-P_4 \right) P_4 = 2000 \left(-0,981354268 \right) 0,981354268 = 38(\div \hat{a}).$$

Мы видим, что вероятностные характеристики работы более надежного прибора изменились: P_4 возросла с 0,805919848 до 0,981354268, время \bar{t}_4 увеличилось с 181 часа до 2000 часов, время $\bar{\theta}_1$ уменьшилось с 43,6 часа до 38 часов. Это свидетельствует о том, что эксплуатационные характеристики рассмотренного прибора не являются достаточными для качественного метрологического обеспечения. Вероятностные характеристики нахождения прибора в эксплуатации P_4 будут значительно хуже в связи со значительным увеличением времени на поверку прибора в сторонней организации от 300 до 1500 часов, а также увеличением времени диагностики отказа и времени ремонта.

В данной работе установлено, что при планировании метрологического обеспечения важно знать значение вероятности нахождения прибора в эксплуатации P_4 . Если вероятность нахождения прибора в эксплуатации имеет значение $P_4 \leq 0,95$, то необходимо иметь как минимум два прибора одного типа. При этом следует учитывать экономическую целесообразность использования данного типа СИ или приобретения нового.

Сведения о каждом приборе, начиная с момента приобретения, являются входными данными для составления годовых графиков поверки СИ, графиков технического обслуживания, графиков ремонта, графиков списания СИ, плана приобретения СИ, расчета числа поверителей и ремонтников СИ, выбора поверочной организации, что в конечном итоге обеспечит качество метрологического обслуживания технологического процесса изготовления и испытаний выпускаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ ГТК РФ от 19 ноября 2002 г. N 1224 "О порядке учета и хранения изделий и материалов, изготовленных с применением драгоценных металлов и драгоценных камней".
2. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит. – 1991. (Физико-математическая б-ка инженера.) – 384 с.
3. Ксенз, С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств / С.П. Ксенз. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с., ил.

Золотухина Надежда Павловна
 ФГУП «Курский завод «Маяк»
 Заместитель главного метролога
 Тел: (4712) 52-80-60
 E-mail vnz73@rambler.ru

Ивахненко Александр Геннадьевич
 Курский государственный технический университет, г. Курск
 Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление качеством, метрология и сертификация»
 Тел.: (4712) 32-61-00
 E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

С.А. КУКЕТКОВ

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Приведен анализ возможности создания частично регулярных и полностью регулярных микрорельефов инструментами для поверхностного пластического деформирования, разработанными на основе кинематического анализа и синтеза современных способов шлифования и динамических методов поверхностного пластического деформирования. Дается краткое описание разработанных инструментов и их возможностей.

Ключевые слова: *поверхностная пластическая деформация, упрочнение, регулярный микрорельеф, шлифование, кинематический анализ, топология поверхности.*

The analysis of the possibility of establishing some regular and completely regular micro-relief tools for surface plastic deformation, developed on the basis of analysis and synthesis of modern methods of grinding and dynamic methods of surface plastic deformation. A brief description of the developed tools and their capabilities.

Key words: *surface plastic deformation, hardening, regular microrelief, grinding, kinematic analysis, the topology of the surface.*

Различные методы ППД надежно заняли своё место в области инженерии поверхности деталей машин. Среди них можно выделить ряд динамических методов по способу воздействия на поверхность детали, а именно статико-импульсную обработку, обработку щётками, вибрационное накатывание, вибродинамическое накатывание [1], центробежно-шариковую обработку (ЦШО) [2] и др. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, а также рациональную область применения.

Большой интерес представляет центробежно-шариковая обработка. На основе литературного анализа можно сделать вывод о том, что данный метод имеет значительные ресурсы для усовершенствования и расширения области его применения на финишных операциях технологического процесса. С целью решения поставленной задачи был разработан инструмент, который позволяет значительно расширить область прикладных задач. В частности создавать частично регулярный (ЧРМР) и полностью регулярный микрорельеф (РМР) с различной степенью анизотропии на поверхностях деталей машин и приборов. Целью данной работы является рассмотрение возможности создания модифицированной поверхности с требуемым микрорельефом на деталях цилиндрической формы.

Ключевым моментом при разработке инструмента стал синтез кинематических схем механической обработки с уже существующими способами ППД. Аналогия четко прослеживается при рассмотрении современных способов абразивной обработки и инструментов для их реализации (рисунок 1) [3]. Известен способ механической обработки наружных поверхностей вращения, называемый шлифованием круглыми абразивными кругами с продольной подачей (кругло шлифовальная операция с продольной подачей). Данному способу соответствует своя кинематическая схема формообразования, включающая два вращения с параллельными осями цилиндрической обрабатываемой поверхности и цилиндрического инструмента и его продольного (вдоль оси вращения) перемещения. Кинематически центробежно-шариковая обработка является аналогом круглому шлифованию.

Более детальное рассмотрение схем абразивной обработки привело к модифицированию способа центробежно-шариковой обработки и созданию инструмента имитирующего осцилляцию вдоль оси вращения детали за счет определенного расположения деформирующих элементов (ДЭ). Отличительной особенностью разработанного инструмента является то, что центробежная сила, посредством которой в базовой технологии и происходило формообразование поверхности заготовки, перестает быть определяющей.

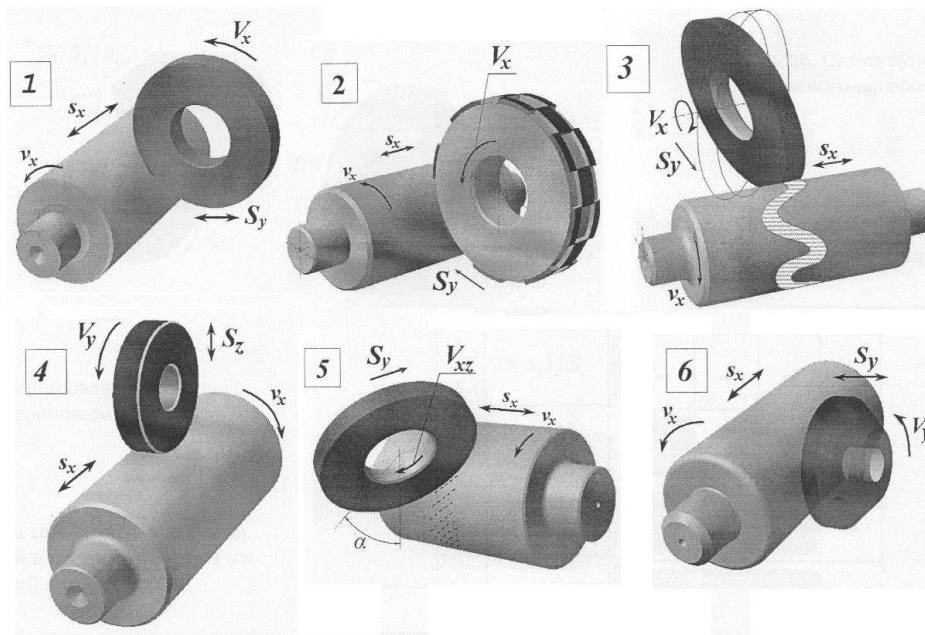


Рисунок 1 – Схемы круглого наружного шлифования деталей цилиндрической формы

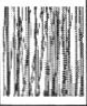




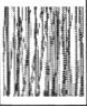
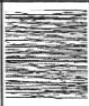



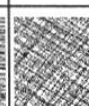


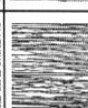










Автором была подана заявка на изобретение и получено положительное решение о выдаче патента. Специфика процесса подобна круглому шлифованию, реализующему метод бегущего контакта (рисунок 1, позиция 3) [3]. Также некоторую аналогию можно провести с вибрационным накатыванием, разработанным Шнейдером Ю.Г. [1]. В работе [4] говорится о том, что весьма важным резервом совершенствования способов обработки является перераспределение функций от оборудования к инструменту. Например, осциллирующее движение оборудования, которое достаточно сложно реализовать, легко может быть осуществлено в конструкции разработанного инструмента.

Синтез методов получения заданной топологии поверхности деталей цилиндрической формы обуславливает управление кинематикой взаимных движений инструмента и детали с преобладающей значимостью в этих условиях инструмента, что и находит отражение в разработках автора.

Следует подчеркнуть, что способ круглого торцевого шлифования, который в свою очередь по кинематике совпадает с фрезоточением породил идею кинематически подобного способа и инструмента для обработки деталей ППД. Его предложено было характеризовать торцевой ротационной ударной обработкой (ТРУО). Заявка на изобретение также подана и получено положительное решение о выдаче патента. Рассмотрение торцевого шлифования инструментами с некруговым профилем рабочей поверхности позволило сконструировать упрочняющий инструмент для ТРУО. В инструменте для торцевого упрочнения сила инерции при формообразовании не используется вообще.

Отличительной особенностью разработанных инструментов и данного класса способов ППД в целом является то, что лунки, образуемые инструментом для ТРУО ППД имеют каплевидную форму в результате ударно воздействия сочетаемого с процессом скольжения – качения ДЭ по поверхности заготовки. Была сформулирована гипотеза о формировании на поверхности детали топологии подобной той что образуется при шлифовании с характерным направлением микронеровностей (таблица 1) [3]. Данное утверждение было подтверждено экспериментально. Кинематические формулы способов шлифования, изображенные в таблице 1 включают в себя традиционные обозначения составляющих режима обработки: скорость шлифовального круга V , скорость вращения детали v , линейное перемещение шлифовального круга (подача) S , линейное перемещение детали s . Очевидно, наиболее развитый микро-рельеф можно получить в результате торцевого шлифования по схеме 8.

Таблица 1 – Кинематические схемы абразивной обработки цилиндрических деталей и соответствующие им типы направлений неровностей (схемы №7, 8 – суперфиниширование и шлифование торцовым инструментом с некруговым профилем рабочей поверхности)

№ СХ.	Кинематич. формула	Тип формируемого микрорельефа				
						
1. 2. 3.	$v_x s_x V_x S_y$		-	-	-	-
4.	$v_x s_x V_y S_z$	-		-	-	-
5.	$v_x s_x V_{xz} S_y$					-
6.	$v_x s_x V_y S_y$					-
7.	$v_x s_x V_y S_z$					-
8.	$v_x s_x V_y S_y$					

Топология поверхности является результатом взаимодействия поверхностей абразивного инструмента и обрабатываемой детали с учётом направлений относительного перемещения векторов скоростей их вращения и подач при формировании требуемого типа направлений неровностей [3]. Формирование подобной топологии применимо и для методов ППД с использованием разработанных инструментов.

Таким образом разработанные нами инструменты позволяют осуществлять обработку ППД с созданием ЧРМР и РМР, определяя тем самым функциональные возможности изменяемой поверхности детали в сочетании с высокими эксплуатационными характеристиками, например, повышенной износостойкостью, контактной жесткостью, усталостной прочностью пар трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.: ил.
2. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л.Г. Одинцов. – Справочник. – М.: Машиностроение, 1987, 328 с., ил.
3. Козлов, А.М. Формирование топологии поверхности цилиндрических деталей при обработке абразивным инструментом / А. М. Козлов // СТИН. – 2000. – №4. – С. 32-36.
4. Степанов, Ю.С. Технология и инструмент для алмазно-абразивной обработки с параметрической осцилляцией / Ю. С. Степанов, Б. И. Афанасьев, И. А. Юричев // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения — Технология - 2003. Материалы Международ. научн.-технич. конф. Орел, 25-27 сентября, 2003. / Под общей ред. д.т.н., проф. В. А. Голенкова, д.т.н., проф. Ю. С. Степанова-Орел, 2003, - С. 136-142.

Кукетков Степан Анатольевич

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк

Аспирант кафедры «Технология машиностроения»

E-mail: k.step.an@mail.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.921.8(043)

О.Ю. ЕРЕНКОВ, С.О. ЕРЕНКОВ, Е.Г. КАЛИТА, А.В. ГАВРИЛОВА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАГОТОВКИ

Статья посвящена исследованиям в области обеспечения качества токарной обработки заготовок из полимерных материалов. Разработан способ и устройство для осуществления предварительного поверхностного деформирования заготовок. Представлены результаты экспериментальных исследований, анализ которых подтверждает эффективность применения предложенного способа.

Ключевые слова: полимерные материалы, точение, механическое деформирование, качество обработки.

This work is devoted to researching of details manufacturing processes of plastic. The method and device of preliminary mechanical deformation a surface layer of polymeric materials processing by cutting is suggested. Results of experimental researches of kaprolon turning processing in view of preliminary influence, according to the offered method are submitted. The analysis of the received results confirms expediency of application of the given method and the improving of quality parameters of the processed surface of work piece from the kaprolon is testified about it.

Key words: polymeric materials, turning, quality parameters, treated surface, mechanical deformation.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с большой ролью пластмасс как конструкционных материалов вопросы их обработки приобретают исключительно важное значение. Однако технологических методов, специально предназначенных для обработки пластмасс недостаточно, и они имеют низкую эффективность. Так получаемые при механической обработке геометрические характеристики обработанной поверхности (шероховатость и точность формы поверхности) зачастую не соответствуют значениям, установленным в технических требованиях, что приводит к необходимости дополнительной обработки, так как именно от качества обработанной резанием поверхности в значительной степени зависят надежность и долговечность функционирования деталей и механизмов.

Таким образом, задача повышения эффективности обрабатываемости заготовок из полимерного материала является актуальной, так как ее решение позволит повысить качественные характеристики изготавливаемой продукции и снизить себестоимость ее изготовления.

Одним из путей решения данной задачи является разработка новых подходов к обработке резанием полимерных материалов, сущность которых заключается в направленном изменении свойств обрабатываемого материала с целью обеспечения благоприятных условий для получения обработанной поверхности высокой точности и надлежащего качества. На сегодняшний день известны несколько способов решения указанной задачи [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель экспериментальных исследований является определение геометрических показателей качества поверхностного слоя детали из капролона в зависимости от варианта токарной обработки заготовок.

В данной работе, рассматривая обработку режущим инструментом как разновидность процесса управляемого разрушения твердого полимерного материала и на основе положений

термофлуктуационной теории разрушения, представлено новое решение указанной задачи повышения качества обработанной точением поверхности на основе метода предварительного деформирования (ПД) поверхностного слоя заготовки. Сущность способа заключается в том, что заготовку из полимерного материала, предназначенную для токарной обработки, предварительно подвергают механическому деформированию путем воздействия на поверхностный слой.

За счет деформирования образуется такая структура материала, в которой часть химических связей разрушена, а часть напряжена. Это приводит к уменьшению энергии активации связей полимера и при дальнейшем взаимодействии поверхностного слоя материала с режущим инструментом инструмента к снижению силы резания, так как облегчается процесс деформирования срезаемого слоя за счет образования зоны предразрушения. Размеры микротрещин и зоны пластической деформации перед режущим клином в срезаемом припуске материала уменьшаются, магистральная трещина приобретает более устойчивое направление развития вдоль линии среза, что является предпосылкой повышения качественных показателей обработанной поверхности, так как снижается вероятность образования вырывов, сколов и подобных дефектов обрабатываемого резанием материала.

Для реализации ПД поверхностного слоя заготовки разработано специальное устройство, техническая сущность и конструкция которого защищены патентом на изобретение [2], рисунок 1. Данное устройство состоит из следующих элементов: корпуса 1, закрепленного на суппорте токарного станка; плиты 3, выполненной с возможностью горизонтального перемещения по направляющим 2 корпуса 1; опорные ролики 4 установленные на плите 3.

ПД материала заготовки реализуется за счет прижима к поверхности заготовки ролика 8. Прижим осуществляется посредством вращения ходового винта 5, что приводит к перемещению сухаря 6, имеющего общую ось 7 с роликом 8.

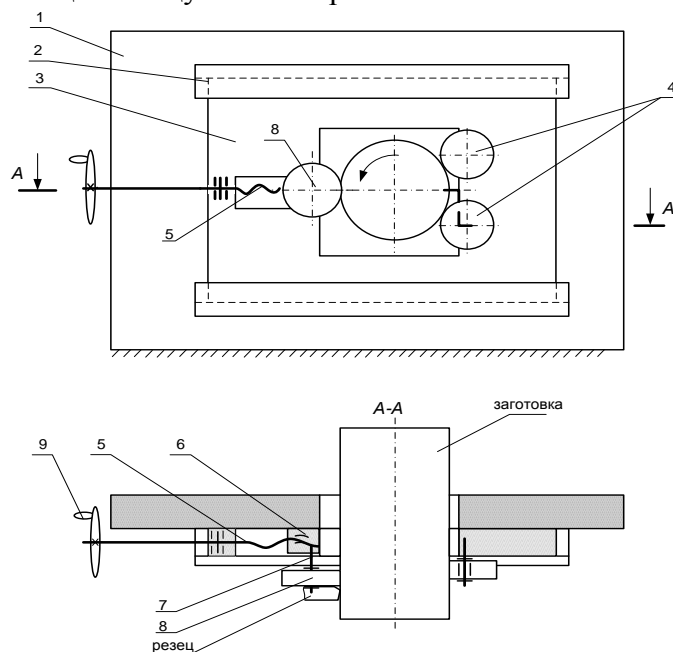


Рисунок 1 – Схема устройства для обработки заготовок из пластмасс

В качестве используемого материала был выбран капролон. Это объясняется тем, что капролон является наиболее используемым полимерным материалом, для производства широкой номенклатуры деталей машиностроения, благодаря ряду положительных физико-механических и химических свойств [3].

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности.

На первом этапе проводилась токарная обработка заготовок, которые не подвергались ПД. На втором этапе проводилась токарная обработка заготовок, которые подвергались ПД

перед резанием с различными усилиями прижима ролика 8 к поверхности заготовки. Усилия прижима варьировались в диапазоне от 0-4 МПа. Режимы резания, материал и геометрические параметры режущего инструмента выбирали на основе результатов ранее проведенных исследований [1]. Токарную обработку проводили на универсальном токарно-винторезном станке модели 16К20Ф3С47. Во время проведения экспериментов производили измерение составляющей P_z силы резания при помощи балочного датчика силы СВ1А-К3 закрепленного на резце. Сигнал с датчика поступал на индикатор DN-10.

Оценка отклонений формы обработанных поверхностей производилась с применением цифрового измерительного комплекса «Rondcom 41С» (Япония) и проводилась по следующим показателям: нецилиндричность (отклонение от цилиндричности), включая непрямолинейность образующей, и некруглость (отклонение от круглости). Шероховатость поверхности контролировали при помощи профилометра «TR 200» (США). В качестве выходных параметров из номенклатуры параметров шероховатости согласно ГОСТ 2789-73 выбраны: среднее арифметическое отклонение профиля R_a , высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , средний шаг неровностей профиля S_m . Дополнительно определялись параметры шероховатости в соответствии с международным стандартом ISO 4288: расстояние от вершины наибольшего выступа профиля до средней линии P_p , расстояние от дна наибольшей впадины профиля до средней линии P_m , асимметрия профиля S_k . Данные параметры имеют важное практическое значение для оценки качества поверхностного слоя. Согласно положениям ISO 4288 профиль с положительными значениями параметра S_k имеет четкие высокие пики, которые выделяются от среднего. Поверхности с отрицательными значениями S_k имеют четкие глубокие впадины в гладких плато профиля. В менее очевидных случаях значения S_k приближаются к нулю. Значения $S_k > 1,5$ показывают, что поверхность имеет непростую форму и простые параметры (R_a , R_z), вероятно не могут адекватно характеризовать качество поверхностного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2 представлены в виде графических зависимостей экспериментальные данные влияния усилия деформирования поверхностного слоя капролона на значение силы резания.

Анализ представленных данных, рисунок 2, позволяет сделать вывод о том, что с увеличением усилия деформирования $P_{ПД}$ имеет место снижение силы резания P_z во всем исследуемом диапазоне подач.

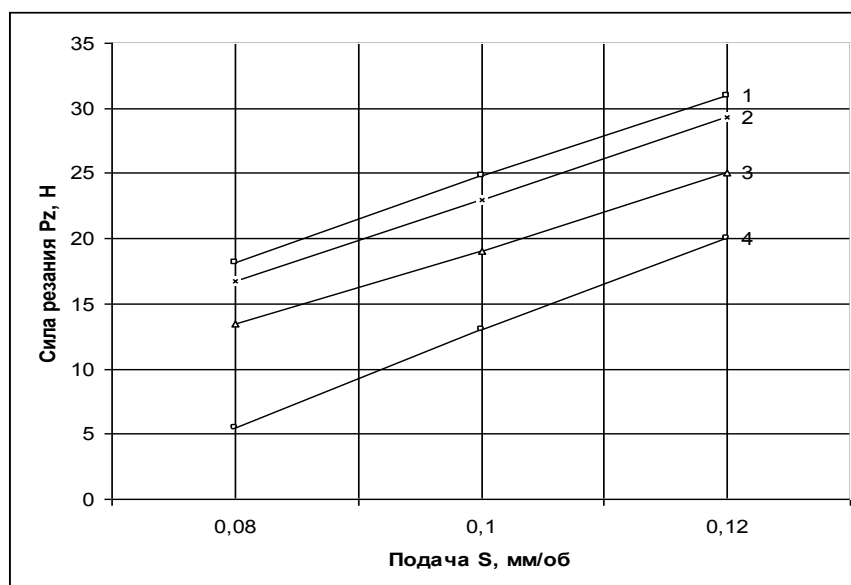


Рисунок 2 – Влияние усилия деформирования поверхностного слоя капролона на силу резания 1 – $P_{ПД}=0$ МПа; 2 – $P_{ПД}=1$ МПа; 3 – $P_{ПД}=2$ МПа; 4 – $P_{ПД}=4$ МПа

Снижение силы P_z объясняется технологическим разупрочнением поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, которое происходит за счет развития имеющихся внешних и внутренних дефектов в виде микротрещин и образования новых.

Подтверждением данного факта служат микрофотографии стружек, представленные на рисунке 3. Стружка, полученная без предварительного деформирования (рисунок 3,а), является сливной. В случае обкатки с усилием $P_{ПД}=1$ МПа, стружка (рисунок 3,б) является непрерывной стружкой скалывания. В случае обкатки с усилием $P_{ПД}=2$ МПа, стружка (рисунок 3,в), является прерывистой стружкой скалывания. В случае обкатки с усилием $P_{ПД}=4$ МПа, стружка (рисунок 3,г) является стружкой скалывания.

Таким образом, учитывая известную взаимосвязь [4] между видом стружки и качеством обработанной поверхности, считаем оптимальным значением усилия поверхностного деформирования $P_{ПД}=1$ МПа.

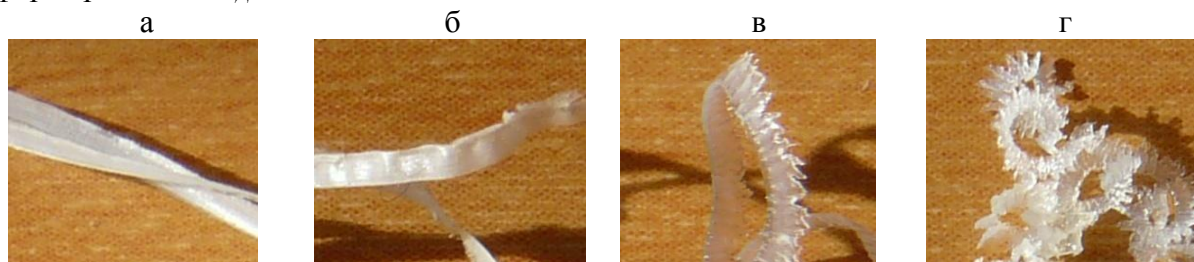


Рисунок 3 - Микрофотографии фрагментов стружки капролона
а – $P_{ПД}=0$; б – $P_{ПД}=1$ МПа; в – $P_{ПД}=2$ МПа; г – $P_{ПД}=4$ МПа

Численные значения исследуемых параметров шероховатости, сведенные в таблицу 1, подтверждают тот факт, что применение предварительного деформирования поверхностного слоя заготовки позволяет получить впоследствии более качественный поверхностный слой детали, по сравнению с вариантом традиционного точения заготовок. При этом значения параметра S_k подтверждают правомерность оценки шероховатости по известным параметрам R_a и R_z .

Таблица 1 – Результаты исследования шероховатости поверхности деталей из капролона при различных видах обработки

Вид обработки	Параметры шероховатости, мкм						
	R_a	R_z	R_{max}	R_p	R_m	S_m	S_k
Предварительное деформирование и точение	2,53	7,37	9,81	4,17	5,63	0,15	-0,88
Обычное точение	6,63	20,2	37,9	14,8	23,1	0,5	-0,6

Наибольший положительный эффект в случае применения предварительного сжатия заготовок можно объяснить образованием растягивающих напряжений в объеме материала заготовки после прекращения действия сжимающего усилия. Данные растягивающие напряжения приводят к образованию поверхностных микротрещин, которые способствуют дополнительному технологическому разупрочнению поверхности материала.

С целью выявления целесообразности и возможности применения предварительного деформирования поверхностного слоя заготовок из капролона проводилась оценка отклонений формы поверхностей деталей. Полученные экспериментальные данные представлены, соответственно, на рисунках 4, 5 и 6.

Согласно данным по нецилиндричности предварительное деформирование заготовок из исследуемых материалов приводит к снижению нецилиндричность до двух раз. В случае обычной токарной обработки заготовки из капролона, рисунок 4, максимальное отклонение от цилиндричности составляет 20 мкм, а после применения комбинированной обработки, включающей предварительное деформирование заготовки, данное отклонение не превышает 6 мкм.

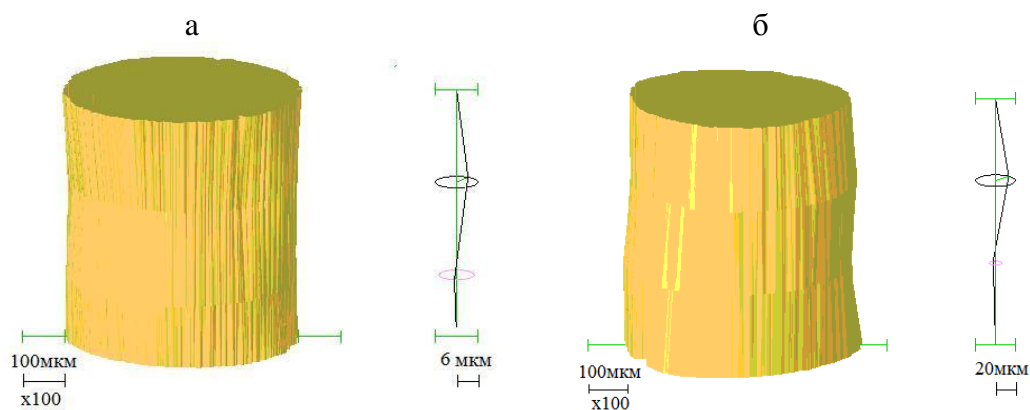


Рисунок 4 – Отклонения от цилиндричности при обработке капролона
 а) типовой режим резания; б) комбинированная обработка (ПД + точение)

Значения непрямолинейности образующей деталей, полученных при исследуемых вариантах обработки, отличаются незначительно и составляют, например, 18 мкм при традиционном точении и 15 мкм после точения с применением предварительного деформирования заготовки, рисунок 5.

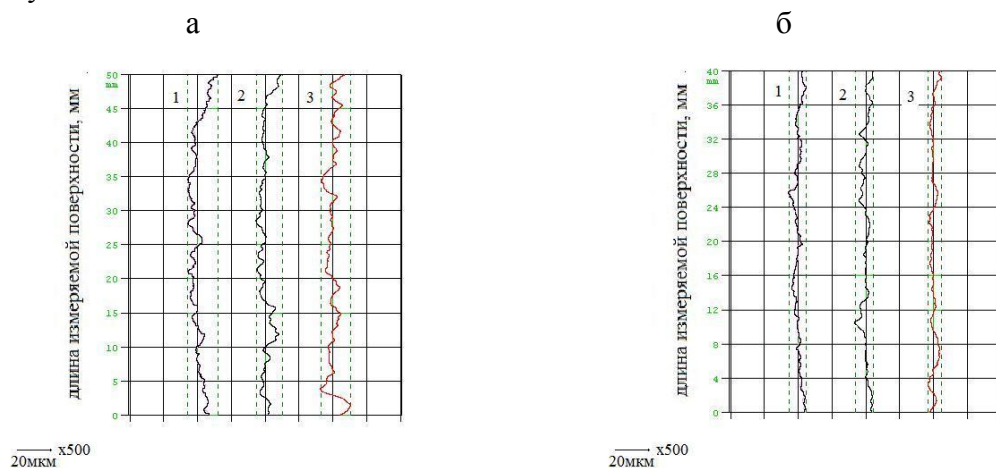


Рисунок 5 – Отклонение от прямолинейности образующей после обработки капролона
 а) типовой режим резания; б) комбинированная обработка (ПД + точение)

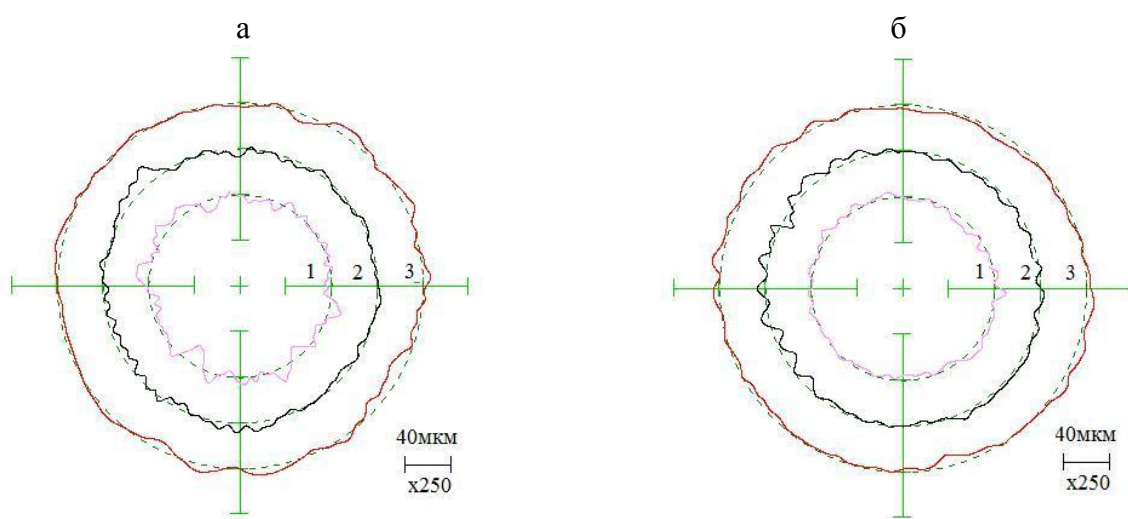


Рисунок 6 – Отклонение от круглости при обработке капролона
 а) типовой режим резания; б) комбинированная обработка (ПД + точение)

На основании полученных данных, рис.6, по отклонению от круглости деталей установлено, что применение предварительного деформирования заготовки способствует неко-

торому снижению значения отклонения от круглости. Так, после токарной обработки заготовок из капролона обычным способом отклонения от круглости составляет 23 мкм, после обработки с предварительным деформированием -15 мкм, и для варианта с предварительным сжатием – 13 мкм.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании анализа полученных экспериментальных данных можно заключить следующее:

– предварительное деформирование поверхностного слоя заготовки из капролона обеспечивает структурные изменения в материале, сопровождающиеся технологическим разупрочнением материала, что является снижением силы резания при последующей токарной обработке;

– экспериментально доказано, что применение предварительного поверхностного деформирования заготовок к снижению таких показателей отклонений формы обработанных поверхностей как некруглости и нецилиндричность, отклонения от прямолинейности имеют примерно равные значения независимо от варианта обработки, а снижение отдельных параметров шероховатости обработанной поверхности достигает до 4 раз по сравнению с параметрами после типовой обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еренков, О.Ю. Новые комбинированные способы обработки полимерных материалов резанием на основе предварительных физико-химических и механических воздействий / О.Ю. Еренков, А.Г. Ивахненко, Хосен Ри. - Владивосток: Дальнаука, 2007.-196 с.
2. Патент №2342249 Российская федерация, (51) МПК В 29 С 37/00. Устройство для предварительной обработки заготовок из пластмасс / О.Ю. Еренков, С.О. Еренков, Е.Г. Калита, Г.А. Калита. - № 200712076/11; заявлено 30.05.2007; опубликовано 27.12.2008, Бюл. №36. – 4 с.
3. Комялова, Е.В. Повышение качества токарной обработки капролона путем предварительного термомеханического воздействия: дис. ... канд. техн. наук. / Е.В. Комялова. – Комсомольск-на-Амуре, 2005. – 161с.
4. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: учебное пособие для вузов / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1974. – 430 с.

Еренков Олег Юрьевич

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Химической технологии и биотехнологии»
Телефон: (4212) 37-52-31
E-mail: erenkov@list.ru

Еренков Святослав Олегович

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
Магистрант кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин»
Телефон: (4212) 37-52-59
E-mail: erenkov@list.ru

Калита Евгений Георгиевич

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
Аспирант кафедры «Химическая технология и биотехнология»
Телефон: (4212) 37-52-59
E-mail: Kalita85@mail.ru

Гаврилова Анна Владимировна

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
Кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Детали машин»
Телефон: (4212) 59-25-71
E-mail: avalirvag@mail.ru

А.В. КИРИЧЕК, А.Н. АФОНИН, Д.А. ДОЛЖИКОВ

ПРОГРЕССИВНЫЙ СПОСОБ НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНОЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕЗЬБЫ

Установлено, что на сегодняшний день одной из причин ограничения применения накатывания конических резьб является проскальзывание витков инструмента относительно заготовки. Предложен новый способ накатывания наружных конических резьб, позволяющий снизить скорость проскальзывания инструмента относительно заготовки

Ключевые слова: коническая резьба, накатывание, технология, инструмент, стойкость.

For today rolling is a perspective method of reception of a thread. At rolling a conical thread there is a tool slippage on preparation and deterioration of the tool. The offered scheme rolling allows to avoid slippage and to increase firmness of the tool.

Key words: conical thread, rolling, tool, technology, wear resistance.

В настоящее время в различных отраслях отечественной и мировой промышленности все чаще встречаются механизмы и соединения с конической резьбой. С развитием техники повышаются требования к коническим резьбам по прочности, точности, качеству поверхности, а в некоторых случаях и по коррозионной стойкости. Одним из главных свойств конического резьбового соединения является его герметичность, поэтому конические резьбы преимущественно используются для герметичного соединения труб нефтяного сортамента. В качестве примера можно привести применяемые в нефтяной промышленности резьбовые соединения труб насосно-компрессорных по ГОСТ 633-80 с наружной и внутренней конической резьбой.

Одним из наиболее производительных способов получения резьб, обеспечивающим высокое качество поверхности и высокие прочностные и точностные характеристики, является резьбонакатывание. Однако данный способ, при применении его к коническим поверхностям, влечет за собой ряд трудностей, из которых одна из наиболее существенных – проскальзывание инструмента относительно заготовки.

При накатывании резьб с симметричным профилем проскальзывание возникает между вершинами профиля резьбы ролика и впадинами резьбы накатываемой детали и наоборот. Причиной проскальзывания является разность диаметров инструмента и заготовки. Проскальзывание способствует износу инструмента [3]. Обкатка без проскальзывания происходит только в одной точке на определённых диаметрах ролика и заготовки. Эта точка называется полюс зацепления. Для резьб с симметричным профилем полюс зацепления находится приблизительно посередине между наружным и внутренними диаметрами, т.е. на среднем диаметре резьбы [3].

При накатывании конической резьбы скорость проскальзывания витков инструмента относительно заготовки значительно выше, чем при накатывании цилиндрической резьбы. Это вызвано разницей диаметров инструмента и заготовки и, следовательно, касательных скоростей их витков, по длине накатываемой резьбы в связи с её конической формой. Полюс зацепления при этом находится посередине ролика, т.е. равноудален от его торцов.

На сегодняшний день самым распространенным способом накатывания наружной конической резьбы является накатывание двумя или тремя одинаковыми коническими роликами, с углом конуса φ равным углу конуса накатываемой резьбы, с параллельными осями роликов и заготовки (рисунки 1). Ширина роликов при этом равна длине накатываемой резьбы. Ролики получают главное вращательное движение и радиальное движение подачи. Заготовка получает вращение от роликов за счет сил трения. Торцы ролика меньшего диаметра при этом формируют участок резьбы наибольшего диаметра и наоборот.

Обозначим длину ролика как B , тогда полюс зацепления будет находиться на расстоянии $\frac{B}{2}$ от его торца. Радиус ролика в среднем сечении:

$$R_{rcp} = R_{r\min} + \frac{B}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

где $R_{r\min}$ – радиус меньшего торца ролика, мм;
 φ – угол конуса резьбы, рад.

Тогда частота вращения ролика находится:

$$n_r = \frac{V_0 \cdot 60 \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot R_{rcp}}, \quad (2)$$

где V_0 – скорость накатывания, м/с.

Касательная скорость большего торца ролика:

$$V_r = \frac{R_{r\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_r}{60 \cdot 1000}, \quad (3)$$

где $R_{r\max}$ – радиус большего торца ролика, мм.

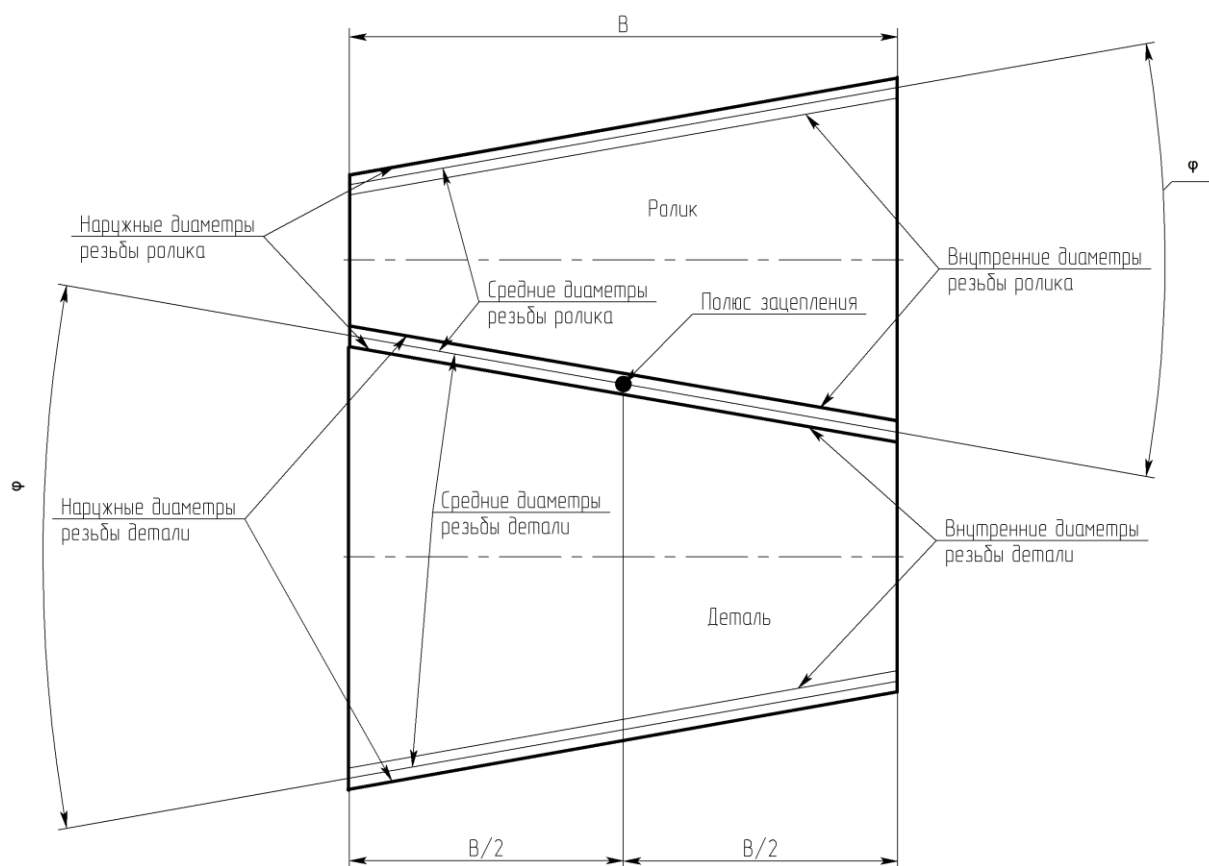


Рисунок 1 – Схема накатывания конической резьбы коническими роликами с параллельными осями инструмента и заготовки

Аналогичные вычисления производятся и для детали:

$$R_{dcp} = R_{d\min} + \frac{B}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

где $R_{d\min}$ – радиус меньшего торца детали, мм;

$$n_d = \frac{V_0 \cdot 60 \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot R_{dcp}}. \quad (5)$$

Касательная скорость меньшего торца детали:

$$V_d = \frac{R_{d \min} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_d}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

Скорость проскальзывания ролика относительно заготовки при накатывании конической резьбы с параллельными осями роликов и заготовки будет находиться как разность касательных скоростей ролика на большем торце и заготовки соответственно на меньшем торце:

$$V_{pr} = V_r - V_d, \quad (7)$$

если подставить в (7) вместо V_r и V_d зависимости (1-6), получим:

$$V_{pr} = \frac{R_{d \min} \cdot V_0}{R_{d \min} + \frac{1}{2} B \cdot \tan\left(\frac{1}{2} \varphi\right)} - \frac{R_{r \max} \cdot V_0}{R_{r \min} + \frac{1}{2} B \cdot \tan\left(\frac{1}{2} \varphi\right)} \quad (8)$$

На рисунке 2 показан график изменения скорости проскальзывания в зависимости от угла конуса φ (рад) и радиуса ролика r (мм).

После приравнивания правой части выражения (8) к нулю (т.е. случай, когда проскальзывание отсутствует) и преобразований получим:

$$R_{d \min} = R_{r \max}. \quad (9)$$

Таким образом, разность касательных скоростей возникает вследствие непропорциональности диаметров ролика диаметрам формируемых ими участков резьбы заготовки на всех участках накатываемой конической резьбы, кроме среднего осевого сечения.

Для повышения стойкости резьбонакатных роликов при накатывании конических резьб необходимо уменьшить их проскальзывание относительно заготовки. Снижение проскальзывания при накатывании конических резьб традиционным способом с параллельными осями роликов и заготовки, например, путем увеличения диаметра инструмента [1], ограничивается возможностями резьбонакатного оборудования.

Данная проблема решается с помощью предлагаемого способа накатывания наружных конических резьб [2]. Равенство касательных скоростей витков роликов и заготовки достигается путем применения прогрессивной схемы накатывания со скрещивающимися осями роликов и заготовки, как показано на рисунке 3. Накатывание резьбы производится двумя, тремя или шестью одинаковыми коническими роликами 1. Ролики 1 получают главное вращательное движение n_p и радиальное движение подачи s_p . Заготовка 2 получает вращение от роликов 1 за счет сил трения.

Средний диаметр резьбы ролика 1 в центральном осевом сечении, находящемся на расстоянии $B/2$ от торцов, определяется по формуле

$$D_{2p} = \frac{k_p}{k_3} d_2, \quad (10)$$

где d_2 – средний диаметр резьбы заготовки в центральном осевом сечении, мм;

k_p и k_3 – количество заходов резьбы ролика и заготовки соответственно.

Количество заходов резьбы на ролике определяется из конструктивных соображений, в частности исходя из характеристик используемого резьбонакатного станка.

Угол конуса роликов выбирается таким образом, чтобы обеспечить пропорциональность диаметров роликов диаметрам формируемых ими участков резьбы заготовки, и рассчитывается по формуле:

$$\varphi_p = \arcsin\left(\frac{k_p}{k_d} \sin \varphi\right). \quad (11)$$

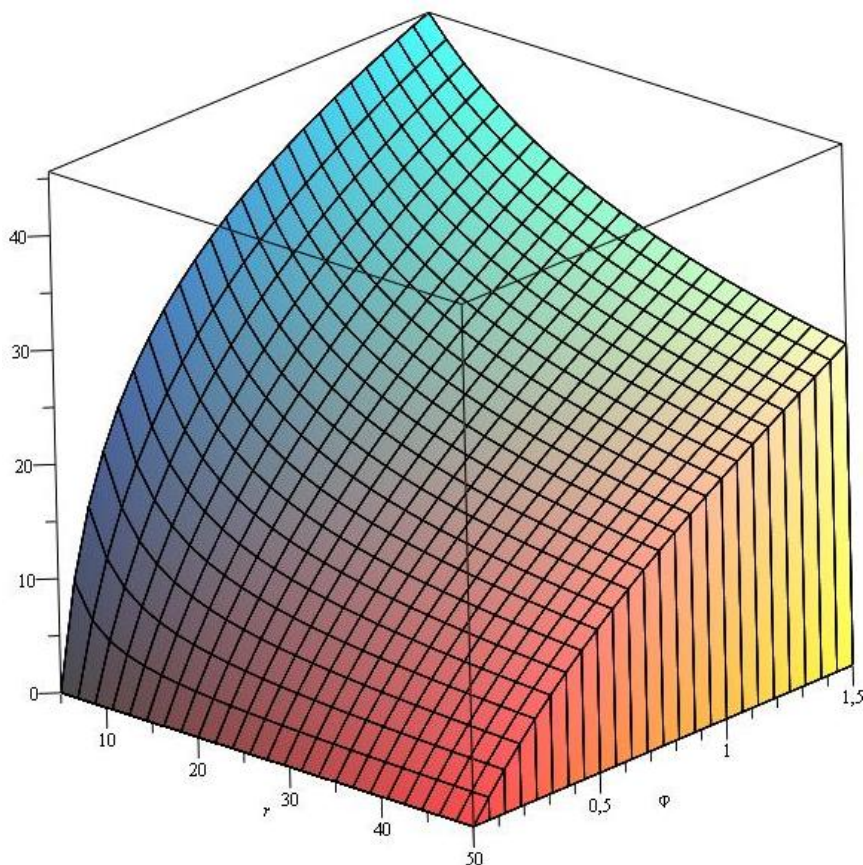


Рисунок 2 – Скорость взаимного проскальзывания (по вертикальной оси) ролика и заготовки (м/мин) в зависимости от угла конуса φ (рад) и радиуса ролика r (мм)

Ширина роликов определяется по формуле

$$B_p = B \frac{\cos \varphi_p}{\cos \varphi} \quad (12)$$

Ролики при накатывании устанавливаются таким образом, что их торцы с наибольшим диаметром накатывают наибольший диаметр резьбы на заготовке, а наименьшие соответственно – наименьший диаметр резьбы на заготовке. При этом оси вращения роликов перекрещиваются в радиальном сечении с осью заготовки под углом $\varphi + \varphi_p$.

Поскольку за счет сил трения ролики сообщают заготовке вращение, со скоростью, пропорциональной отношению диаметров роликов и заготовки:

$$n_o = \frac{k_p}{k_o} n_p, \quad (13)$$

касательные скорости витков роликов и накатываемых ими участков резьбы заготовки будут равны. В частности для торца ролика с большим диаметром будет выполняться равенство:

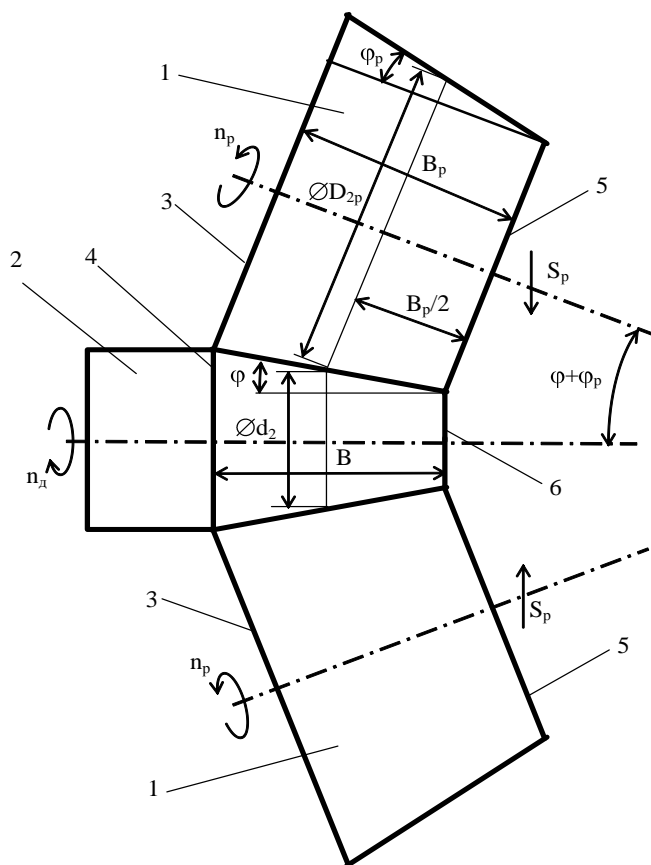


Рисунок 3 – Схема накатывания конической резьбы коническими роликами со скрещивающимися осями инструмента и заготовки

$$v_p = v_d = 2\pi n_p \left(\frac{k_p}{k_d} d_2 + B \sin \varphi_p \right) = 2\pi n_p \frac{k_p}{k_d} d_2 + B \sin \varphi_p \quad (14)$$

Предлагаемый способ позволит избежать проскальзывания витков ролика относительно заготовки и, тем самым, повысить стойкость резбонакатного инструмента. Способ может быть реализован на двух- и трехроликовых резбонакатных станках, имеющих возможность поворота шпинделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Расчет скорости проскальзывания инструмента относительно заготовки при накатывании наружных конических резьб / А.В. Киричек, А.Н. Афонин, Д.А. Должиков // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы: материалы междунар. научно-техн. конф. «Инструментальные системы машиностроительных производств». – Тула: ТулГУ, 2008. – С. 147-149.
2. Патент РФ №2371273(09) Способ накатывания наружных конических резьб / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афанасьев Б.И., Афонин А.Н., Должиков Д.А.
3. Писаревский, М. И. Новый инструмент для накатывания резьб и шлицев / М.И. Писаревский. Л.: Машиностроение, 1966. – 150 с.

Киричек Андрей Викторович

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл
 Доктор технических наук, профессор
 Тел.(4862)55-55-24
 E-mail: avk@ostu.ru, ti@ostu.ru

Афонин Андрей Николаевич

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл
 Кандидат технических наук, доцент
 Тел.(4862)55-55-24
 E-mail: af@au.ru

Должиков Дмитрий Александрович

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл
 Аспирант
 Тел.(4862)55-55-24
 E-mail: n0rdling@yandex.ru

УДК 621.9.047

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, В.П. БЕЛОКУРОВ, Г.Н. КЛИМОВА

ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе рассмотрены особенности комбинированной размерной обработки различных материалов, не обладающих магнитными свойствами. Исследования проведены на базе способов, защищенных патентами России.

Ключевые слова: немагнитные материалы, закрепление заготовок, очистка абразивной ленты.

The article covers distinctive features of combined dimensional machining of different nonmagnetic materials. The researches are based on Russian patented methods.

Key words: not magnetic materials, fastening of preparations, clearing of an abrasive tape.

Одним из прогрессивных направлений в технологии машиностроения является комбинированная обработка с одновременным использованием нескольких видов воздействий: механического (постоянного и импульсного), теплового, магнитного, химического, ядерного. Использование комбинированных методов для обработки большинства ферромагнитных сплавов достаточно хорошо освоено. В работах [1], [2], [3] детально рассмотрены возможности этих методов, их проектирование, реализация.

При использовании комбинированных видов формообразования с наложением электрических полей следует учитывать проводимость материалов, ферромагнитные характеристики, возможности создания инструмента для их обработки, особенности построения технологических процессов.

На рисунке 1 приведены немагнитные металлические и диэлектрические материалы, используемые в технике.

Немагнитные сплавы и металлокерамики успешно обрабатываются механическими и электрическими методами, где их технологические показатели одинаковы. Среди немагнитных сплавов вызывает трудности обработка вязких чёрных и цветных сплавов, которые на чистовых операциях способствуют «засаливанию» абразивного инструмента и потере их режущих свойств. Это приводит к увеличению сил резания, снижению точности обработки (особенно ажурных деталей), прижогам и другим нарушениям качества поверхностного слоя.

Результаты исследований, приведённые в [3], показывают, что немагнитные вязкие сплавы (жаропрочные, цветные) можно успешно обрабатывать, если применять абразивный инструмент на металлической основе, позволяющий удалять наволакиваемый в процессе шлифования слой за счет анодного растворения наносимого на инструмент металла. Обработка может выполняться в среде токопроводящих СОЖ при обратной полярности.

В [4] показана реализация способа обработки вязких металлических и различных немагнитных материалов, приведённых на рисунке 1, часть которых ранее обрабатывались только металлическим инструментом, имеющим ограниченные возможности по достижению высоких показателей поверхностного слоя, особенно неоднородных материалов. В способе [4] используется абразивная лента на металлической основе, которая очищается в процессе чистовой обработки металлическими электродами – щетками. Схема очистки приведена на рисунке 2.

Предложенный способ позволяет повысить качество очистки абразивных лент на металлической основе.

В рассматриваемом случае щетка выполнена в виде двух изолированных друг от друга секций, а на границах последних перпендикулярно направлению движения ленты установлена форсунка.

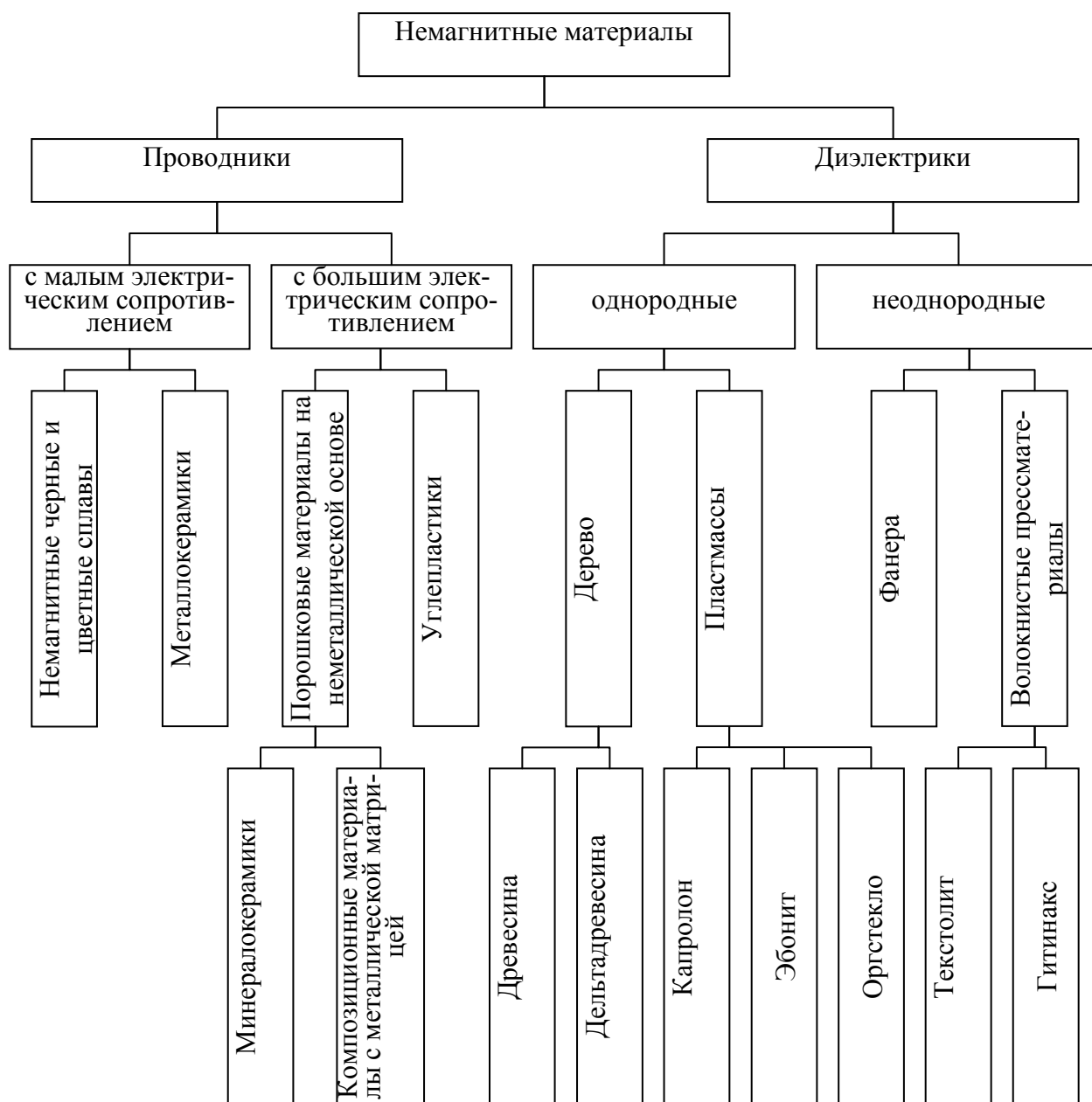


Рисунок 1 – Немагнитные материалы

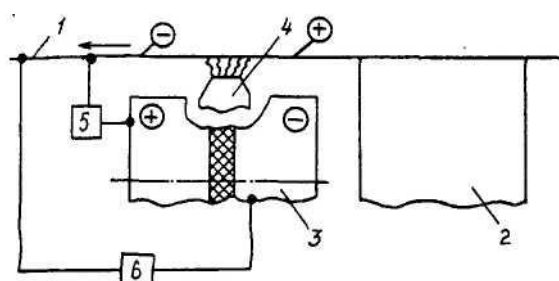


Рисунок 2 – Схема очистки абразивной ленты

1 – металлическая основа абразивной ленты; 2 – обрабатываемая деталь;
3 – секция металлической щетки; 4 – форсунка для подачи паров воды;
5, 6 – источники тока. Стрелкой показано направление движения ленты

Для реализации способа предлагается (рисунок 2) устройство, состоящее из двух источников тока 5 и 6, металлической щетки 3, расположенной со стороны абразива на выходе из зоны обработки, включающей две изолированные друг от друга секции, заготовку 2, абразивную ленту на металлической основе 1. Каждая секция металлической щетки подключена к своему источнику тока с различной полярностью.

На выходе из зоны обработки на абразивную ленту на металлической основе и одну из секций металлической щетки подают импульсы тока от одного источника тока по прямой полярности (лента – анод, секция щетки – катод) до удаления стружки, в паузы между импульсами первого источника подают импульсы тока от второго источника, но с обратной полярностью.

Величина подаваемого напряжения определяется по формуле:

$$U = ES,$$

где E – напряженность поля;

S – межэлектродный зазор.

Это достигается тем, что на ленту 1 и металлическую щетку 3 подают от источников 5 и 6 импульсы тока прямой полярности до удаления стружки, а в паузах между импульсами тока меняют полярность, после чего на поверхность абразивной ленты через форсунку 4 направляют пары воды и процесс выдерживают до выступания абразивных зерен не более чем на 1/3 их размера.

Наибольший эффект дает очистка лент при обработке материалов с низкой проводимостью (минералокерамики, композиционные изделия) и диэлектриков на базе дерева и пластмасс, где при отсутствии очистки требуется большой расход инструмента и использование крупного абразивного зерна, затрудняющего получение поверхности высокой чистоты.

Металлические изделия (рисунок 1) могут обрабатываться с наложением электрического поля, что особенно эффективно для металлокерамических литых и прессованных материалов, обладающих высокой твердостью, соизмеримой по этому показателю с алмазным инструментом. При обработке порошковых материалов на металлической основе и углепластиков удается интенсифицировать процесс резания за счет электроэрозионного, электрохимического или высокочастотного колебательного воздействия. Здесь следует учитывать, что проводимость таких материалов бывает различной в зависимости от направления силы прессования, поэтому металлические нити могут разрушаться только при подводе тока вдоль действия силы, что ограничивает возможности процесса. Комбинированная обработка углепластиков с металлической или иной токопроводящей арматурой может найти применение при ремонте поврежденных деталей авиационной и космической техники (обшивки, обтекатели и др.).

На чистовых операциях обработки сплавов широко используются магнитные столы оборудования. Они могут применяться и для крепления заготовок при чистовой обработке немагнитных материалов с использованием импульсного тока. Однако для диэлектриков (рисунок 1), как правило, используют один из видов механического обеспечения положения заготовки, который имеет серьезные ограничения в случае обработки изделий малой жесткости (тонкие листы, ажурные конструкции). Для этой цели часто используют вакуумные столы, вмораживание объекта обработки в жидкую среду. Такие методы весьма трудоемки и дороги, они не обеспечивают хорошего базирования деталей и получения высокой точности деталей. В последние годы появились новые способы [5] крепления заготовок при чистовой обработке немагнитных материалов, где фиксация объекта достигается реологической средой с использованием магнитных столов имеющегося оборудования. Для этого деталь удерживают на магнитном столе между соседними разноименными магнитными полюсами, а реологическую ферромагнитную жидкость подают на поверхность магнитного стола в месте крепления детали сплошным слоем до покрытия детали. Одновременно осуществляют перемещение детали на столе и регулирование магнитного поля через магнитные полюса до появления сил торможения перемещению детали и определения места наибольшего сопротив-

ления её перемещению. Здесь производят фиксацию детали, после чего создают наибольшую силу магнитного поля для её закрепления.

При реализации способа используется стол с магнитными полюсами на его рабочей поверхности, который выполнен с соседними разноименными магнитными полюсами, размещёнными в направлении силы резания с шагом не менее размера опорной поверхности обрабатываемой детали, и с расположенными на его периферии в осевом сечении разноименными магнитными полюсами для удержания в пределах магнитного стола подаваемой на его поверхность реологической ферромагнитной жидкости.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что большинство современных немагнитных материалов может успешно обрабатываться путем комбинации в одном технологическом процессе различных воздействий, в том числе путем наложения электрического поля.

2. Для реализации технологических процессов обработки немагнитных материалов предложены новые способы закрепления заготовок с использованием реологических жидкостей, обладающих свойствами резкого изменения вязкости в магнитных полях, что создает силы, достаточные для крепления изделий при обработке. После снятия магнитных полей деталь освобождается, а жидкость очищается от продуктов обработки и может повторно использоваться. Достоинством такого метода является возможность надежного базирования и закрепления заготовок из любых материалов на имеющихся в промышленности магнитных столах металлорежущего оборудования.

3. Предложены новые способы очистки абразивных лент путем использования анодного растворения металлических осадков с механическим удалением продуктов обработки. Это позволяет осуществлять изготовление высокоточных деталей из вязких металлов и диэлектриков (пластмасс, материалов на базе дерева и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение. Энциклопедия. Том 3 -3/ Под ред. А. Г. Суслова // М: Машиностроение, 2000 – 840 с.
2. Григорьев, С.Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С.Н. Григорьев, Е.В. Смоленцев, М.А. Волосова // Старый Оскол: ТНТ, 2009 – 280 с
3. Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М: Машиностроение, 2005 – 511 с.
4. Патент 2261164, РФ. Способ очистки абразивной ленты на металлической основе и устройство для его реализации / Авт.: В. П. Смоленцев, Г. П. Смоленцев, Г. Н. Климова // Бюл. № 27, 2005
5. Патент 2312000, РФ. Способ крепления деталей из немагнитных материалов и устройство для его осуществления / Авт.: А. С. Ревин, А. В. Лисицын, В. П. Смоленцев // Бюл. №34, 2007

Смоленцев Владислав Павлович

Доктор технических наук, профессор
Воронежский государственный технический университет
Тел. 89036559970
E-mail: smol@comch.ru

Белокуров Владимир Петрович

Доктор технических наук, профессор
Заведующий кафедрой
Воронежская государственная лесотехническая академия

Климова Галина Николаевна

Кандидат технических наук, доцент
Воронежская государственная лесотехническая академия

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 687.016.5:677.55

Г.Д. ГУЩИНА, А.А. ОСОКИНА, Е.Л. МОСЬКИНА

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОДЕЖДЫ ИЗ ТКАНЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛАСТАНОВЫЕ НИТИ «ЛАЙКРА»

Проведен анализ проектирования изделий из трикотажного полотна с целью выявления особенностей проектирования изделий из тканей, содержащих эластановые нити «Лайкра».

Ключевые слова: ткань, трикотажное изделие, одежда, растяжимость, деформация.

The analysis of designing of products from a knitted cloth for the purpose of revealing of features of designing of products from the fabrics containing threads "Lycra" is carried out.

Key words: cloth, knitted garments, clothes, expansibility, deformation.

Основное свойство ткани с эластановой нитью, влияющее на конструкцию изделия, – растяжимость, т. е. способность полотна под действием нагрузок деформироваться, а после их снятия частично или полностью восстанавливаться. Таким же основным это свойство является и для трикотажных полотен, поэтому для работы с тканями, содержащими эластановую нить целесообразно использовать накопленную информацию по трикотажу. Для определения степени растяжимости трикотажных полотен проводят специальные испытания согласно ГОСТ 8847-85 «Полотна трикотажные. Методы определения разрывных характеристик и растяжимости при нагрузках, меньше разрывной». Образец трикотажного полотна определенных размеров заправляют в разрывную машину и прикладывают постоянную динамическую нагрузку. Растяжимость определяют в процентах к первоначальным размерам. Таким же приемом воспользовались и для определения степени растяжимости эластичных тканей.

Растяжимость трикотажных полотен учитывают в настоящее время в основном при определении прибавки на свободу к ширине изделия. Так, ГОСТ 7474-75 «Изделия трикотажные верхние для женщин и девочек. Общие технические условия» для полотен различных групп растяжимости рекомендует принимать следующие минимальные значения прибавок:

- 1) для полотен 1 группы растяжимости +2...+4 см;
- 2) для полотен 2 группы – 0...+2 см;
- 3) для полотен 3 группы – возможно сужение по ширине изделия до 2 см

Однако такие рекомендации являются слишком общими и не позволяют в полной мере использовать свойства трикотажа, а так же тканей с эластановой нитью для создания формоустойчивой одежды высокого качества.

Более обоснованным при расчете ширины трикотажных изделий является использование коэффициентов сужения и относительного удлинения. Коэффициент сужения показывает, насколько необходимо заузить конструкцию деталей изделия по ширине, чтобы оно в готовом виде обеспечило требуемые размеры и форму. Зная коэффициент сужения, можно рассчитать ширину трикотажных изделий по линиям груди, талии и бедер. Заужая изделие по ширине, необходимо помнить о том, что растягиваясь по ширине, полотна, как правило, сокращаются по длине. Для сохранения продольных размеров трикотажные изделия проектируют с учетом коэффициента относительного удлинения, соответствующего заданному значению отрицательной прибавки. Для изделий из эластичных тканей коэффициентом относительного удлинения можно пренебречь, так как сокращение по длине очень малы или их вообще не наблюдается.

Растяжимость трикотажа представляет собой полную деформацию, которая состоит из исчезающей доли – условно-упругой деформации (усадки) и неисчезающей части – условно-остаточной. Эти виды деформации растяжения возникают в процессе изготовления и эксплуатации изделий. Их также немаловажно учитывать при проектировании трикотажных изделий.

Под усадкой трикотажа понимают величину относительного изменения его длины или ширины после проведения определенной операции (раскроя, шитья) или по истечении какого-либо отрезка времени.

Возникает усадка в результате неравновесного состояния трикотажа, объясняемого его специфической петельной структурой. Вследствие этого возникает сокращение размеров деталей изделия, что учитывают при разработке лекал, увеличивая их размеры на величину этих деформаций. Ткани с эластановой нитью имеют равновесное состояние и величина относительного изменения длины или ширины после раскроя или шитья стремится к нулю, как следствие, лекала не увеличивают на величину деформаций. А вот способность ткани с эластановой нитью накапливать условно-остаточные деформации остается такой же, как в случае с трикотажем.

При многократном растяжении эластичного материала происходит постоянное изменение его структуры, что приводит к возникновению исчезающих со временем или исчезающих через продолжительный отрезок времени деформаций, называемых условно-остаточными. Учитывать в конструкции изделия условно-остаточную деформацию можно двумя способами: уменьшая проектируемые размеры изделия по ширине на величину условно-остаточной деформации полотна (тогда в процессе эксплуатации изделие примет проектируемые размеры) и проектируя величину прибавки на свободу в зависимости от условно-остаточной деформации полотна (тогда для полотен, обладающих большими условно-остаточными деформациями, нужно предусмотреть большие прибавки с тем, чтобы в процессе эксплуатации уменьшить деформацию деталей изделия). Второй способ учета условно-остаточной деформации не всегда приемлем, так как для уменьшения полной деформации растяжения деталей изделия в процессе эксплуатации до 15-20 % (при этой величине полной деформации условно-остаточные деформации минимальные) потребовалось бы увеличение изделия по ширине на 4-6 см. При проектировании плотно облегающих изделий такое расширение не позволит обеспечить требуемую силуэтную форму. Поэтому для конструирования изделий из эластичных полотен используют в основном способ заужения проектируемой ширины на величину условно-остаточной деформации. Этот вид деформации учитывают при разработке лекал, уменьшая их ширину на величину этих деформаций.

Величины коэффициента условно-остаточной деформации устанавливают экспериментально в зависимости от вида полотна. Для некоторых видов трикотажных полотен коэффициент условно-остаточной деформации приведен в справочной технической литературе, а для тканей с эластановой нитью таких данных практически нет, поэтому здесь есть ресурс для работы.

В настоящее время для проектирования трикотажных изделий, так же, как и для одежды из ткани, существует две группы методов конструирования: приближенные и более точные (инженерные). Приближенные методы конструирования одежды из трикотажа вследствие простоты и доступности расчетных формул, а также графических приемов построения получили широкое практическое использование в промышленности и производстве трикотажных изделий по индивидуальным заказам.

Существующие приближенные методы конструирования трикотажных изделий основываются на принципах конструирования одежды из тканей. В качестве исходных данных, так же как и для изделий из тканей, используются размерные признаки типовых фигур и прибавки. Подобно изделиям из тканей для создания объемной формы изделий из трикотажа применяют те же способы формообразования: выточки в области груди, посадку по плечевому срезу спинки. Особенности проектирования изделий из трикотажных полотен прибли-

женными методами проявляются в основном при выборе величин прибавок, которые тесно взаимосвязаны со свойствами трикотажа.

Исходная информация для проектирования трикотажных изделий приближенными методами содержит:

- антропометрические данные о размерах и форме поверхности тела человека;
- характеристики свойств полотна;
- конструктивные прибавки, характеризующие силуэтную форму изделия.

При разработке конструкции одежды из эластичного материала очень важно размеры и форму будущего изделия увязывать со свойствами этих тканей.

Способность эластичного полотна к формообразованию практически не используется при конструировании изделий приближенными методами. В настоящее время трикотажные изделия в большинстве своем повторяют конструкцию и форму одежды из тканей без учета особенностей структуры и эластичности материала, в частности, его формовочной способности. Например, в базовых конструкциях трикотажных изделий используются выточка в области груди и посадка по плечевому срезу спинки. Исправить это положение позволила бы методика, базирующаяся на информации об антропометрических измерениях типовых фигур, на основных формообразующих средствах: это - степень заужения и степень прогиба боковых срезов, установленных на основе формовочных свойств полотна.

Однако проведенные исследования не охватывают всего многообразия ассортимента изделий из эластичных тканей и видов полотен. Поэтому в дальнейшем необходимо совершенствовать конструкцию одежды из тканей с лайкрой с учетом ее формовочной способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества: справочник. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312с.
2. Конструирование одежды из различных материалов. Автор: Слесарчук И.А., редактор: Александрова Л.И.
3. ГОСТ 8847 – 85. «Полотна трикотажные. Методы определения разрывных характеристик и растяжимости при нагрузках, меньше разрывной». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1972.
4. ГОСТ 7474 – 75. «Изделия трикотажные верхние для женщин и девочек. Общие технические условия». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1983.

Гущина Галина Дмитриевна

Орловский государственный технический университет, г.Орел
Старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Осокина Алла Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Моськина Елена Леонидовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Е.В. ПРОКОПОВА, А.А. ПАВЛОВСКАЯ, Т.В. КВАСКОВА

ЭСТЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЦОДЕЖДЫ – КАК ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ

Разработана модель специальной одежды для тепличниц с улучшенными эстетическими и защитными свойствами. Предложено рациональное композиционное решение за счет дополнительных сетчатых вставок и накладок. Декоративное разнообразие достигнуто за счет разности фактур основной ткани и вспомогательных материалов, нюансного соотношения цветов.

Ключевые слова: ткань, композиционное решение, цвет, спецодежда, тепличница, халат, технология.

The model of overalls for the greenhouse women-workers with the improved aesthetic and protective properties is developed. The rational composite decision due to additional mesh inserts and overlays is offered. A decorative variety is achieved due to the difference of textures of the basic fabric and auxiliary materials, nuance correlation of colours.

Keywords: Fabric, the composite decision, colour, overalls, greenhouse women-worker, a dressing gown, technology.

Традиционно считается, что специальная одежда должна быть функциональной, то есть удобной, не стесняющей движений, но и не слишком свободной, обеспечивающей безопасные условия труда, прочной, ноской, немаркой, гигиеничной – словом, максимально приспособленной к выполнению тех или иных производственных процессов и операций, наилучшим образом отвечающей требованиям охраны труда и техники безопасности и на этом перечисление ее качеств, как правило, заканчивается. В течение достаточно продолжительного времени спецодежда не рассматривалась с точки зрения художественно-композиционного решения. Модные тенденции обходили стороной эту отрасль легкой промышленности. В наше время появилось множество видов спецодежды, и отношение к ней изменилось как со стороны дизайнеров, так и со стороны руководителей фирм и предприятий, которые увидели в ней возможность выделиться на рынке.

Тем не менее, более детальный анализ модельного ряда специальной одежды широкого назначения показывает, что предлагаемый ассортимент по видам достаточно узок и представлен костюмами (куртка, брюки), комбинезонами, полукombинезонами, халатами. При этом велика конструктивная однородность изделий: полуприлегающий или прямой силуэт, как правило, втачные рукава, обязательное наличие карманов. Конструктивные различия касаются, в основном формы воротников, мест расположения накладок, решением и обработкой низа рукавов, брюк, изделия в целом. Традиционные конструкторско-технологические решения, направленные на повышение эксплуатационных, гигиенических и защитных свойств: накладки в местах наиболее интенсивного износа и загрязнений, воздухопроводы в области торса и подмышечных впадин, при этом элементы выполнены из основных материалов в виде простых геометрических форм.

Одним из направлений расширения модельного ряда конкретного вида изделия может стать адресное художественное проектирование специальной одежды, базирующееся на знании условий труда для конкретной профессии, а также использования нетрадиционных для специальной одежды конструкторско-технологических приемов.

При реализации такого подхода нами разработана модель специальной одежды общего назначения для тепличниц (рисунок 1). Это халат женский полуприлегающего силуэта из хлопчатобумажной ткани имеющий следующие конструктивные признаки:

- полочка с кокеткой и сетчатыми вставками, накладными карманами, закрытыми сетчатыми накладками и клапанами, застегивающимися на одну обметанную петлю и одну пуговицу;
- спинка с кокеткой и сетчатой вставкой, по талии пояс, застегивающийся на три обметанные петли и одну пуговицу;

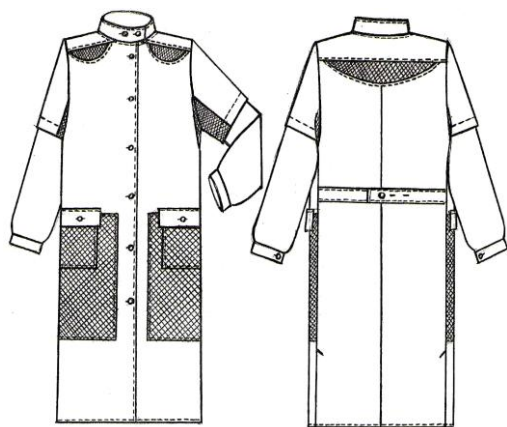


Рисунок 1 – Внешний вид халата для работ в теплицах

- рукав втачной одношовный с притачной манжетой, застегивающейся на одну обметанную петлю и одну пуговицу: в области локтя рукав пристегивается на механическую застежку «молния», подмышечная впадина обработана сетчатой вставкой;
- воротник-стойку с острыми концами, застегивающийся на две обметанные петли и две пуговицы;
- боковые швы, заканчивающиеся шлицами;
- застежку центральную на шесть обметанных петель и шесть пуговиц.

По воротнику, кокеткам, клапанам, поясу проложена отделочная строчка на расстоянии 0,5 см, по рукаву в области локтя на расстоянии 3 см от края.

Новизна модели сводится к следующему: в изделии использованы хлопчатобумажные ткани, имеющие достаточные гигроскопические свойства и по определению, обеспечивающие отвод потоотделений из пододежного пространства. В местах постоянного и периодического контакта материалов с кожными покровами (область плечевого пояса) предложено использование новых тканей, имеющих за счет высокого качества волокна, специфической структуры пряжи высокие капиллярные свойства (эффект «промокания»). В качестве основной ткани изделия использована ткань более высокой поверхностной плотности (260г/м^2) заполнения механической прочности.

Элементом новизны изделия является полиамидная сетка, которая использована в конструкции для усиления воздухообмена пододежного пространства и снижения эффекта пигментной и общепроизводственной загрязненности. Элементы выполнены в виде вставок расположенных в области кокетки полочки и спинки, подмышечной впадины и накладок в области бедер по полочке, которые закрывают карманы (рисунок 1). Вставки, расположенные в области кокеток имеют конфигурацию, состоящую из прямых и дугообразных линий, данная форма функционально оправдана и эстетично вписывается в композиционное решение модели халата. Сетка, расположенная в области подмышечных впадин в основном несет гигиеническую функцию. Размер накладок в области бедер по полочке, рассчитывался относительно расположения карманов, а так же с учетом зон наибольшего загрязнения. Данные зоны расположены на 10-15 см ниже линии талии и выше уровня колен на 10 см. Форма накладок прямоугольная, дублирует форму карманов и краевую форму полочек. Разность фактур основной ткани и полиамидной сетки декоративно разнообразит поверхность формы халата, делая его более эстетически привлекательным для потребителя. Тем более что спецодежда в наше время - это существенная часть любого бренда.

Использование нескольких видов материалов дает возможность для увеличения комбинаторных вариантов цветового решения модели. Следует отметить, что большое значение в повышении эстетической значимости спецодежды как объекта производственной сферы имеет художественно-композиционная роль цвета. В цветовом решении спецодежды следует находить «золотую середину» между соблюдением фирменного стиля и эксплуатационными характеристиками изделий. Желательно избегать контрастных сочетаний цветов, очень часто приводящих к миграции красителя. Например, сочетание на изделии элементов белого и ярко красного цвета приведет к миграции красителя при промышленной стирке, и внешний вид изделия будет испорчен. В настоящее время наблюдается тенденция к расширению цветовой гаммы материалов для спецодежды. Широкая палитра цветов и оттенков тканей дает потребителю ряд ценных преимуществ. Выбор свежих нетрадиционных цветов позволяет подчеркнуть свою индивидуальность. Кроме того, используя различные цвета, можно решить задачу оформления корпоративного стиля и идентификации сотрудников по подразделениям. Сырье и красители ткани абсолютно безвредны при непосредственном контакте с кожей человека. Для колористического решения халата тепличниц мы используем синюю цветовую гамму. Данное цветовое решение предотвратит преждевременное загрязнение изделия. Так-

же следует отметить, что синий цвет и его спектральные оттенки - дают ощущение воздуха, простора, пролады, покоя, т.е. создают психологический комфорт и при использовании этого цвета наблюдается наиболее высокая производительность труда. Цвет основного материала и сетки находятся в нюансном отношении, цвет сетки насыщенней, темнее цвета основного материала.

Наряду с общетиповой технологией изготовления изделия были разработаны оригинальные технологические сборочные схемы отдельных узлов. На рисунке 2 приведена сборочная схема накладного кармана, в котором с целью уменьшения загрязнения в области бедер использована полиэфирная сетка.

Предложена следующая обработка кармана: обметывают верхний срез кармана, заутюживают вход в карман и застрачивают углы кармана. На лицевую сторону кармана по верхнему срезу укладывают сетчатую деталь, при этом деталь из сетки поднята вверх и настрочивается строчкой 1 сетки на карман, а затем карман по трем сторонам настрочивается на полочку халата строчкой 2 на расстоянии 10 мм от строчки настрочивания кармана. Вход в карман закрывают клапаном, обработанным по правилам технологии (строчки 3, 4).

Таким образом, предложенные решения расширяют модельный ряд изделий, в тоже время возрастают их эстетические, гигиенические, эксплуатационные свойства. При этом для изготовления одежды не требуется специального оборудования, что предполагает возможность изготовления одежды высокого качества в производственных условиях, без дополнительных материальных затрат и с последующей реализацией ее в тепличные хозяйства.

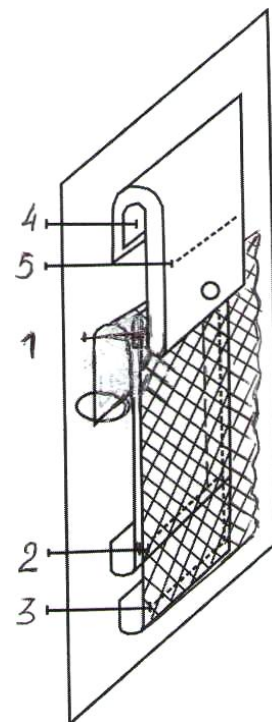


Рисунок 2 – Сборочная схема накладного кармана

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глубиш, П.А. Противозагрязняемая отделка текстильных материалов / П.А. Глубиш. – М.: Легкая индустрия, 1979. – 152с.
2. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества [Текст]: справочник. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312с.
3. Кубеко, А. Функциональные ткани в профессиональной одежде [Текст] / А. Кубеко // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. – 2004. - №1(24). – С. 10 – 11.
4. ГОСТ 18054 – 72. «Материалы текстильные. Методы оценки белизны». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1972. - 13 с.
5. ГОСТ 12.4 – 131 – 83 «Халаты женские. Технические условия». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1983. - 38 с. – (Система стандартов безопасности труда).

Проколова Елена Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Павловская Алевтина Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Кваскова Тамара Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 60.5 (0.7.5.8)

Л.А. КРАМСКАЯ, А.В. МОРОЗОВА

ФОРМИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНОЙ ПОЗИЦИИ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ СРЕДСТВАМИ ИСТОРИКО-ЛИТЕРАТУРНОГО КРАЕВЕДЕНИЯ

Рассматривается опыт реализации процесса профессиональной социализации студентов технического профиля и формирования элементов их социокультурной компетенции с применением средств историко-литературного краеведения

Ключевые слова: профессиональная социализация, социальная компетенция, литературное краеведение.

Experience of realization of process professional sociality students of a technical structure and formation of their elements social-cultural the competence with application of means of histori-co-literary study of local lore is considered

Key words: professional sociality, the social competence, literary study of local lore.

Взаимодействие окружающей среды, физических черт человека, индивидуального опыта и культуры создает уникальную личность. На индивидуальном уровне динамика социализационного процесса анализируется различными теориями личности например, Ч. Кули, Дж. Мид, З. Фрейд, Ж. Пиаже, Л. Колберг и др.)

Макроскопические теории рассматривают социализацию личности как интеграцию индивида в социальную систему, в микроскопических концепциях социализация определяется как процесс адаптации, взаимодействия личности или социальных групп с социальной средой, в ходе которого согласовываются требования и ожидания его участников (Г. Тард, Ф. Гиддингс и др.).

Действие механизмов социализации индивида связано как с деятельностью социальных институтов, так и с наличием специальных средств социального влияния и контроля (социальных норм, социальных санкций, принципов поведения, традиций, обычаев и других, регулирующих взаимодействие индивидов). В динамично развивающемся обществе социальная норма трансформируется, утрачивается, претерпевает изменения и «общественный идеал», что ведет либо к обновлению его как ориентира для всеобщего подражания, либо к размыванию такого образца; характер отклонений при этом приобретает массовые масштабы, становится нормой для поведения многих людей.

В условиях социального взаимодействия в рамках определенной социальной группы личность стремится идентифицировать себя с этой группой, при этом и социализирующие и социализируемые участвуют в данном процессе по принципу взаимного обмена [1].

В условиях модернизации системы профессионального образования и перехода на реализацию компетентностного подхода в формировании личности молодых специалистов особенно актуальным становится вопрос о социокультурном облике тех, кто со временем придет в сферу экономики и производства, насколько эти люди смогут ценить и бережно преумножать достижения своих предшественников и в какой степени для них будет самодостижательна история и успешность будущего их Родины.

В этой связи, по-нашему мнения, особенно важна успешность процесса профессиональной социализации молодых специалистов с позиций формирования не только их профессиональных, но и их социальных компетенций, основу которых составляет гражданская позиция молодых людей. Одним из путей формирования активной жизненной, социальной и

исторической позиции студентов факультета среднего профессионального образования является привлечение их к исследовательской работе на ранних этапах реализации процесса профессиональной социализации. Особенно сложен этап, когда студенты, с одной стороны, еще не имеют даже минимального уровня профессиональных знаний, а, с другой стороны, полны юношеской энергии и фантазии, которую очень важно не только направить в нужное русло (формирование первичных навыков исследовательской работы), но и максимально использовать уже имеющиеся знания и интересы студентов младших курсов. И в этом плане богатое поле деятельности может предоставить историко-литературное краеведение. Историко-литературное краеведение отличается специфическим отбором материала. Его изучение означает усвоение теории и истории литературы как искусства слова. В творчестве каждого писателя оставляет неизгладимый след край, где он родился и вырос или с которым он долгое время был связан. Не случайно Л. Н. Толстой признавал невозможным представить Россию без Ясной Поляны.

Работа по формированию активной жизненной позиции молодых специалистов в условиях образовательного заведения технического профиля средствами литературного краеведения может проводиться в различных формах внеаудиторной работы: литературные кружки, вечера, конференции, экскурсии по памятным местам, связанным с жизнью и творчеством писателей. И в этом плане, по-нашему мнению, интересен практический опыт работы преподавателей гуманитарных дисциплин факультета среднего профессионального образования Технологического института Орловского государственного технического университета.

Орловщина – литературный край. В городе, выросшем на берегах Оки и Орлика, родились И. С. Тургенев, Л. Н. Андреев, провел детские годы Н. С. Лесков, выпустил первую книгу, работая в «Орловском вестнике», И. А. Бунин, жила М. А. Вилинская, ставшая классиком украинской литературы, под псевдонимом Марко Вовчок. Сюда к генералу А. П. Ермолову, герою Отечественной войны 1812 года, приезжал А. С. Пушкин, предки которого, жили также и на Орловщине; их имение располагалось вблизи истока реки Ока. В Орле, напротив городского парка, сохранился дом, в котором родилась А. П. Керн, вдохновительница великого поэта («Я помню чудное мгновенье»), автор интереснейших воспоминаний о нем. Орел навещали В. А. Жуковский, Н. В. Гоголь, Д. В. Давыдов, Т. Г. Шевченко. «Началом новой славы» назвал Орел А. Т. Твардовский.

Кто сказал, что Орел – городишко?

Средоточие мира – Орел! –

Так восклицал уроженец мценского села Ильково Орловской области И. А. Новиков.

Литературное краеведение в этом смысле призвано, прежде всего, воспитать высокие патриотические чувства, вызвать у студентов живой интерес к жизни родного края, способность правильной оценки общественной роли книги.

На первых занятиях по литературе делается акцент на том, что с Орловским краем связана судьба таких русских писателей, как Марко Вовчок, И. С. Тургенев, Н. С. Лесков, Ф. И. Тютчев, А. А. Фет, Д. И. Писарев, Л. Андреев, И. А. Бунин и некоторых других. Не случайно во многих их произведениях нашли отражение жизнь, природа Орловского края, талантливо выписаны образы ярких представителей орловского народа. Студенты получают задание подготовить сообщения, доклады и рефераты по предложенным преподавателем темам, например, «По следам А. С. Пушкина в Орле», «Историко-литературные места Орловского края» и другие.

Ежегодно в Технологическом институте ОрелГТУ организуется «Литературная экспедиция», посвященная жизни и творчеству И.С. Тургенева. Студенты не только посещают родовое имение И. С. Тургенева и встречаются с местными жителями, но и проводят экскурсии – исследования в дом-музей И. С. Тургенева. «Литературная экспедиция» заканчивается защитой лучших учебно-исследовательских работ студентов.

Ценный историко-литературный материал собирается исследовательскими группами студентов и в ходе экскурсии в дом-музей Л. Андреева: в доме-музее помимо книг, фотогра-

фий экспонируются рукописи произведений, письма, отзывы современников на различные литературные произведения. После завершения экскурсии студенты организовали историко-литературную фото-выставку «Андреев и Орел».

Одним из ярких элементов краеведческой работы, формирующей активную жизненную и гражданскую позицию будущих техников, является научно-практическая конференция, в которой приняли участие студенты, занимающиеся исследовательской деятельностью в области краеведения. Так, в 2010 году её почетными гостями стали современные орловские поэты А. Фролов, В. Корнева, которые познакомили студентов со своими работами, посвященными Орловщине:

Места лесковские. Гостомля перелески.
Простор полей и тихий шум дубрав.
Как будто храмов обветшалых фрески,
Разбросаны селенья тут и там.
Здесь дух особый. Грезится немало.
И столько благодати для души.
Мелькнут глаза живые Селивана,
В толпе – улыбка кроткая Левши.
И всюду жизнь – ребячья вьется поросль.
Брожу в полях по золотой стерне...
Живу надеждой – не иссякла совесть
Лесковских странников по праведной земле.

(В.Корнева)

Студенты выступили с сообщениями о результатах своих исследований, проведенных в музеях и на выставках г. Орла и области и основанных на литературно-историческом материале, а также литературной типизации героев «старой» и «новой» России.

ВЫВОД

Литературное краеведение как средство формирования социальных компетенций молодых специалистов технического профиля позволяет привлекать на ранних стадиях реализации образовательного процесса студентов к учебно-исследовательской работе. Это создает условия для формирования у них первичных навыков научной работы в тех областях знаний, которые им понятны, доступны и интересны. Особенно актуальным является этот вопрос для студентов, обучающихся на специальностях технического профиля, которые в стенах учебного заведения должны получить не только совокупность знаний, умений и навыков в сфере своей будущей профессиональной деятельности, но также должны сформировать совокупность социально-психологических компетенций, которые им помогут успешно социализироваться в социально-профессиональной среде современного социума, характеризующегося высокой динамикой развития не только технической, но и социально-коммуникативной составляющей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Морозова, А.В. Управление процессом профессиональной социализации студентов ссузов в условиях модернизации институтов образования. Монография [Текст] / А.В. Морозова, Н.А. Фролова. – Орел: Издательство ОРАГС, 2005. – 200 с.

Крамская Любовь Анатольевна

Преподаватель ФСПО

Орловский государственный технический университет

Тел: (4862) 55-51-45

Морозова Анна Валентиновна

Кандидат социологических наук, доцент

Орловский государственный технический университет

Тел: (4862) 55-55-24, 54-15-19

E-mail: niotlostu@gmail.com

А.А. АЛИСОВ

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В СМК МНОГОУРОВНЕВОГО ПРОФИЛЬНОГО ВУЗА

В статье анализируется опыт внедрения системы комплексного тестового оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства.

Ключевые слова: оценка качества, профессиональное образование, специалист технического профиля, тестовые технологии, автоматизация технологических процессов, автоматизация проектирования.

In article experience of introduction of system complex test exhibiting of an estimation qualities of preparation of experts for mechanical engineering is analyzed in the field of automation of design-technological preparation of manufacture.

Key words: an estimation of quality, vocational training, the expert of a technical structure, test technologies, automation of technological processes, automation of designing.

Анализ результативности деятельности современного образовательного учреждения, организуемый в СМК вуза, предполагает наличие комплексной системы мониторинговых исследований, которая позволяет выявить как положительные стороны, так и недостатки при реализации и основных, и вспомогательных процессов. В условиях функционирования многоуровневой системы подготовки кадров такие аналитические комплексы приобретают также сложную многоуровневую структуру. Особенности функционирования профильного вуза также определяют специфику формирования такой системы.

Появление профильных вузов на российском образовательном пространстве стало своеобразным ответом региональной системы образования на возрастающие требования бизнес-сообщества к профессиональному образованию. Интегрированные образовательные системы имеют по сравнению с соответствующими автономными образовательными структурами более высокие социально-экономические характеристики. Так, например, Технологический институт Орловского государственного технического университета формировался как обособленное подразделение университета, обеспечивающее подготовку специалистов в интегрированной системе НПО – СПО – ВПО – аспирантура – докторантура. В состав Технологического института ОрелГТУ входит несколько структурных подразделений: факультет среднего профессионального образования, факультет легкой промышленности, факультет технологии и конструкторско-технологической информатики, а также ряд специализированных научно-исследовательских лабораторий, учебно-производственное и экспериментальное производства и НИИ «Технологии машиностроения». С учетом специфики структуры формируется и многоуровневый аналитический комплекс мониторинговых исследований в СМК такого вуза. Базовыми элементами такого комплекса являются: мониторинг результативности основных процессов; мониторинг результативности вспомогательных процессов; потребительский мониторинг.

В Технологическом институте ОрелГТУ многоуровневый аналитический комплекс мониторинговых исследований организуются Центром социологических исследования «Аналитик» НИИ «Технологии машиностроения», к участию в которых привлекаются студенты гуманитарного факультета, обучающиеся по специальности «Социология», и студенты факультета среднего профессионального образования, обучающиеся по специальности «Прикладная информатика». Исследования основываются на широком использовании современной методологии проведения статистических наблюдений: на этапе сбора информации – анкетирование; на этапе обработки данных – формирование базы данных в Excel; на этапе анализа данных – методы дескриптивной и аналитической статистики, а также экспертно-аналитические методы; статистический анализ полученных данных проводится с

применением прикладного программного обеспечения (SPSS 17.0; Expert Decide 2.0); на этапе визуализации аналитических результатов исследования – статистические графики и диаграммы, а также экспертно-аналитические иерархии с построением векторов приоритетов анализируемых показателей.

Так при организации мониторинговых исследований УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА широко используются современные тестовые технологии, реализуемые на факультетах ТИ ОрелГТУ с применением компьютерной техники. Особое место в этой работе занимает совместная деятельность кафедр и факультетов в рамках выполнения научно-методического проекта «Разработка и внедрение многоуровневой практикоориентированной системы оценивания качества подготовки специалистов для машиностроения», реализуемого по заявке Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие потенциала высшей школы (2009-2010 годы)». Компьютерное тестирование проводится не только по учебным дисциплинам гуманитарного, математического и общетехнического циклов, но и по специальным дисциплинам.

Разработанная в Технологическом институте ОрелГТУ многоуровневая практикоориентированная система оценивания кадров для машиностроения Технологического института ОрелГТУ предназначена:

- для оценивания теоретических и практических навыков специалистов начального звена для машиностроительного производства;
- для оценивания теоретических и практических навыков специалистов среднего звена для машиностроительного производства;
- для оценивания теоретических и практических навыков специалистов высшего звена для машиностроительного производства;
- для оценивания уровня подготовленности специалистов среднего звена в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства;
- для оценивания уровня подготовленности специалистов высшего звена в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства;
- для оценивания креативных качеств студентов, склонных к исследовательской и изобретательской деятельности.

Комплект тестовых заданий для оценивания качества подготовки специалистов в области конструкторско-технологической подготовки производства, разработанный коллективом сотрудников Технологического института ОрелГТУ, содержит четыре блока:

- «Создание чертежей деталей, сборочных единиц и изделий в машиностроении (T-FLEX CAD 2D)»;
- «Параметрическое проектирование объемных моделей деталей, сборочных единиц и изделий в машиностроении (T-FLEX CAD 3D)»;
- «Автоматизированное проектирование технологических процессов производства деталей, сборочных единиц и изделий в машиностроении (САПР ТП - ТехноПро)»;
- «Компьютерные технологии в науке, технике и образовании (КТ)».

Кроме того, процесс внедрения таких тестовых методик в образовательный процесс профильного вуза предполагает не только разработку и апробацию тестов, но и их последующую сертификацию в органах сертификации тестовых контрольных материалов.

В целом, внедрение аналитического комплекса мониторинговых исследований в СМК многоуровневого профильного вуза способствует повышению эффективности диагностики результатов учебной деятельности студентов, принимаемых управленческих решений и оптимизации усилий коллектива при решении наиболее актуальных проблем повышения качества и эффективности своей деятельности.

Алисов Артур Александрович

Руководитель УНЦ «Инженерные информационные технологии»

НИИ «Технологии машиностроения»

Орловский государственный технический университет

Технологический институт

Тел: (4862) 55-55-24

E-mail: prtlostu@gmail.com

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.822.6-97: 621.317.757.08

Н.В. ДАВЫДОВА, Т.И. НОГАЧЁВА

ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В статье описан резистивный метод исследования частотных характеристик и временных зависимостей, изменяющихся во времени параметров комплексного сопротивления.

Ключевые слова: диэлектрик, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, комплексное сопротивление, частотные характеристики, резистивный метод измерения, точность метода

In article the resistive method of research of frequency characteristics and the time dependences changing in time of parameters of complex resistance is described.

Key words: dielectric, electric conductivity, dielectric permeability, complex resistance, frequency characteristics, a resistive method of measurement, accuracy of a method

С точки зрения электротехники вещества, называемые проводниками и диэлектриками, являются комплексными сопротивлениями. Для формирования физически обоснованных представлений о закономерностях и природе процессов, происходящих в этих веществах при различных условиях их использования, необходимо знать для каждого из веществ не только значения таких их параметров, как электропроводность и диэлектрическая проницаемость, но и частотные зависимости этих параметров.

Среди методов измерения параметров комплексных сопротивлений наиболее широкое распространение получили мостовые и резонансные методы. И те и другие требуют применения в измерительных схемах образцовых реактивных элементов. В качестве таких элементов при измерении параметров комплексных сопротивлений, содержащих емкостную составляющую, приходится использовать образцовые катушки индуктивности. Такие катушки изготавливаются для их использования на определенной частоте и, следовательно, именно на этой частоте должны проводиться измерения параметров комплексного сопротивления. В этом случае исключается возможность снятия частотных зависимостей исследуемых параметров. Поэтому при мостовых методах измерения используют не индуктивные, а емкостные образцовые сопротивления. Однако мостовые методы обычно непригодны для проведения измерений на высоких частотах из-за сильного влияния параллельно включенных паразитных емкостей измерительной цепи.

Резонансные методы, напротив, используются лишь на высоких частотах и требуют набора образцовых катушек индуктивности, каждая из которых применяется в достаточно узком частотном диапазоне.

Кроме того, в случае применения этих методов остается неясной степень сходимости измерительного моста, определяемая значением разбаланса, и степень точности настройки в резонанс, определяемая остротой резонансной кривой. Наконец, эти методы достаточно трудоемки из-за процессов уравнивания мостовых схем и настройки в резонанс резонансных. Автоматизация процессов уравнивания и настройки в резонанс снижает точность измерений. Указанные недостатки рассмотренных методов заставляют искать другие более удобные методы.

Значительно менее известным методом измерения параметров комплексных сопротивлений является резистивный метод, при котором в измерительной цепи не содержится

реактивных элементов кроме измеряемого комплексного сопротивления. За последнее время нам удалось найти лишь одну ссылку [1], когда авторы статьи рекомендовали для использования частный случай реализации этого метода. Однако для повышения точности предложенные авторами схема и методика требуют ряда усовершенствований [2].

При резистивном методе измерения параметров комплексного сопротивления оно включается в измерительную цепь, как показано на рисунке 1, последовательно с двумя активными сопротивлениями R_1 , и R_2 , значения которых заранее известно (измерено) с требуемой точностью.

При этом проводятся измерения напряжений U_1 на исследуемом сопротивлении, U_2 на участке исследуемое сопротивление – первое активное сопротивление R_1 и входное напряжение цепи U_3 . При использовании последовательной эквивалентной схемы комплексного сопротивления ток I в цепи может быть описан тремя уравнениями:

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{r_x^2 + x_x^2}}; I = \frac{U_2}{\sqrt{(r_x + R_1)^2 + x_x^2}};$$

$$I = \frac{U_3}{\sqrt{(r_x + R_1 + R_2)^2 + x_x^2}}, \quad (1)$$

где U_1 , U_2 и U_3 – соответственно напряжения на участках цепи, состоящих из измеряемого сопротивления $r_x + jx_x$, измеряемого сопротивления и одного резистора $r_x + R_1 + jx_x$, измеряемого сопротивления и двух резисторов $r_x + R_1 + R_2 + jx_x$;

r_x и x_x – активная и реактивная составляющие измеряемого комплексного сопротивления.

Решение системы уравнений (1) относительно r_x и x_x , позволяет получить выражения для расчета параметров комплексного сопротивления для его последовательной эквивалентной схемы:

$$r_x = \frac{(\alpha - 1)(R_2^2 + 2R_1R_2 - (\beta - \alpha)R_1^2)}{2[(\beta - 1)R_1 - (\alpha - 1)(R_1 + R_2)]}; \quad (2)$$

$$x_x = \sqrt{\frac{(r_x + R_1)^2 - \alpha r_x^2}{\alpha - 1}}, \quad (3)$$

где $\alpha = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$, $\beta = \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2$.

Так как параллельная эквивалентная схема комплексного сопротивления позволяет более наглядно с физической точки зрения объяснить процессы, происходящие в исследуемом комплексном сопротивлении, то его параметры r_x и x_x могут быть пересчитаны в R_x и X_x для параллельной эквивалентной схемы.

Этот метод удобен тем, что используемые пленочные резисторы, как правило, имеют очень малую емкостную проводимость и их параметры слабо зависят от частоты, что позволяет с помощью приведенной схемы исследовать частотные зависимости комплексных сопро-

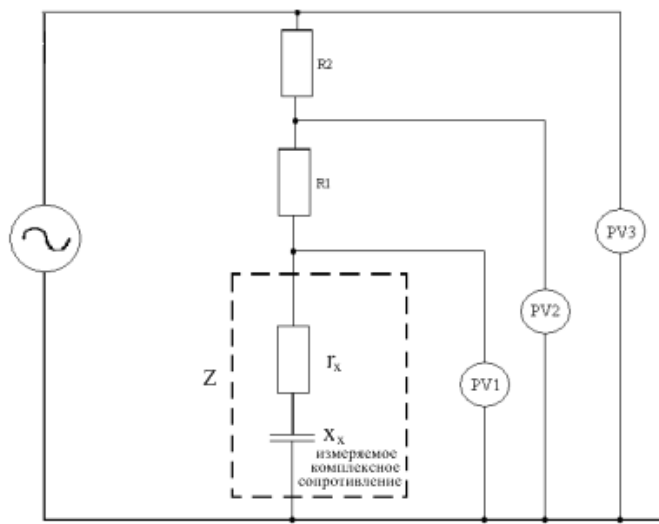


Рисунок 1– Схема реализации резистивного метода измерения параметров комплексного сопротивления с двумя образцовыми сопротивлениями

тивлений в значительных по ширине диапазонах частот. Недостатком метода является влияние на результаты измерения входных сопротивлений и емкостей измерителей напряжения (вольтметров), причем непосредственно в процессе измерения параметров комплексного сопротивления исключить это влияние невозможно. Поэтому, если требуется повышенная точность измерения, предварительно следует определить параметры входных цепей используемых измерителей напряжений (вольтметров) с помощью схемы, приведенной на рисунке 2.

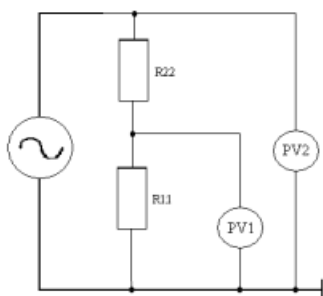


Рисунок 2 – Схема для измерения параметров входной цепи измерителей напряжения

Измерения проводятся дважды при различных образцовых сопротивлениях R_{22} и R_{33} . Так как входные параметры измерителя напряжения (вольтметр PV2) не влияют на результаты измерений, формулы для расчета эквивалентных параметров участка цепи комплексное сопротивление – вольтметр PV1 принимают вид:

$$r_{y\acute{e}a} = \frac{(1-\beta)R_{22}^2 - (1-\alpha)R_{33}^2}{2[(1-\alpha)R_{33} - (1-\beta)R_{22}]} \quad \text{и} \quad (4)$$

$$x_{y\acute{e}a} = \sqrt{\frac{r_{y\acute{e}a}^2 \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) + 2r_{y\acute{e}a} R_{22} + R_{22}^2}{\beta - 1}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha = \left(\frac{U_{22}}{U_{11}} \right)^2 \quad \beta = \left(\frac{U_{33}}{U_{11}} \right)^2.$$

Для параллельной эквивалентной схемы этого участка:

$$R_{PV} = \frac{R_{y\acute{e}a} R_{11}}{R_{11} - R_{y\acute{e}a}} \quad \text{и} \quad (6)$$

$$X_{PV} = X_{y\acute{e}a}, \quad (7)$$

$$C_{PV} = \frac{1}{2\pi f X_{PV}}. \quad (8)$$

С учетом параметров входных цепей измерителя напряжений параметры измеряемых комплексных сопротивлений могут быть рассчитаны в соответствии с выражениями:

$$R_x = \frac{R_{y\acute{e}a} R_{PV}}{R_{PV} - R_{y\acute{e}a}} \quad \text{и} \quad (9)$$

$$C_x = C_{y\acute{e}a} - \tilde{N}_{PV}. \quad (10)$$

Для повышения точности и возможности применения метода для измерения параметров изменяющихся во времени комплексных сопротивлений целесообразно использовать общий случай резистивного метода, при котором последовательно с комплексным сопротивлением может быть включено n образцовых активных сопротивлений и измерено $(n+1)$ значение напряжений в соответствии с рисунком 3.

Решая попарно уравнения из полученной системы уравнений для тока относительно напряжения на измеряемом комплексном сопротивлении U_1 , можно определить $(n-2)$ результата измерения r_x и x_x . Расхождение значений этих результатов объясняется погрешностями измерения напряжений, а также неточностью определения значений сопротивлений резисторов, принятых за образцовые сопротивления, и параметров входных цепей измерителей на-

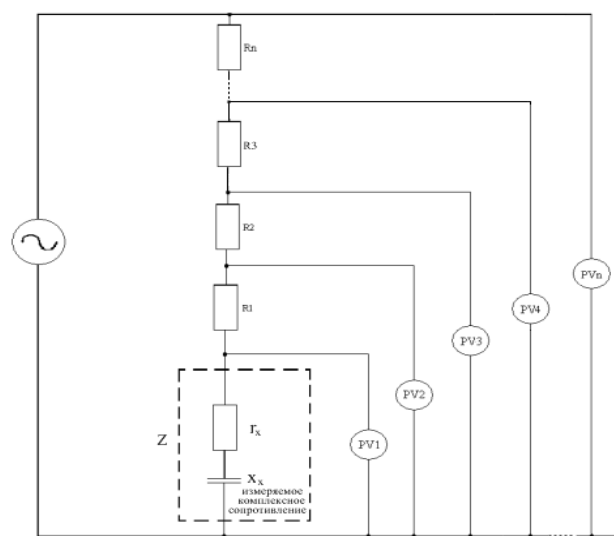


Рисунок 3 – Схема реализации резистивного метода измерения параметров изменяющегося во времени комплексного сопротивления

пряжений. Наиболее достоверными значениями r_x и x_x следует считать их средние значения из $(n-2)$ полученных результатов, так как измерение разных значений напряжений обычно сопровождается погрешностями, у которых случайные составляющие больше систематической. Таким образом, может быть значительно повышена точность измерения.

Кроме того, в процессе измерения вследствие одновременного измерения напряжений исключается влияние нестабильности напряжения и частоты источника питания, что, в свою очередь, также повышает точность. И, наконец, упрощается сам процесс измерения и сокращается время измерения.

Указанную схему рекомендуется применять для исследования частотных характеристик параметров комплексных сопротивлений и зависимостей этих параметров от времени. Вместо вольтметров могут использоваться АЦП с микропроцессором (или ПК), вычисляющим на основании полученных сигналов изменяющиеся во времени параметры комплексного сопротивления. Следует отметить, что использование последовательного опроса при одном АЦП возможно только в том случае, если за время одного цикла опроса параметры комплексного сопротивления изменяются незначительно. При снятии частотных характеристик процесс измерения повторяется на заданных частотах или измерения проводятся при малой скорости изменения частоты источника питания (генератора), при которой можно пренебречь изменением параметров комплексного сопротивления за цикл измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин, В.В. Способ и устройство для измерения сопротивления водных электролитов / В.В. Калинин, А.В. Казак // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. - №8. - Том 74. - С.46-48.
2. Давыдова, Н.В. Выбор оптимальных значений образцовых сопротивлений при измерении электрических характеристик диэлектрической жидкости методом включения измерительной ячейки в резистивную цепь. / Н.В. Давыдова, Т.И. Ногачёва // Контроль. Диагностика, 2010. - №6.

Давыдова Надежда Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Старший преподаватель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

Ногачёва Татьяна Ивановна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент
Тел. (0862)419876
E-mail: pms@ostu.ru

С.П. БОГДАНОВ, В.Г. ЛИСИЧКИН, Д.П. САННИКОВ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

Для повышения точности резонансных приборов контроля с линейной частотной модуляцией, применяемых для измерения толщины немагнитных покрытий, предлагается выполнять аддитивную коррекцию фазовых погрешностей, а также компенсировать погрешность измерений, возникающую от «сноса» резонансной частоты, за счет двухтактной развертки частоты возбуждающего сигнала первичного измерительного преобразователя.

Ключевые слова: резонансный прибор контроля, аддитивная коррекция фазовых погрешностей, развертка частоты.

For increase of accuracy of the resonant control devices with the linear frequency modulation, applied to measurement of a not magnetic coverings thickness, it is offered to carry out additive correction of phase errors, and also to compensate an error of measurements arising from "pulling down" of resonant frequency at the expense of frequency duple development of the primary measuring converter exciting signal.

Key words: resonant control device, additive correction of phase errors, development of frequency.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важную роль в технологическом цикле многих производств играет контроль толщины и равномерности различного рода покрытий, основой которых является ферромагнитный материал. Для осуществления такого контроля широко применяются параметрические вихретоковые преобразователи [1]. Отличия в характере зависимости выходного сигнала вихретокового преобразователя от свойств контролируемого материала и размеров изделия позволяют измерять одним и тем же преобразователем несколько параметров – электропроводность, диаметр изделия или величину зазора (толщину немагнитного покрытия), используя для этой цели сигналы возбуждения разной частоты. При увеличении зазора между преобразователем и изделием изменяется только амплитуда выходного сигнала, а его фаза остается практически постоянной. В свою очередь, фаза выходного сигнала вихретокового преобразователя в существенной мере зависит от изменения электропроводности изделия, поэтому по значениям фазы можно с определенной достоверностью судить о толщине немагнитного покрытия.

Типовые способы измерения параметров физических величин, основанные на применении частотных методов, обладают достаточно широкими возможностями по диапазонам измерений и достаточной информативностью. Однако в производственных условиях, при большом числе учитываемых или контролируемых параметров технологического процесса, измерение каждого из них в отдельности достаточно сложно. Различные параметры производственного процесса – помехи промышленной частоты, изменение температуры контролируемой поверхности и окружающей среды, вариация зазора между вихретоковым преобразователем и поверхностью объекта контроля – являются дестабилизирующими факторами при измерении главного контролируемого параметра – толщины немагнитного покрытия.

В результате анализа различных способов построения аппаратуры установлено, что для контроля толщины покрытия при большом числе мешающих факторов целесообразно использовать двухпараметровые способы контроля в сочетании с автоматической коррекцией результатов измерений в зависимости от свойств ферромагнитной основы.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс контроля толщины покрытий на ферромагнитных изделиях сводится в общем случае к измерению или сравнению с допустимыми значениями двух параметров – амплитуды и фазы выходного сигнала вихретокового преобразователя, возбуждаемого высокочастотным сигналом. Такие способы контроля называют двухпараметровыми [1].

Известные способы двухпараметрового контроля характеризуются различными вариантами формирования возбуждающего сигнала. В частности, применяют способ двухпараметрового неразрушающего контроля изделий, согласно которому варьируют высокочастотный сигнал, подаваемый на вихретоковый преобразователь, в заданном диапазоне контроля толщины покрытия. Затем измеряют амплитуду выходного напряжения преобразователя и разность фаз между возбуждающим и выходным сигналами, которые умножают на соответствующие масштабирующие коэффициенты и используют для получения результата измерения. Используется также способ двухпараметрового контроля, в соответствии с которым на вихретоковый преобразователь параметрического типа подается переменный ток высокой частоты, после чего измеряют амплитуду и фазу выходного сигнала преобразователя, и по результатам их обработки определяют параметры контролируемого изделия.

Общим недостатком этих способов является невысокая точность измерения толщины покрытия в широком диапазоне контролируемых параметров, которая ограничивается возрастанием относительной инструментальной погрешности измерения при уменьшении амплитуды выходного сигнала вихретокового преобразователя в случаях увеличения толщины немагнитного покрытия или электрической проводимости ферромагнитной основы изделия.

В настоящее время применяют более универсальный способ двухпараметрового контроля изделий, согласно которому вихретоковый преобразователь включают в параллельный колебательный контур и возбуждают его импульсами тока. Затем амплитуду выходного сигнала вихретокового преобразователя U_m сравнивают с пороговым уровнем напряжения $U_{\text{пд}}$, усиливают полученный сигнал разбаланса $\Delta U = U_m - U_{\text{пд}}$ в $K_u \gg 1$ раз и используют его для регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока $I_{\text{а}}$, а также в качестве одного из информативных параметров, характеризующих толщину контролируемого покрытия.

Недостатком этого способа является понижение точности измерения вследствие возрастания методической погрешности при расширении диапазона контролируемых параметров. Этот недостаток обусловлен нелинейной зависимостью между контролируемой толщиной h покрытия и фазовым углом φ выходного сигнала вихретокового преобразователя. Нелинейность фазовой характеристики $\varphi = F(h)$ особенно возрастает при большой разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами преобразователя ($\Delta\varphi > 45^\circ$). Кроме того, ширина диапазона контроля толщины покрытия резонансным способом практически ограничивается динамическим диапазоном регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока. Данное ограничение приводит к необходимости дополнительной настройки аппаратуры при изменении условий контроля и, как следствие, к снижению его производительности при контроле толщины покрытия деталей в производственных условиях.

С целью расширения диапазона измерений и одновременного повышения производительности неразрушающего контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе предлагается способ, согласно которому вихретоковый преобразователь включают в параллельный колебательный LC -контур, частоту резонанса $f_{\text{д}}$ которого устанавливают в середине расчетного диапазона контроля толщины покрытия регулировкой конденсатора переменной емкости. В процессе контроля на LC -контур подают импульсы возбуждающего тока $I_{\text{а}}$ с линейным изменением частоты, а амплитуду выходного сигнала преобразователя U_m сравнивают с пороговым уровнем напряжения $U_{\text{пд}}$. Затем усиливают сигнал разбаланса $\Delta U = U_m - U_{\text{пд}}$ в $K_u \gg 1$ раз по аналогии с известным способом и усиленным сигналом разбаланса $U_{\text{д}} = \Delta U \cdot K_u$ регулируют амплитуду импульсов возбуждающего тока $I_{\text{а}}$.

Точность измерений в этом случае ограничивается тем, что при линейном изменении частоты возбуждающего сигнала $f_{\text{а}}$ измерительных преобразователей возникает так называемая погрешность от «сноса» резонансной частоты данного LC -контура $\Delta f_{\text{д}} \approx V_f T_{\text{с}}^2$ [2].

Эта динамическая погрешность зависит как от скорости развертки частоты V_f [кГц/с], так и от постоянной времени LC -контура $T_{\hat{e}} = Q/\pi f_{\delta}$, возрастающей пропорционально его добротности Q . Например, если LC -контур имеет резонансную частоту $f_{\delta} = 1$ МГц, то при добротности $Q = 100$ его постоянная времени составляет $T_{\hat{e}} = Q/\pi f_{\delta} \approx 30$ мкс. При развертке частоты $f_{\hat{a}}$ импульсов возбуждающего сигнала со скоростью $V_f = 100$ кГц/мс разность фаз между входным и выходным сигналами контура $\Delta\varphi_{\hat{e}} = 0$ соответствует частоте, составляющей $f_{\hat{a}} \approx f_{\delta} + V_f T_{\hat{e}} \approx (10^6 + 3 \cdot 10^3)$ Гц. Следовательно, эта частота отличается от резонансной частоты f_{δ} на величину $\Delta f_{\delta} \approx 3$ кГц или на 0,3 %.

Для устранения погрешности от «сноса» предлагается использовать двухтактный режим преобразования с изменением скорости и направления частоты развертки импульсов возбуждающего тока. В первом такте преобразования длительностью T_1 увеличивают частоту $f_{\hat{a}}$ импульсов возбуждающего тока $I_{\hat{a}}$ в диапазоне контроля до момента изменения знака разности фаз φ между возбуждающим током и выходным сигналом вихретокового преобразователя. Во втором такте медленно уменьшают частоту возбуждающего тока до момента появления начального знака разности фаз. В конце второго такта преобразования T_2 прекращают развертку частоты импульсов возбуждающего тока и измеряют эту частоту цифровым способом.

Первым информативным параметром при таком двухтактном преобразовании является значение усиленного сигнала разбаланса $U_{\delta} = \Delta U \cdot K_u$, а в качестве второго информативного параметра используется значение частоты $f_{\hat{a}}$ импульсов возбуждающего тока $I_{\hat{a}}$, соответствующее нулевой разности фаз $\Delta\varphi = 0$ между возбуждающим и выходным сигналами преобразователя.

Для расчета толщины электропроводящих покрытий на ферромагнитной основе используются два параметра, измеряемых цифровым способом – амплитудный и частотный, а вычисление толщины покрытия h выполняется микропроцессором по обобщенной формуле следующего вида

$$h = \ln(K_1 U_{\delta}) + K_2 / f_{\hat{a}},$$

где K_1, K_2 – коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментальным путем для конкретных значений электрической проводимости покрытия и ферромагнитной основы контролируемого образца изделия.

При допусковом контроле качества малогабаритных микросхем необходимо повышать частоту возбуждающего сигнала до значений $f_{\hat{a}} \approx (20 \dots 30)$ МГц, что обусловлено малой толщиной защитного покрытия $h \approx (3 \dots 7)$ мкм. В то же время для уменьшения влияния зазора на результаты контроля толщины покрытия необходимо выделять или измерять сравнительно наибольшую разность фаз ($\varphi \leq \pm 45^\circ$) высокочастотных сигналов, так как этот фазовый параметр однозначно связан с толщиной h покрытия.

Применение известных методов непосредственного измерения фазы на такой высокой частоте не позволяет уменьшить инструментальную погрешность до допустимых пределов даже при использовании современных быстродействующих цифровых микросхем, например, серии КР1554, имеющих максимальную частоту переключения $f_{\max} = 150$ МГц. В частности, при минимальной длительности фронта и спада выходных сигналов, составляющей $t_{\delta\delta} \approx t_{\text{нн}} \approx 4$ нс погрешность измерения разности фаз сигналов на частоте $f_{\hat{a}} = 25$ МГц может достигать значения $\Delta\varphi \approx 360^\circ \cdot t_{\delta\delta} \cdot f_{\hat{a}} \approx \pm 36^\circ$, сравнимого со всем диапазоном контроля толщины немагнитного покрытия. Если же учитывать время распространения сигнала от

входа к выходу элементов, нормируемое для таких микросхем как время срабатывания $t_{\text{н\ddot{a}}\text{а}} \approx (8...10)$ нс, то добавление простого логического инвертора в одном из двух измерительных каналов может привести к изменению разности фаз на $\Delta\varphi \approx \pm (2...90)^\circ$.

Для уменьшения погрешности измерения фазы $\Delta\varphi$ можно использовать аддитивную коррекцию, которая реализуется разделением цикла преобразования на два такта. При этом в первом такте измеряют разность фаз $\varphi_1 = \varphi_{\text{а1}} - \varphi_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}1} + \Delta\varphi_1$ между возбуждающим $U_{\text{а}}$ и выходным $U_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}}$ сигналами преобразователя с фазовой погрешностью $\Delta\varphi_1$. Во втором такте преобразования переключают измерительные каналы и измеряют разность фаз $\varphi_2 = \varphi_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}2} - \varphi_{\text{а2}} + \Delta\varphi_2$ между выходным $U_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}}$ и возбуждающим $U_{\text{а}}$ сигналами с фазовой погрешностью $\Delta\varphi_2$. Затем вычитают полученные данные и получают разностный результат измерения без аддитивной составляющей фазовой погрешности:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_{\text{а1}} - \varphi_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}1} + \Delta\varphi_1 - \varphi_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}2} + \varphi_{\text{а2}} - \Delta\varphi_2 \approx 2(\varphi_{\text{а1}} - \varphi_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}1})$$

Таким образом, при выполнении аддитивной коррекции можно обеспечить полную компенсацию фазовой погрешности $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 \approx 0$ за два такта преобразования.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сущность предлагаемых технических решений можно рассмотреть на примере допускового контроля качества провода металлокорда, который реализуется устройством с развертывающим частотным преобразованием (рисунок 1) и может быть сведен к измерению толщины электропроводящего немагнитного покрытия на ферромагнитной основе.

В составе устройства используются управляемый генератор импульсов УГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ и параллельный колебательный контур на основе вихретокового преобразователя, имеющего эквивалентную индуктивность L_x , и конденсатор переменной емкости C . К выходу LC -контра подключены амплитудный детектор АД и формирователь импульсов ФИ1. Для регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока выход амплитудного детектора через дифференциальный усилитель ДУ соединен с управляющим входом преобразователя напряжения в ток ПНТ. Второй вход усилителя ДУ соединен с источником опорного напряжения ИОН, который применен для формирования напряжения порогового уровня $U_{\text{п\ddot{o}}}$. При этом на выходе усилителя ДУ получается напряжение разбаланса $U_{\text{д}} = \Delta U \cdot K_u$, которое подается на блок обработки данных БОД для последующего кодирования и использования в качестве первого информативного параметра толщины покрытия.

Для изменения скорости и направления развертки частоты импульсов в разных тактах преобразования выход БОД соединен с управляющим входом аналогового коммутатора АК, служащего для подключения выходов ИОН к входу интегратора напряжения ИНТ. Блок обработки данных также выполняет цифровое измерение частоты импульсов $f_{\text{а}}$. Результаты контроля выводятся на цифровой индикатор ЦИ.

В начале цикла контроля по командам БОД коммутатор и интегратор устанавливаются в исходные состояния. Постоянное опорное напряжение $U_{01} \geq 2$ В с выхода ИОН через коммутатор подается на вход интегратора, выходное напряжение которого линейно повышается во времени по закону $U_{\text{э\ddot{i}\ddot{o}}} = U_{01}t/T$ со скоростью нарастания $V_1 = U_{01}/T$, зависящей от постоянной времени интегратора T . Напряжение $U_{\text{э\ddot{i}\ddot{o}}}$ поступает на управляющий вход УГИ, формирующего прямоугольные импульсы со скважностью, равной двум, частота которых начинает линейно увеличиваться во времени $f_{\text{а1}} = K_1t$ пропорционально коэффициенту преобразования K_1 управляемого генератора. Импульсы от УГИ поступают на ПНТ, который имеет большое выходное сопротивление, чтобы не шунтировать колебательный контур. С выхода ПНТ на возбуждающую обмотку вихретокового преобразователя L_x и конденса-

тор C подаются прямоугольные импульсы тока $I_{\hat{a}}$. При подключении возбуждающей обмотки преобразователя с индуктивностью L_x параллельно конденсатору C образуется колебательный контур, имеющий резонансную частоту $f_{\delta} = 1/2\pi\sqrt{L_x C}$. Вследствие высокой добротности LC -контра на его выходе формируется напряжение $U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}$ гармонической формы, частота которого задается частотой $f_{\hat{a}1}$ генератора УГИ и изменяется во времени по линейному закону.

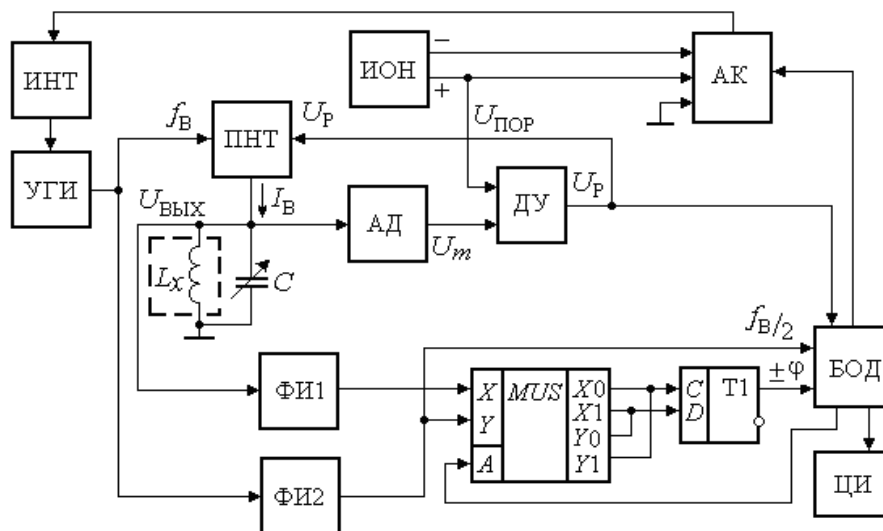


Рисунок 1 – Структурная схема прибора с развертывающим частотным преобразованием и аддитивной коррекцией фазовых погрешностей

При первичной настройке устройства или перед началом цикла допускового контроля вихретоковый преобразователь размещается на образцовом изделии с эталонной толщиной немагнитного покрытия. При этом регулировкой емкости C переменного конденсатора устанавливают частоту резонанса LC -контра примерно равной средней частоте рабочего диапазона контроля $f_{\delta} \approx f_{\hat{a}1}$. Этим обеспечиваются высокая фазовая чувствительность и линейность фазочастотной характеристики преобразования при контроле.

Амплитудным детектором и усилителем ДУ выделяется и усиливается сигнал разбаланса (разность напряжений) $U_{\delta} = K_u (U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} - U_m)$ между пороговым напряжением ($U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} \geq 2$ В), формируемым источником ИОН, и амплитудой U_m выходного сигнала LC -контра. Напряжением разбаланса U_{δ} регулируется амплитуда импульсов тока $I_{\hat{a}}$ в преобразователе ПНТ. Формирователь ФИ1 преобразует выходной сигнал вихретокового преобразователя $U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}$ в последовательность прямоугольных импульсов. Этот импульсный сигнал поступает на первый вход мультиплексора MUS , на второй вход которого подается сигнал с выхода УГИ после прохождения через формирователь ФИ2. С помощью D -триггера, который выполняет функцию фазового компаратора, сигнал с выхода LC -контра сравнивается по фазе с выходными импульсами УГИ. До тех пор, пока частота $f_{\hat{a}1}$ формируемых генератором УГИ импульсов не превышает резонансной частоты LC -контра ($f_{\hat{a}1} < f_{\delta}$), разность фаз между входными и выходными сигналами LC -контра остается положительной ($\varphi > 0$). При равенстве частот $f_{\hat{a}1} = f_{\delta}$ фазовый угол переходит через нулевое значение ($\varphi = 0$) и при дальнейшем повышении частоты возбуждающего тока $f_{\hat{a}1} > f_{\delta}$ выполняется неравенство $\varphi < 0$.

В процессе увеличения или развертки частоты импульсов УГИ в момент времени равенства частот $f_{\hat{a}1} = f_{\delta}$ срабатывает D -триггер и его выходной сигнал переходит из единичного логического состояния в нулевое (переход «1» → «0»). После срабатывания этого триггера

гера начинается второй такт преобразования, в котором БОД переводит коммутатор АК в другое рабочее состояние. При этом на вход интегратора подается от ИОН небольшое отрицательное напряжение $U_{02} \approx -U_{01}/100$, под воздействием которого выходное напряжение интегратора начинает медленно уменьшаться по линейному закону. Это приводит к медленно понижению частоты прямоугольных импульсов на выходе генератора УГИ относительно предыдущего значения $f_{\hat{a}1}$ в соответствии с выражением: $f_{\hat{a}2} = f_{\hat{a}1} - K_2 t \approx f_{\hat{a}1} - K_1 t/100$.

Частота импульсов УГИ понижается до тех пор, пока D -триггер не вернется в исходное состояние (переход «0» → «1»), после чего второй такт преобразования заканчивается.

Для компенсации времени запаздывания, влияющего на погрешность выделения разности фаз, в данной схеме применены одинаковые формирователи в каждом измерительном канале. Аддитивная коррекция фазовых погрешностей в схеме прибора выполняется в третьем такте преобразования. При этом на управляющий вход «А» мультиплексора MUS от блока обработки данных подается команда на переключение измерительных каналов, и мультиплексор соединяет выход ФИ1 с D -входом, а выход ФИ2 – с C -входом фазового компаратора. Затем БОД повторно выполняет подстройку частоты возбуждающего сигнала для выполнения равенства $f_{\hat{a}3} \approx f_{\delta}$ и вычисляет результат преобразования по полусумме частот $f_{\delta} = \sqrt{f_{\hat{a}3} + f_{\hat{a}2}}/2$.

После вычисления частоты f_{δ} БОД выдает команду на коммутатор, который соединяет вход интегратора с нулевой цепью и переводит его в режим запоминания, при котором напряжение $U_{\hat{e}i0}$ не изменяется, и частота импульсов УГИ также остается постоянной.

В блоке обработки данных выполняется кодирование напряжения U_{δ} , поступающего от усилителя ДУ. По результатам цифровых измерений частоты $N_f = T_{\hat{e}ci} f_{\delta}$ и напряжения $N_u = K_{i\delta} U_{\delta}$ блок обработки данных вычисляет толщину h контролируемого покрытия, значение которой выводится на цифровой индикатор ЦИ.

Высокая чувствительность предлагаемого способа контроля обусловлена следующим обстоятельством. На резонансной частоте f_{δ} параллельного LC -контура, содержащего вихретоковый преобразователь, влияние электромагнитных потерь в немагнитном покрытии с толщиной h компенсируется ферромагнитными свойствами основы. Вследствие этого небольшие изменения толщины покрытия $\Delta h \approx (0,2 \dots 1,5)$ мкм приводят к отклонению резонансной частоты до десятков килогерц относительно среднего значения резонансной частоты $f_{\delta} \approx (0,5 \dots 5)$ МГц при высокой добротности LC -контура. Для повышения фазовой чувствительности к измеряемому параметру и увеличения добротности контура ($Q = 20 \dots 200$) в данном устройстве применены детектор и формирователи импульсов с высокими входными сопротивлениями (на основе микросхем с полевыми транзисторами).

Повышение достоверности контроля предлагаемым способом обеспечивается за счет усреднения результата измерения частоты f_{δ} на интервале времени $T_{\hat{e}ci}$, кратном 20 мс, что позволяет резко ослабить влияние помех промышленной частоты (50 Гц) на результат преобразования. Кроме того, при автоматической регулировке амплитуды импульсов возбуждающего тока в преобразователе ПНТ амплитуда выходного сигнала вихретокового преобразователя в составе LC -контура мало зависит от резонансной частоты и определяется пороговым напряжением $U_m \approx U_{i\delta} \geq 2$ В. Поэтому инструментальные погрешности амплитудного детектора и формирователей ФИ1, ФИ2 пренебрежимо малы и практически не оказывают влияния на достоверность результатов контроля толщины покрытия h .

Дополнительным преимуществом данного способа является двухтактное частотное преобразование с изменением направления и скорости изменения частоты возбуждающих импульсов тока, что позволяет устранить эффект «сноса» частоты резонанса, характерный для высокодобротных колебательных систем при линейной частотной модуляции.

ВЫВОДЫ

Предложенный способ измерения толщины немагнитных покрытий обеспечивает повышение точности и расширение диапазона контроля за счет применения двухтактной развертки частоты возбуждающего сигнала с изменением скорости и направления развертки в разных тактах преобразования. Уменьшение погрешности обеспечивается за счет измерения частоты сигналов вместо разности фаз и автоматической стабилизации амплитуды выходного сигнала вихретокового преобразователя. Повышение точности измерения частотных параметров обеспечивается за счет вычисления среднего значения за фиксированное время измерения, которое выбирается кратным периоду помехи промышленной частоты.

Дополнительное преимущество обеспечивает аддитивная коррекция погрешностей, реализуемая перекрестным переключением измерительных каналов в двух тактах преобразования с усреднением результатов двух измерений, что позволяет снизить требования к динамическим параметрам применяемых функциональных узлов при высокой точности преобразования фазовых параметров сигналов.

Сочетание предложенного способа вихретокового преобразования и структурных решений позволяет повысить точность измерения приборов, применяемых для технологического контроля качества немагнитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под редакцией Г. С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Советское радио, 1971. – 672 с.

Богданов Сергей Петрович

Академия ФСО России, г. Орел
преподаватель кафедры
г. Орел, ул. Приборостроительная, 35
E-mail: spbogdanov@mail.ru.

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
г. Орел, ул. Панчука, 66
Тел. (4862) 47-00-96
E-mail: lisichkin@rekom.ru.

Санников Дмитрий Петрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Информационные системы»
Тел. (4862) 42-22-31

УДК 543.544.5.068.7
658.562.012.7

В.А. ГАВРИЛИНА, С.Н. СЫЧЕВ

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ ВИНОГРАДНЫХ ВИН

Обсуждается принципиально новая экспертная система определения подлинности виноградных вин. Система основана на использовании мульти-корреляционной техники анализа для распознавания образов вин, полученных путем совместного использования метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с многоволновым детектированием и метода главных компонент. Показано, что предлагаемая система наиболее эффективна при исследовании сложных физико-химических систем с неизвестным количеством компонентов, например, виноградных вин.

Ключевые слова: экспертная система, мульти-корреляционный анализ, высокоэффективная жидкостная хроматография, метод главных компонент, подлинность вин.

Discuss the radically new expert system for determining the authenticity of wines. The system is based on the use multi-correlation analysis technique to recognize images of wines obtained by the method of sharing high-performance liquid chromatography (HPLC) with multi-wavelength detection and the method of principal components. It is shown that the proposed system is most effective in the study of complex physical-chemical systems with an unknown number of components, such as grapewines.

Key words: expert system, multi-correlation analysis, high performance liquid chromatography, principal components, the authenticity of wines.

ВВЕДЕНИЕ

Экспертная система определения качества вещества или изделия, базирующаяся на методе сравнения исследуемого образца: вещества, изделия или природного объекта - с контрольным (образцовым или стандартным) веществом, изделием или природным объектом, является основой большинства методов измерений. Сравнение осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) веществу, изделию или природному явлению присваивается модель, содержащая ряд параметров, которые, по мнению авторов модели, позволяют описать исследуемый объект в смысле его дальнейшего использования или классификации;
- 2) путем сопоставления измеряемых с определенной вероятностью параметров модели исследуемых и контрольных (образцовых или стандартных) образцов, исследуемый объект идентифицируется в смысле дальнейшего его использования или классификации.

Наиболее распространенным способом установления качества вин является установление идентичности исследуемого и контрольного образцов для вин высшей категории или определение подобия исследуемого и контрольного образцов для сортовых и ординарных натуральных виноградных вин. Термины «идентичность» и «подобие» можно объединить в одном термине: «подлинность». Толковый словарь русского языка [1] предлагает следующее толкование слова «подлинность»: «...свойство по прилагательному «подлинный», то есть: являющийся оригиналом, не скопированный; настоящий, неподдельный; истинный, не показной». К вопросу о подлинности вин можно отнести выражения «являющийся оригиналом» и «настоящий». При проведении различного рода экспертиз веществ и объектов выражение «являющийся оригиналом» заменяется понятием «идентичности исследуемого образца и оригинала», а термин «настоящий» заменяется словом «подобный по ряду свойств». По отношению к винам, идентичными можно считать образцы вин, когда-либо взятых из одной емкости и хранимых в одинаковых условиях. Подобными можно считать вина, изготовленные из определенного сорта или сортов винограда по сходным технологиям и хранящимися в условиях, близких по климатическим и техническим параметрам.

В любом случае, при использовании метода сравнения решаются три задачи:

- разработка и выбор наиболее удачной в конкретном случае модели вещества, изделия или природного явления;
- определение необходимого и достаточного количества параметров для определения подлинности исследуемого объекта;
- выработка критериев, характеризующих подлинность исследуемых веществ и объектов, в том числе натуральных виноградных вин.

Определение подлинности вин всегда была, есть и остается актуальной проблемой. Однако, до сих пор не существует удовлетворительной процедуры сравнения товарного образца вина с контрольным, и эта проблема связана с неопределенностью количества и характера параметров, необходимых и достаточных для характеристики вин, особенно для элитных. Такая ситуация связана со сложным составом объекта: в настоящее время в винах обнаружено и идентифицировано более 400 химических соединений, относящихся к разным классам. Получение и сопоставление такого количества экспериментальных параметров превращает задачу по контролю качества в недоступную для выполнения в большинстве лабораторий, причем наращивание числа сравниваемых параметров ничем не ограничено и не может гарантировать полной уверенности, например, в идентичности вин. В результате, наиболее распространенным методом определения фальсификации и подлинности напитков до сих пор является органолептический метод. Однако, показатели экспертов субъективны и подвержены внешнему воздействию. По этой причине, несмотря на недостатки, стремительно растет интерес к применению современных аналитических методов, дающих набор параметров исследуемого напитка. Решение этой проблемы может быть найдено в применении комбинации многопараметровых физико-химических методов анализа и методов «свертки информации». В качестве метода получения экспериментальных данных нами была выбрана обращенно-фазовая высокоэффективная жидкостная хроматография (ОФ ВЭЖХ) с многоволновым спектрофотометрическим детектированием в УФ- и ВИД-диапазонах, а методом свертки информации, способным генерировать непосредственно из экспериментальных данных систему линейно-независимых параметров (факторов) - метод главных компонент [2, 3, 4].

МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Выбор математической модели и способ задания количества параметров сложных (многопараметровых) объектов связаны между собой. Так, при применении нелинейных моделей количество и, особенно, характер параметров определяется произвольно, исходя из производственной необходимости и экспериментального опыта. Параметры многопараметровых линейных моделей могут быть определены как по первому способу, т.е. достаточно произвольно, так и путем поиска линейно-независимых параметров линейной модели объекта, непосредственно не вводимых экспертом по своему усмотрению, но содержащихся в экспериментальной информации, особенно полипараметрической.

Алгоритм поиска линейно-независимых параметров линейной модели объекта реализован в так называемом методе главных компонент [2,3].

Метод главных компонент является разновидностью мультикорреляционного анализа, т.е. метода, основанного на обработке корреляционных матриц большой размерности. Суть метода главных компонент состоит в следующем: элементы A_{ik} (экспериментальные величины полипараметрического анализа) исходной размерности $\dim A = m \times n$ приводятся к новым величинам, имеющим нулевые средние и единичные дисперсии по формуле:

$$\tilde{A}_{ik} = (A_{ik} - \bar{A}_i) / S_i, \quad (1)$$

где $\bar{A}_i = \sum A_{ik} / n$ – среднее значение A_{ik} по столбцам;

S_i – стандартное отклонение.

Далее будем подразумевать, что матрица A преобразована по (1). Вычисляется корреляционная матрица $C = A \cdot A^T / (n - 1)$, $\dim C = m \times m$, элементы которой C_{ik} – суть выборочные коэффициенты парной корреляции исходных признаков A_i и A_k . Существует ортогональное преобразование системы координат, с помощью которого матрица C приводится к диагональному виду:

$$V^T C B = A, \quad (2)$$

где V – матрица преобразования (матрица векторов),

$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ – диагональная матрица.

λ_1, λ_2 – собственные значения матрицы C , отвечающие ее i -ому собственному числу λ . Матрица A при этом преобразуется по закону: $V^T A = F$.

$$A = V \cdot F, \quad (3)$$

где F – преобразованная матрица A (матрица факторов), удовлетворяющая соотношению:

$$A \cdot A^T / (n - 1) = \Lambda \quad (4)$$

Собственные числа λ_i – суть выборочные дисперсии новых параметров (факторов), причем последние не коррелируют друг с другом (их ковариационная матрица Λ – диагональная). Преобразуем λ_i в (2) таким образом, чтобы выполнялось условие $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \lambda_i \geq 0$.

Если между исходными признаками существовала линейная зависимость, то только первые $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ отличны от нуля, из чего следует, что последние m -г строк матрицы F состоят из одних нулей. Поэтому равенство (3) можно переписать в виде

$$A = \{V\} \cdot \{F\}, \quad (5)$$

где матрицы $\{V\}$ и $\{F\}$ есть соответствующие подматрицы матриц V и F .

Вследствие экспериментальной погрешности при измерении параметров A_{ik} все или большая часть λ_i могут оказаться отличными от нуля, однако, если их значения различаются достаточно сильно, то

остаточная дисперсия, определенная, как $\varepsilon = \sum_{r=1}^m \lambda_i$ будет малой величиной

для некоторого числа r . Малость остаточной дисперсии ε оценивается, исходя из заранее сформулированных требований точности. Оценкой вклада r факторов может служить величина

$$q = \frac{\sum_{I=1}^r \lambda_i}{\sum_{I=1}^m \lambda_i} = \frac{\sum_{I=1}^r \lambda_i}{m} \quad (6)$$

Если ввести меру информации, как величину, пропорциональную следу ковариационной матрицы параметров, то по (6) можно судить о том, какой объем информации, содержащейся в параметрах $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ сохраняется при переходе к новым параметрам F_1, F_2, \dots, F_r , которые называются главными компонентами (факторами).

Обычно, меру информации получают в виде q 100 % и называют вкладом фактора F_1 в информацию, содержащуюся в исходной матрице A .

При использовании метода главных компонент мы предполагаем, что несколько измеряемых переменных сильно коррелируют друг с другом. Это означает, что, либо они взаимно определяют друг друга, либо связь между ними обуславливается третьей величиной, которую непосредственно измерить нельзя. Модель главных компонент связана с последним предположением и дает возможность получить числовые значения этих третьих величин в виде набора линейно-независимых факторов F , которые описывают и воспроизводят исходную матрицу с необходимой точностью в виде:

$$A(ij) = [F_1(i) \cdot V_1(j) + F_2(i) \cdot V_2(j) + \dots] \cdot S_i + H_i, \quad (7)$$

где $V_1(j)$ и $V_2(j)$ – коэффициенты линейной модели из подматрицы $\{V\}$;

$F_1(i), F_2(i)$ – линейно-независимые факторы (параметры) из подматрицы $\{F\}$;

S_i – стандартное отклонение по строкам;

H_i – среднее значение по строкам матрицы A ;

$A(ij)$ – элемент исходной матрицы A .

ПРИНЦИП ЛИНЕЙНОСТИ СВОБОДНЫХ ЭНЕРГИЙ И БАЗОВЫЕ ЛИНЕЙНО-НЕЗАВИСИМЫЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ВИН

Основой применения метода главных компонент для обработки экспериментальных данных в виде оптических плотностей участков многоволновой хроматограммы является принцип линейности свободных энергий.

Хорошо известный в физической и физической органической химии принцип линейности свободных энергий [5] позволяет рассматривать свойство органической молекулы (например, реакционная способность молекулы или фрагменты ее УФ- или ВИД – спектров поглощения в виде оптических плотностей $A(ij)$) как сумму инкрементов ее частей [6]:

$$A_1 = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \dots \quad (8)$$

где A_1 – оптическая плотность на длине волны № 1;

a_1, a_2, a_3 – инкременты свойства молекулы;

x_1, x_2, x_3 – весовые коэффициенты инкрементов.

В конкретных условиях правильно подобранному инкременту соответствует постоянное значение используемой характеристики вне зависимости от конечного устройства молекулы. Для системы, состоящей из ограниченного набора свойств A (например, оптических плотностей фрагментов хроматограммы при многоволновом детектировании при использовании ограниченного количества длин волн спектрофотометрического детектора) выражение (8) примет вид:

$$A_1 = a_{11} \cdot x_{11} + a_{21} \cdot x_{21} + a_{31} \cdot x_{31} + \dots \quad (9)$$

$$A_2 = a_{12} \cdot x_{12} + a_{22} \cdot x_{22} + a_{32} \cdot x_{32} + \dots$$

$$A_3 = a_{13} \cdot x_{13} + a_{23} \cdot x_{23} + a_{33} \cdot x_{33} + \dots$$

$$A_4 = a_{14} \cdot x_{14} + a_{24} \cdot x_{24} + a_{34} \cdot x_{34} + \dots$$

$$\dots$$

$$A_n = a_{1n} \cdot x_{1n} + a_{2n} \cdot x_{2n} + a_{3n} \cdot x_{3n} + \dots$$

где A_1, \dots, A_n – элементы матрицы оптических плотностей многоволновой хроматограммы на длинах волн 1, 2, ..., n; a_{11}, a_{21}, a_{31} – инкременты УФ- ВИД- спектров участков многоволновых хроматограмм (сами участки хроматограммы имеют одинаковую длительность); x_1, x_2, x_3, \dots – весовые коэффициенты инкрементов.

Принцип линейности свободных энергий требует, чтобы для описания свойств системы использовались только линейно-независимые наборы инкрементов, которые и получают из исходной матрицы оптических плотностей многоволновой хроматограммы методом главных компонент. Действительно, основная идея использования метода главных компонент при контроле вин заключается в свертке информации и получении набора линейно-независимых факторов из оптических плотностей многоволновых хроматограмм вин, предварительно превращенных в матрицу дискретных значений оптических плотностей элюата на разных длинах волн.

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ ВИН

Получение многоволновой хроматограммы в графическом и цифровом виде

На рисунке 1 представлена хроматограмма красного сухого вина «Каберне» на длинах волн 270, 290, 320, 330, 354 нм с использованием универсального элюента [7].

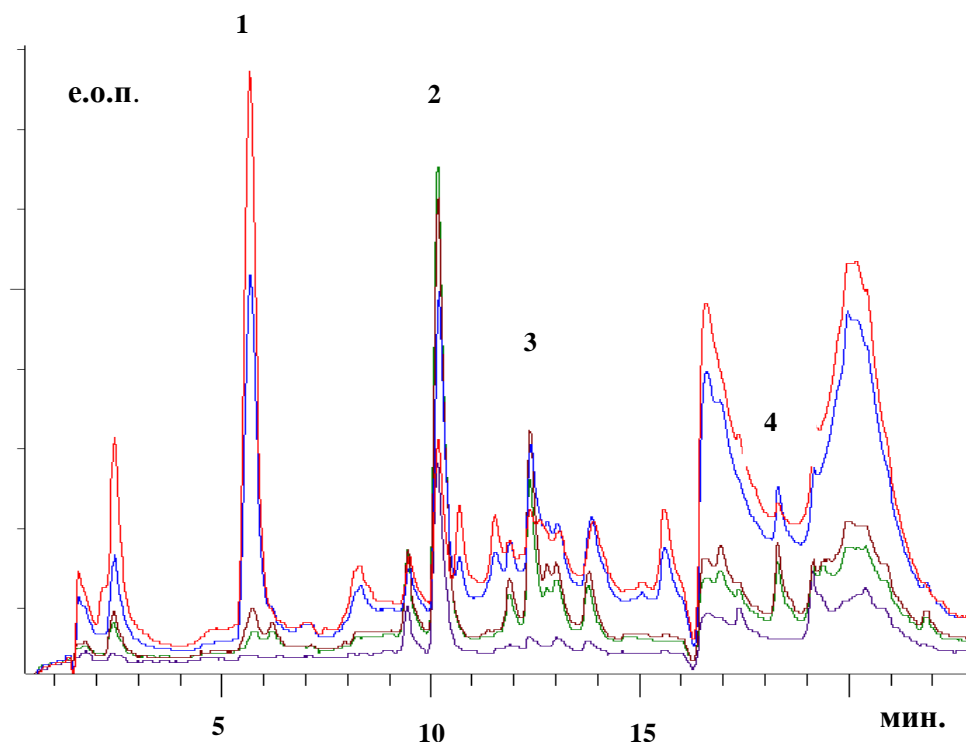


Рисунок 1 – Хроматограмма красного вина «Каберне»

1 – галловая кислота; 2 – кофейная кислота; 3 – п-кумарова; 4 – салициловая кислота. Хроматограф «Милихром-5М», спектрофотометрический детектор, длины волн 270, 290, 320, 330 и 354 нм. Колонка 80x2 мм заполнена Сепароном С18 (диаметр частиц 5 мкм), температура термостата колонки 35°С. Элюент: градиент ацетонитрила от 0% до 50% в растворе «дистиллированная вода – ортофосфорная кислота – диэтиламин» в соотношении 100: 1.5 : 0.5 за 25 мин.

Съем информации по оптическим плотностям (ось ординат) производился через каждые 0,05 мин. (ось абсцисс). В результате для обработки методом главных компонент была использована матрица оптических плотностей элюата размером 5 x 448 (таблица 1).

Таблица 1 – Фрагмент исходной матрицы оптических плотностей (единицы оптической плотности)

Время, мин.	9,85	9,90	9,95	10,0	10,05	10,10	10,15	10,20	10,25	10,30
270 нм	0,2090	0,1095	0,1092	0,1332	0,1920	0,2715	0,3090	0,2932	0,2472	0,2090
290 нм	0,3170	0,098	0,1025	0,1255	0,2137	0,3695	0,4777	0,4742	0,4040	0,3170
320 нм	0,3347	0,0742	0,0852	0,1407	0,2980	0,5085	0,6067	0,5537	0,4447	0,3347
330 нм	0,3412	0,0724	0,0887	0,1592	0,3372	0,5665	0,6500	0,5737	0,4565	0,3412
354 нм	0,1530	0,049	0,0582	0,0910	0,1712	0,2452	0,2797	0,2435	0,1972	0,1530

Представленный фрагмент исходной матрицы соответствует участку хроматограммы в диапазоне от 9,85 до 10,30 мин.

Обработка хроматограммы в цифровом виде

В результате обработки исходной матрицы 5x448 оптических плотностей хроматограммы были получены четыре линейно-независимых фактора, описывающих исходную матрицу на 99,99 % . Значения факторов и их вклады в общую информацию о составе вина приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения линейно-независимых факторов F_1 - F_4 и их вклады в общую информацию о вине

	F_1	F_2	F_3	F_4
Вклады факторов, %	89,56 %	8,49 %	1,62 %	0,33 %
270 нм	1,242	0,911	0,905	-0,083
290 нм	0,830	-0,525	-1,495	-0,0155
320 нм	-0,389	-0,797	0,584	1,439
330 нм	-0,525	-0,837	0,552	-1,386
354 нм	-1,158	1,248	-0,547	0,0445

Полученные факторы являются линейно-независимыми параметрами вина, сравнение которых и дает возможность сравнения исследуемого и контрольного образцов. Таким образом, вместо сравнения матриц размерностью 5×448 , сравниваются матрицы размерностью 5×4 . Каждый фактор представляет собой гвази-гладкий линейно-независимый УФ-ВИД-спектр поглощения (рисунок 2).

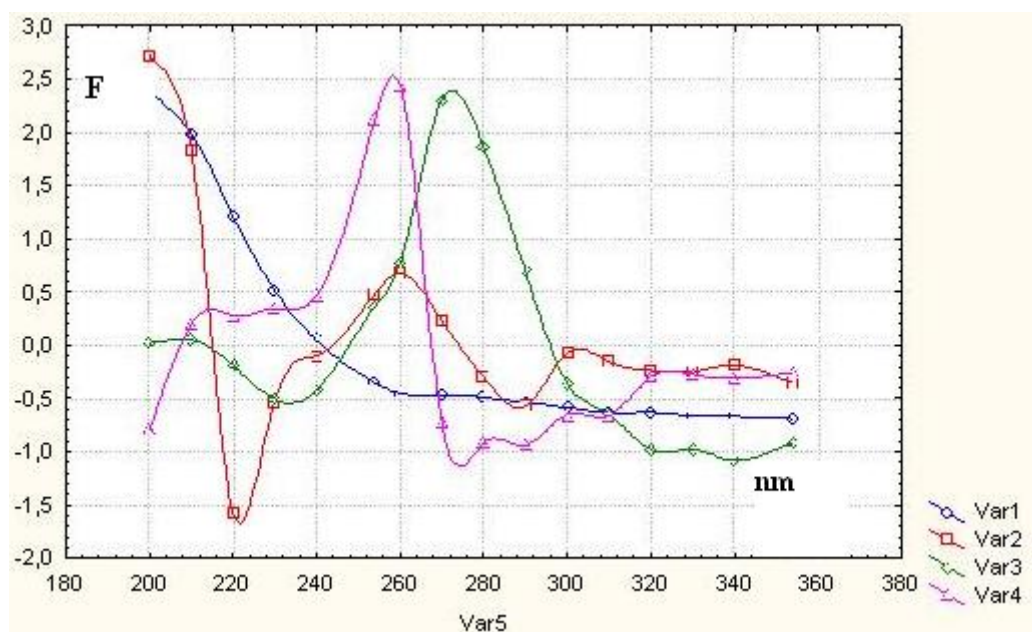


Рисунок 2 – Базовые линейно-независимые УФ-спектры вина «Каберне»
 По оси ординат – значения линейно-независимых факторов F_1 - F_4
 (аналог оптической плотности). По оси абсцисс – длины волн, нм.

Спектры Var1 – Var4 (рисунок 4) называются базовыми линейно-независимыми УФ-спектрами поглощения вина «Каберне». Любой участок хроматограммы (рис.1) является линейной комбинацией представленных спектров.

Матрица линейно-независимых факторов (таблица 2) является числовым образом представленного вина и является индивидуальной характеристикой вина, за исключением случая полной идентичности сравниваемых вин.

Сравнение исследуемого и контрольного образцов

При сравнении вин основным показателем сходства или различия был выбран коэффициент корреляции между факторами. Коэффициент корреляции R_{xy} показывает, насколько линейно-зависимыми являются сравниваемые величины, т.е. выполняется ли линейное уравнение:

$$Y(i) = a + b \cdot X(i), \quad (8)$$

где « a » и « b » – коэффициенты линейного уравнения;

$Y(i)$ и $X(i)$ – сравниваемые величины.

Чем меньше такой коэффициент корреляции, тем менее похожи сравниваемые объекты, чем больше – тем похожи больше.

Для определения критериев идентичности вин были получены хроматограммы одного и того же вина со сдвинутыми (за счет использования другого обращенно-фазового сорбента в колонках) значениями времен удерживания. В результате в качестве критериев идентичности были выбраны коэффициенты корреляции соответствующих факторов, полученных из разных хроматограмм одного и того же вина: для факторов F_1 не менее 0,998, для факторов F_2 не менее 0,98, для факторов F_3 – не менее 0,96. Фактор F_4 не рассматривался, так как его вклад сравним с ошибкой эксперимента.

Таким образом, полностью идентичным винами можно считать вина, для которых коэффициенты попарной корреляции факторов F_1 не ниже 0,99, F_2 – не ниже 0,98, F_3 – не ниже 0,96. Наоборот, вина считаются неидентичными, если хотя бы для одного фактора не выполняются указанные условия.

Критерии сходства могут быть установлены по Джаффе [8]: похожими могут считаться вина, для которых коэффициенты попарной корреляции соответствующих факторов находятся для F_1 в диапазоне 0,980 – 1,00, для F_2 – в диапазоне 0,940 – 1,00, для F_3 – в диапазоне 0,920 – 1,00.

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность применения метода главных компонент для получения линейно-независимых факторов из оптических плотностей многоволновых хроматограмм вин, предварительно превращенных в матрицу дискретных значений оптических плотностей элюата на разных длинах волн.

2. Получены критерии идентичности и сходства при сравнении факторов (параметров) исследуемого и контрольного вин.

3. Предложена процедура установления идентичности или подобия исследуемого образца вина контрольному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Словарь русского языка. Под ред. Евгеньева А.П. М.: Русский язык, 1983. – 750 с.
2. Лоули, Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1967. – 144 с.
3. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
4. Сычев, С.Н. Применение метода главных компонент (факторного анализа) для анализа хроматографических данных в ВЭЖХ / С.Н. Сычев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2004. – Т.4 – Вып.2 – С.134 – 142.
5. Пальм, В.А. Основы количественной теории органических реакций / В.А. Пальм. – Л.: Химия, 1977. – 359 с.
6. Мальцев, А.А. Молекулярная спектроскопия / А.А. Мальцев. – М.: Московский университет, 1980. – 272 с.
7. Сычев, С.Н. Универсальные элюенты в нормально-фазовой и обращенно-фазовой ВЭЖХ / С.Н. Сычев, К.С. Сычев // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2003. – Т.3. – Вып. 4. – С.23 – 25.
8. Jaffe H.H. Reexamination of the Hammett equation. Chem.Rev., 1953. – V.53. – N 2. – P.191-254.

Сычев Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия» ОрелГТУ
Тел. 8(486)41-98-92
E-mail: chemistry@ostu.ru

Гаврилина Вера Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, инженер лаборатории «Жидкостная хроматография»
Тел. 8(486)41-98-92
E-mail: chemistry@ostu.ru

В.Я. ХОРОЛЬСКИЙ, М.С. БОНДАРЬ, А.В. ЕФАНОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ЕЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ

В статье рассматривается усовершенствованный итерационный метод повышения быстродействия при выполнении операции коррекции погрешностей аналого-цифровых преобразователей. Приводится математический аппарат и количественная оценка результатов коррекции.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, погрешность преобразования, коррекция.

In article the advanced iterative method of operation speed increasing of errors correction of analogue-digital converters is considered. The mathematical apparatus and a quantitative estimation of correction results is presented.

Key words: the analogue-digital converter, a transformation error, correction.

В настоящее время широкое распространение получили три основных способа повышения точности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) цифровых измерительных устройств:

- технологический, заключающийся в разработке и совершенствовании существующих электронных элементов и функциональных узлов измерительного устройства;
- конструктивный, основанный на оптимизации схемотехнического построения основных узлов измерительного устройства;
- и наиболее перспективный – структурно-алгоритмический способ, направленный на то, чтобы за счет соответствующего построения измерительного процесса уменьшить результирующую погрешность до уровня, определяемого точностью образцовой меры.

Структурно-алгоритмический подход способствует улучшению функции преобразования АЦП за счет коррекции возникающих в процессе преобразования погрешностей [1]. Однако, недостатками операции коррекции погрешностей АЦП (в частности, наиболее эффективного итерационного метода касательных) являются сложность и низкая скорость сходимости процесса вследствие неоптимального способа определения производной функции преобразования АЦП. Это связано с тем, реальная функция преобразования АЦП $y = F(x)$ неизвестна из-за ее искажения аддитивной, мультипликативной и нелинейной составляющими погрешности, поэтому получаемый на выходе АЦП цифровой код y не в полной мере соответствует измеряемой величине x .

Согласно структурно-алгоритмической коррекции, после окончания процесса аналого-цифрового преобразования полученный код y_i запоминается в регистре памяти и подается на вход образцового цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), имеющего функцию преобразования $x_{0i} = \varphi(y_i)$. Затем с помощью АЦП кодируется выходной сигнал x_{0i} ЦАП, а полученный образцовый код $y_{0i} = F[\varphi(y_i)]$ запоминается в регистре памяти для последующего вычисления скорректированного результата преобразования y_{i+1} .

При реализации алгоритма коррекции $y_{i+1} = y_i - \gamma(i) \cdot \{F[\varphi(y_i)] - F(x)\}$ приходится ограничиваться линейной или нелинейной аппроксимацией производной обратной функции преобразования АЦП $F'[\varphi(y_i)]$, зависящей от функции преобразования $\varphi(y_i)$ цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). При этом производная функции преобразования $F'[\varphi(y_i)]$ используется для вычисления шага аппроксимации $\gamma(i) = 1/F'[\varphi(y_i)]$.

Согласно известному алгоритму, для коррекции результатов необходимо выполнять несколько $k = 1, 2, \dots$ итераций в каждом цикле преобразования [3].

Поэтому совершенствование операции коррекции погрешностей АЦП выделяется в самостоятельную задачу и требует разработки новых более эффективных методов.

При решении поставленной задачи было выполнено усовершенствование итерационного метода касательных, на основе линеаризации и использования известного из высшей математики метода Ньютона. При этом в качестве исходных параметров выбраны координаты, определяемые мгновенным значением x_{i-1} измеряемой величины и соответствующего ей выходного кода $f(x_{i-1}) = y_i$ в точке касания аппроксимирующей касательной линии к графику функции преобразования $y = F(x)$ реального АЦП.

Математический аппарат усовершенствованного итерационного метода выглядит следующим образом:

$$y = f(x_{i-1}) + f'(x_{i-1}) \cdot (y_{i.ск} - y_{i-1});$$

$$y_{i.ск} = y_{i-1} + \frac{y_i - f(x_{i-1})}{f'(x_{i-1})};$$

$$f'(x_{i-1}) = \frac{f(x_{i-1} + \Delta x) - f(x_{i-1})}{\Delta x} = \frac{y_{oi} - y_{oi}}{K};$$

$$y_{i.ск} = y_{(i-1)ск} + \frac{y_i - y_{oi}}{y_{oi} - y_{oi}} \cdot K \quad \text{или} \quad y_{i.ск} = y_{(i-1)ск} + \Delta_i, \quad (1)$$

где $y_{i.ск}$ – скорректированный код входного сигнала в i -й цикл преобразования;

y_i – результат цифрового измерения значения входного сигнала x_i ;

y_{oi}, y_{oi} – результаты аналого-цифрового преобразования первого x_{oi}^i и второго x_{oi}^i образцовых сигналов, формируемых с помощью ЦАП;

K – код аддитивной добавки;

Δ_i – значение i -й коррекции, приближающее решение к истинному значению x_i .

Выполнение последовательности таких операций позволяет наиболее оптимально определять производную функции преобразования АЦП (а значит, и шаг алгоритма), и упростить выражение (1) для определения скорректированного результата по сравнению с известными, более сложными итерационными способами [3, 4]. При этом получают скорректированные коды, которые определяются формулами:

$$y_{i.ск} = \frac{K}{y_{oi} - y_{oi}} \cdot (y_i - y_{oi} + \frac{y_{oi} - y_{oi}}{K} \cdot y_i) \quad \text{или} \quad y_{ск} = y_1 \cdot \left(\frac{2K}{y_3 - y_2} + 1 \right) - \frac{y_3 + y_2}{y_3 - y_2} \cdot K.$$

Достижимым при этом результатом является исключение методической погрешности, присущей методу касательных, и увеличение скорости сходимости процесса коррекции.

Для получения количественной оценки результатов коррекции погрешностей АЦП по предложенному усовершенствованному методу касательных проведено моделирование с использованием среды программирования Matchcad.

В ходе моделирования была проведена оценка влияния значений коэффициентов "K", "a", "b" и "c" обобщенной функции преобразования АЦП $F(x) = b + a \cdot x + c \cdot x^2$ на получаемые результаты коррекции при двух значениях $m \in [8; 12]$ разрядности АЦП.

Аналізу подверглось семейство аддитивно-мультипликативных функций преобразо-

вания АЦП, определяемых различными значениями коэффициентов "a", "b" и "c". При проведении анализа коэффициент "b" изменялся в диапазоне: [0; 0,1], а значения коэффициентов "a" и "c" выбирались из множеств: $a \in [0,7; 1; 1,1]$, $c \in [-0,23; 0,05; 0,1]$.

В процессе моделирования исследовано 10 функций, определяемых выражениями:

$$\begin{aligned}
 F_1(x) &= 0,7 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; & F_6(x) &= 0,1 + 0,7 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \\
 F_2(x) &= 1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; & F_7(x) &= 0,1 + 1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \\
 F_3(x) &= 1,1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; & F_8(x) &= 0,1 + 1,1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \\
 F_4(x) &= 0,7 \cdot x + 0,05 \cdot x^2; & F_9(x) &= 0,1 + 0,7 \cdot x + 0,05 \cdot x^2; \\
 F_5(x) &= 0,7 \cdot x + 0,1 \cdot x^2; & F_{10}(x) &= 0,1 + 0,7 \cdot x + 0,1 \cdot x^2;
 \end{aligned}$$

Графики некоторых функций приведены, в качестве примера, на рисунке 1.

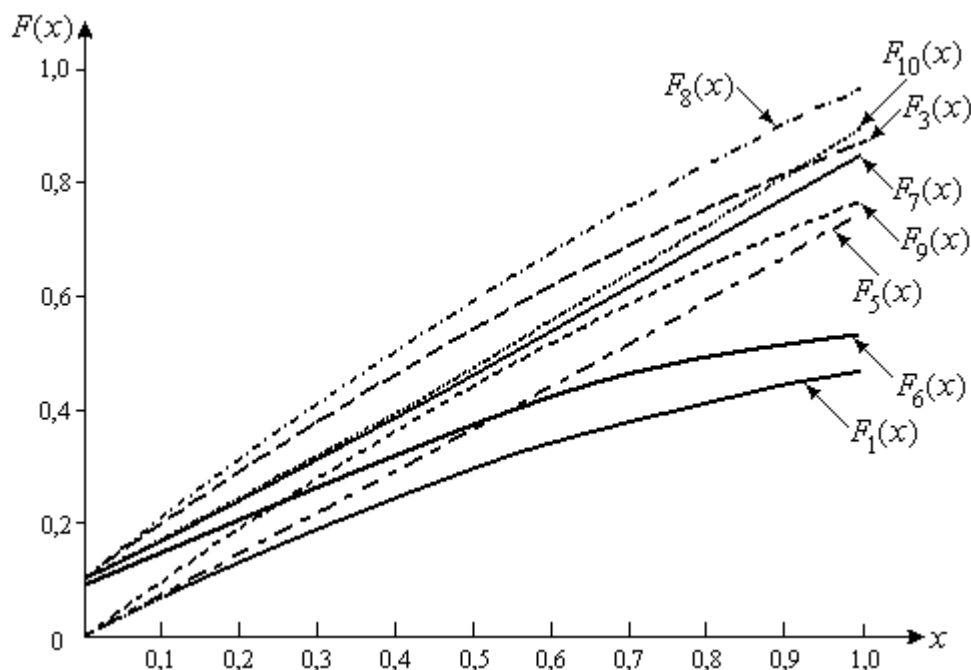


Рисунок 1 – Функции преобразования АЦП вида $F(x) = b + a \cdot x + c \cdot x^2$

Кроме того, оценено количество необходимых итераций, показанных в таблице 1.

Оценка проводилась для малого уровня входного сигнала ($x = 0,2$), среднего уровня входного сигнала ($x = 0,5$), высокого уровня входного сигнала ($x = 0,8$), а также для случая изменения уровня входного сигнала в диапазоне $x \in [0; 1]$ (рисунок 1).

Оценка результатов коррекции проводилась с использованием выражений (2)÷(4):

$$M = \sum_{j=1}^L y_{j.i.ck} / L, \tag{2}$$

где M – математическое ожидание значения скорректированного результата;
 j – номер выборки (в диапазоне изменения коэффициентов "a", "b", "c") в ходе коррекции;

L – число выборок;

$y_{i.ck}$ – скорректированное значение входного сигнала после i -й итерации;

$y_{j.i.ck}$ – скорректированное значение входного сигнала в j -й выборке.

$$D = \frac{L}{j=1} \sum (y_{j.i.ck} - M)^2 / (L-1), \quad (3)$$

где D – дисперсия отклонения скорректированного по выражению (1) значения $y_{i,ck}$ входного сигнала от его математического ожидания.

$$\delta_H = \sqrt{D} / \Delta_K, \quad (4)$$

где δ_H – нормированное значение среднего квадратического отклонения скорректированного значения входного сигнала от его математического ожидания;

Δ_K – шаг квантования АЦП, определяется выражением:

$$\Delta = 1 / (2^m - 1),$$

где m – число разрядов выходного кода АЦП.

Для наглядности сравнительной оценки эффективности применения усовершенствованного метода коррекции в таблице 1 используется нормированное значение среднего квадратического отклонения скорректированного результата кодирования входного сигнала от его математического ожидания, приведенное к величине шага квантования Δ_K (единице младшего разряда выходного кода АЦП) в соответствии с формулой (4).

Оценка параметров аналого-цифрового преобразования входного сигнала приведена в таблице 1 с учетом полос аддитивно-смещенных функций.

Таблица 1 – Оценка параметров преобразования входного сигнала в ходе коррекции

Уровень входного сигнала	Функция преобразования	Число разрядов АЦП	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$F_3(x)$	$F_4(x)$	$F_5(x)$
			$F_6(x)$	$F_7(x)$	$F_8(x)$	$F_9(x)$	$F_{10}(x)$
низкий $x = 0,2$	δ_H	8	0,332	0,332	0,322	0,332	0,558
		12	0,456	0,333	0,333	0,481	0,429
	число итераций	8	3				
		12	2				
средний $x = 0,5$	δ_H	8	0,963	0,834	0,827	0,827	0,827
		12	0,955	0,854	0,833	0,833	0,833
	число итераций	8	2				
		12	3				
высокий $x = 0,8$	δ_H	8	1,551	1,399	1,42	1,385	1,329
		12	1,412	1,404	1,372	1,333	1,333
	число итераций	8	3				
		12	3				

Согласно полученным расчетным данным (таблица 1), применение всего двух-трех итераций в процессе кодирования входной величины x позволяет уменьшить среднее квадратическое отклонение результатов на величину не более 0,3...1,5 шага квантования АЦП

При моделировании различных функций преобразования АЦП также оценивались погрешности полной шкалы δ_{FS} , смещения нуля δ_{OS} и нелинейности δ_N характеристики аналого-цифрового преобразования без коррекции и после проведения операции коррекции по усовершенствованному методу коррекции при использовании 8-ми и 12-ти разрядного АЦП.

В таблице 2 приведены результаты оценки для разных функций преобразования АЦП.

По результатам проведенного моделирования на рисунке 2 показаны оценки для наилучшего случая – функции преобразования АЦП $F_6(x)$ и усредненной функции $F_{cp}(x)$ АЦП, имеющего $m = 8$ разрядов. Они показывают возможность полного устранения погреш-

ности от смещения нуля АЦП и снижения погрешностей полной шкалы и нелинейности преобразования, составляющих в наихудшем случае 43,13% (110 единиц младшего разряда), до одной и четырех единиц младшего разряда после выполнения операции коррекции.

Таблица 2 – Сравнительная оценка погрешностей функций преобразования АЦП до и после проведения коррекции

Функция преобразования АЦП	Число разрядов АЦП	Погрешность (до коррекции/после коррекции)					
		полной шкалы δ_{FS}		смещения нуля δ_{0S}		нелинейности δ_N	
		[емр*],	(%)	[емр],	(%)	[емр],	(%)
$F_1(x)$	8	136	53,333	0	0	136	53,333
		3	1,176	0	0	3	1,176
	12	2171	53,016	0	0	2171	53,016
		2	0,049	0	0	3	0,073
$F_2(x)$	8	59	23,137	0	0	59	23,137
		-1	-0,392	0	0	1	0,392
	12	942	23,004	0	0	942	23,004
		0	0	0	0	2	0,049
$F_3(x)$	8	34	13,333	0	0	34	13,333
		1	0,392	0	0	1	0,392
	12	533	13,016	0	0	533	13,016
		1	0,024	0	0	2	0,049
$F_4(x)$	8	64	25,098	0	0	64	25,098
		0	0	0	0	1	0,392
	12	1024	25,006	0	0	1024	25,006
		0	0	0	0	1	0,024
$F_5(x)$	8	51	20	0	0	51	20
		-1	-0,392	0	0	1	0,392
	12	819	20	0	0	819	20
		0	0	0	0	1	0,024
$F_6(x)$	8	110	43,137	25	9,804	110	43,137
		1	0,392	0	0	3	1,176
	12	1761	43,004	409	9,988	1761	43,004
		0	0	0	0	4	0,098
$F_7(x)$	8	34	13,333	25	9,804	34	13,333
		0	0	0	0	2	0,784
	12	533	13,016	409	9,988	533	13,016
		0	0	0	0	2	0,049
$F_8(x)$	8	8	3,137	25	9,804	28	10,98
		0	0	0	0	1	0,392
	12	123	3,004	409	9,988	454	11,087
		0	0	0	0	1	0,024
$F_9(x)$	8	39	15,294	25	9,804	39	15,294
		0	0	0	0	1	0,392
	12	615	15,018	409	9,988	615	15,018
		0	0	0	0	2	0,049
$F_{10}(x)$	8	26	10,196	25	9,804	26	10,196
		1	0,392	0	0	1	0,392
	12	410	10,012	409	9,988	410	10,012
		0	0	0	0	2	0,049
$F_{cp}(x)$ (усредненная)	8	56,1	22	12,5	4,90	56,1	22
		0,3	0,118	0	0	0,6	0,235
	12	893,1	21,81	204,5	4,99	893,1	21,81
		0,3	0,007	0	0	0,8	0,02

емр* – единица младшего разряда АЦП

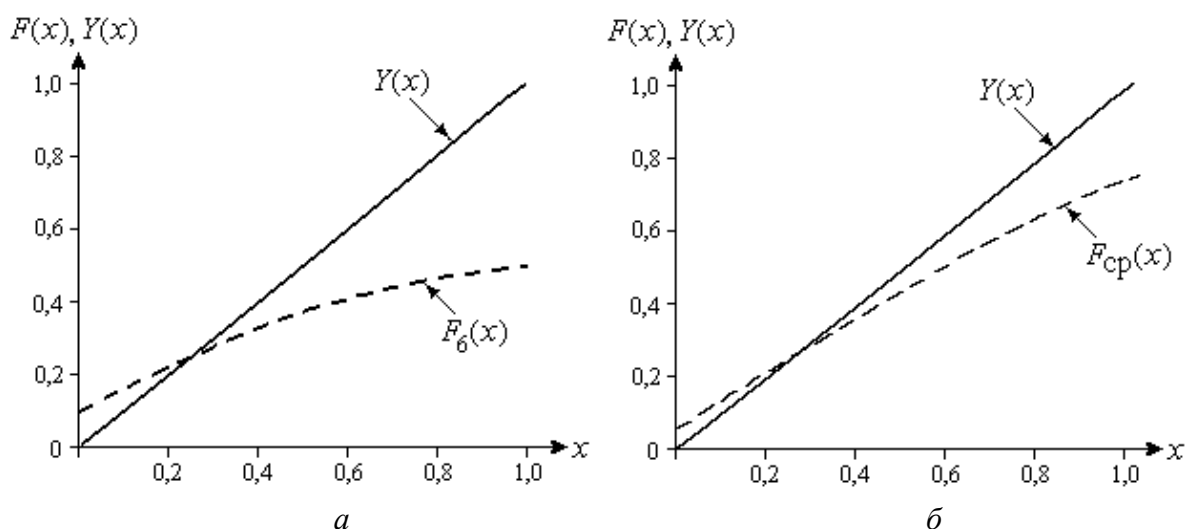


Рисунок 2 – Характеристики преобразования АЦП до коррекции $F(x)$ и после коррекции $Y(x)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С целью повышения быстродействия при выполнении операции коррекции погрешностей аналого-цифровых преобразователей выполнено усовершенствование итерационного метода касательных, основанного на линеаризации и использования известного из математики метода Ньютона.

2. Разработан математический аппарат усовершенствованного метода.

3. Количественная оценка результатов коррекции погрешностей по данному методу показала, что в случае применения 8-ми разрядного АЦП с погрешностью полной шкалы до 53% или 136 единиц младшего разряда (емр) после коррекции обеспечивается ее снижение до 3 емр (1,176% от полной шкалы); а при погрешности смещения нуля до 9,8% от полной шкалы (25 емр) обеспечивается ее полное устранение; при погрешности нелинейности до 6% от полной шкалы (15 емр) обеспечивается ее снижение до 3 емр (1,176% от полной шкалы).

4. В случае применения 12-ти разрядного АЦП точность коррекции будет еще выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, Т.М. Итерационные методы повышения точности измерений / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров, А.М. Шекиханов. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
2. Алиев, Т.М. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов / Т.М. Алиев, Л.Р. Сейдель. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
3. Патент РФ № 1714808, МПК⁸ Н03М 1/10. Способ коррекции погрешностей аналого-цифрового преобразования / Шаронов А. В., Мугаллимова О. М., Шаймарданов Ф. А. – Оpubл. 23.02.92. Бюл. № 7.

Хорольский Владимир Яковлевич

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета
 Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
 информационных систем электропривода и автоматики
 Тел. 8-(8652)-23-25-52

Бондарь Мария Сергеевна

Ставропольский военный институт связи
 Старший преподаватель кафедры технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления
 Тел. 8-(8652)-24-75-00

Ефанов Алексей Валерьевич

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета
 Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
 информационных систем электропривода и автоматики
 Тел. 8-(86554)-7-03-84
 E-mail: kea@nti.ncstu.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.118.7.05

Е.В. ПАХОЛКИН, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Н.Н. ФОКИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНОГО МАСЛА ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Описаны результаты экспериментальных исследований вязкостно-температурных свойств моторных масел. Приводятся результаты контроля проб моторного масла. Применен электрический метод контроля. Установлена корреляция полученных результатов с результатами стандартизованного метода.

Ключевые слова: контроль, вязкостно-температурные характеристики, моторное масло, электропараметрический метод.

Results of experimental researches of viscosity-temperature properties of engine oils are described. Results of the control of tests of engine oil are resulted. The electric quality monitoring is applied. Correlation of the received results with results of the standardised method is established.

Keywords: the control, viscosity-temperature characteristics, engine oil, electro parametrical method.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время при оценке эксплуатационных свойств моторных масел (ММ) рассматриваются вязкостные и вязкостно-температурные, химические, моющие, диспергирующие, стабилизирующие, солюбилизирующие, антиокислительные, противопенные, противозносные, противозадирные, антифрикционные, противокоррозионные, защитные и др. свойства. Проблема нашла отражение в трудах таких ученых, как А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвиевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский, С.В. Венцель, П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский, Р. Балтенас, Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец и др.

Анализ существующих методов контроля ММ [1 – 5] показал, что, не смотря на широкий перечень эксплуатационных свойств ММ, в качестве эффективных диагностических признаков и параметров выступает ограниченный перечень свойств, а большинство нормируемых показателей оценивается только в рамках контроля новой продукции, при этом они мало пригодны для реализации контроля ММ в процессе эксплуатации.

К числу одних из важнейших свойств ММ относятся вязкостно-температурные свойства, определяющие зависимость вязкости масла от температуры. В качестве параметра, характеризующего эти свойства, ГОСТ 25371-97 регламентирует индекс вязкости (ИВ), при этом метод контроля базируется на измерениях значений кинематической вязкости ММ по ГОСТ 33-2000 при двух температурах с последующим расчетом параметра и характеризуется высокой трудоемкостью, слабой степенью автоматизации при использовании простого лабораторного оборудования или значительными затратами на приобретение термостатируемых автоматических вискозиметров. Кроме того, метод требует сравнительно большого объема пробы ММ (десятки мл).

В [6] описан метод контроля вязкостно-температурных свойств ММ, заключающийся в создании для исследуемой пробы ММ условий фрикционного взаимодействия в испытательном трибосопряжении с последующей оценкой свойств ММ по значениям электрических диагностических параметров, характеризующих состояние смазки в зонах трения работающего трибосопряжения. Предпосылки для реализации такого метода следующие. Изменения температурного режима работы трибосопряжений приводят к определяемому вязкост-

но-температурными свойствами ММ изменению его вязкости, которая, в соответствии с положениями теории смазки, определяет толщину смазочного слоя в зонах трения. Температурные изменения толщины слоя приводят к флуктуации электрических параметров трибосопряжения, к числу наиболее применяемых из которых относятся различные характеристики электрического сопротивления.

Описанный в [6] алгоритм предусматривает измерение диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического контактирования» (НИВ) до и после нагрева испытательного трибосопряжения с пробой исследуемого масла. Приращение параметра, вызванное нагревом, сравнивается с приращением НИВ для пробы масла, принятого за эталонное. В соответствии с методом годным признается ММ если выполняется условие:

$$\frac{K_{д2}}{K_{д1}} \leq \frac{K_{б2}}{K_{б1}}, \quad (1)$$

где $K_{д2}$ – измеренное после нагрева значение параметра НИВ, характеризующее вероятность микроконтактирования в трибосопряжении с пробой контролируемого ММ;

$K_{б2}$ – измеренное после нагрева значение параметра НИВ, характеризующее вероятность микроконтактирования в трибосопряжении с пробой эталонного ММ;

$K_{д1}$ – измеренное на момент завершения приработки значение параметра НИВ, характеризующее вероятность микроконтактирования в трибосопряжении с пробой контролируемого ММ;

$K_{б1}$ – измеренное на момент завершения приработки значение параметра НИВ, характеризующее вероятность микроконтактирования в трибосопряжении с пробой эталонного ММ.

Выполнение условия (1) означает, контролируемое моторное масло обладает лучшими вязкостно-температурными характеристиками по отношению к эталонному моторному маслу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА

В работах [7 – 8] уже приводились экспериментальные зависимости, подтверждающие работоспособность данного метода и достоверность его теоретических положений. Существенный интерес представляет сопоставление предлагаемого электрического метода с известным стандартизованным. С этой целью в аккредитованной лаборатории были выполнены измерения кинематической вязкости пяти марок ММ при температурах 40 и 100 °С. По методике, регламентированной ГОСТ 25371-97, были установлены значения ИВ для каждого масла. Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 1. После этого были выполнены сравнительные исследования масел разработанным электрическим методом.

В качестве испытательного трибосопряжения использовались подшипники качения типа 1000900. Подшипники предварительно промывались и подвергались сушке. Исследования проводились при следующих условиях: объем внесенного смазочного материала составлял 30 мкл; частота вращения внутреннего кольца $n_b = 1800 \text{ мин}^{-1}$; радиальная нагрузка $F_r = 100 \text{ Н}$; температура до нагрева испытательного трибосопряжения $\Theta_1 = 30 \text{ °С}$; температура после нагрева $\Theta_2 = 100 \text{ °С}$.

Таблица 1 – Характеристики контролируемых проб ММ

Классификация моторного масла по SAE	Марка масла	Вязкость при 40 °С, сСт	Вязкость при 100 °С, сСт	Индекс вязкости
10w40	LUX-OIL	99,88	14,56	151
20w50	LUX-OIL	128,97	17,34	148
10w30	LUX-OIL	75,52	11,39	143
M-8B	OIL RIGHT	56,59	8,01	109
15w40	LUX-OIL	98,73	14,25	148

Для исследуемых проб ММ были проведены по 3 эксперимента с целью определения отношения $K_{д2} / K_{д1}$ при искусственном нагреве от Θ_1 до Θ_2 в соответствии с описанными выше условиями. В общей сложности было проведено 15 экспериментов с помощью программно-аппаратного комплекса, описанного в [6] и [9]. Результаты экспериментов приведены на рисунке 2. Полученная зависимость приращения $K_{д2} / K_{д1}$ хорошо описывается полиномом 2-й степени (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9993$):

$$K_{д2} / K_{д1} = 0,1197 \cdot \text{ИВ}^2 - 41,542 \cdot \text{ИВ} + 3557,6. \quad (2)$$

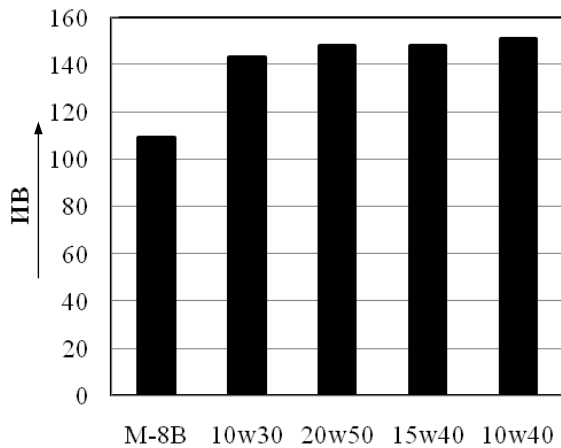


Рисунок 1 – Значение индекса вязкости для контролируемых смазочных материалов

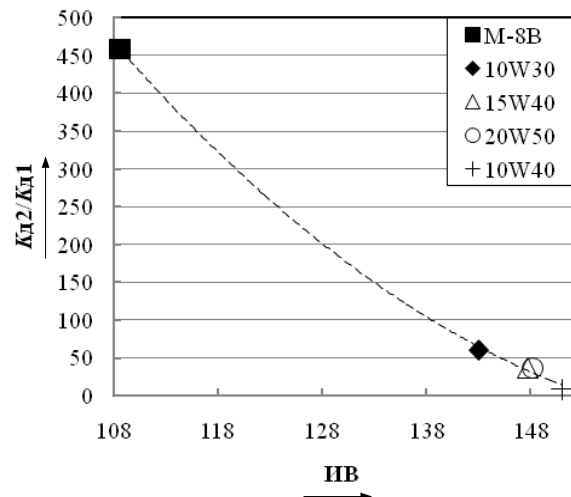


Рисунок 2 – среднее отношения $K_{д2} / K_{д1}$ для контролируемых образцов смазочных материалов с известным индексом вязкости ИВ

В соответствии с алгоритмом метода контроля ММ требуются результаты измерения диагностического параметра для эталонного масла. Так, например, принимая в качестве эталонного моторного масла материал 10W30 с ИВ, равным 143, в соответствии с рисунком 2, масло М-8В с индексом вязкости 109 можно признать бракованным, а масла 15W40, 20W50 и 10W40 можно признать годными. Оценка достоверности принятия такого решения описана в работе [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования доказывают работоспособность электрического метода контроля ММ по критерию вязкостно-температурных свойств. Несомненными преимуществами метода являются его меньшая трудоемкость, существенно меньшие объемы проб. С учетом метрологического анализа метода [10] можно также утверждать о его высокой чувствительности и удовлетворительной точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов [Текст] / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
3. Проблема подделок моторных масел [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lto.h1.ru>.
4. Колчин, А.В. Оперативная проверка качества и сортности топлива и масла [Электронный ресурс] / А.В. Колчин // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2004. – № 4. – Режим доступа: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040437.htm>.
5. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: Учеб. для вузов [Текст] / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374 с.
6. Пахолкин, Е.В. Электрический контроль вязкостно-температурных свойств моторных масел: теоретическое обоснование, алгоритм, программно-аппаратные свойства [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев, Н.Н. Фокин // Контроль. Диагностика, 2009. – № 7 (133).

7. Фокин, Н.Н. Нормирование и интерпретация результатов диагностирования вязкостно-температурных свойств моторных масел электрорезистивным методом [Текст] / Н.Н. Фокин // Известия ОрелГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2008. – № 3.

8. Пахолкин, Е.В. Методическое и программное обеспечение решения задач, связанных с оценкой несущей способности смазочного слоя свойства [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2009. – № 3.

9. Фокин Н.Н. Программно-аппаратный комплекс контроля вязкостно-температурных свойств моторных масел электропараметрическим методом / Н.Н. Фокин // Матер. всероссийской науч.-практ. конф. "Перспективы развития информационных технологий". – Новосибирск, 2010.

10. Пахолкин, Е.В. Анализ достоверности метода контроля вязкостно-температурных свойств моторных масел электропараметрическим методом / Е.В.. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2010. – № 2.

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)", код проекта 2.1.2/2075.

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 416684

E-mail: Eugene_P@bk.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862)419876

e-mail: asms-orel@mail.ru

Фокин Николай Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (4862) 416761

E-mail: alphabet2004@mail.ru

П.Н. ШКАТОВ, Е.А. ДЕРГУНОВА, С.М. БАЛАЕВ, В.И. ТРОНЗА,
Д.К. ФИГУРОВСКИЙ, А.Е. ВОРОБЬЕВА

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ Nb_3Sn ДЛЯ ИТЭР ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ

В работе была построена математическая модель критерия дефектности Nb_3Sn сверхпроводников для обмоток катушек тороидального поля магнитной системы Интернационального термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) при вихретоковом контроле и изучена зависимость величины сигнала от предполагаемого дефекта разных видов с частотой работы дефектоскопа. Также была проведена оценка использования вихревых токов для определения отношения медь/не медь.

Ключевые слова: ИТЭР, композиционные сверхпроводники, Nb_3Sn , вихревые токи.

Eddy current acceptability criterion of Nb_3Sn Toroidal Field superconductors for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) has been modeled and the correlation between a signal and frequency has been investigated in this paper. The possibility of eddy current using for measurement of Cu/non-Cu volume ratio has been also investigated.

Key words:

ВВЕДЕНИЕ

Современные технические многожильные сверхпроводники для магнитных систем представляют собой сложный композиционный материал, в котором помимо непосредственно сверхпроводящих элементов присутствует высоко тепло- и электропроводный материал. Это обусловлено тем, что проводники, работающие в магнитных полях, должны обладать высокой стабильностью. В качестве стабилизирующего компонента в сверхпроводниках на основе Nb_3Sn для магнитной системы Интернационального Термоядерного Экспериментального Реактора - ИТЭР [1], используется высокочистая бескислородная медь.

Российские проводники изготавливают по бронзовому методу [2]. Для получения таких проводников в высокооловянной бронзовой матрице (содержание олова ~ 14 масс.%) размещают ниобиевые волокна и методами горячего прессования и холодного волочения данный композит деформируют в провод диаметром 0,82 мм. Затем полученный провод подвергают длительной диффузионной термообработке при температурах 550 – 650⁰С для образования интерметаллического сверхпроводящего соединения Nb_3Sn , за счет взаимодействия олова из бронзовой матрицы с ниобиевыми волокнами. Для предотвращения диффузии олова в медную стабилизирующую оболочку ее отделяют от сверхпроводящей области проводника, ниобиевым или танталовым диффузионным барьером (рисунок 1).

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ГОТОВОГО ПРОВОДНИКА

Поскольку Nb_3Sn сверхпроводники используют в кабеле, то для снижения кооперативных потерь следует избегать их слипания между собой. Для этого на сверхпроводник наносят хромовое покрытие толщиной 1-2 мкм. Чистота поверхности готового сверхпроводника перед хромированием является обязательным условием для качественного нанесения покрытия. С другой стороны, наличие на поверхности или в приповерхностном слое проводника дефектов может спровоцировать деградацию электрофизических характеристик или ухудшение механических свойств материала, что в свою очередь может привести к обрывам проводника в процессе волочения или транспонирования. Поэтому недопустимо присутствие в проводнике дефектов в виде включений, сколов, трещин, закатов или выхода барьерного материала на поверхность проводника.

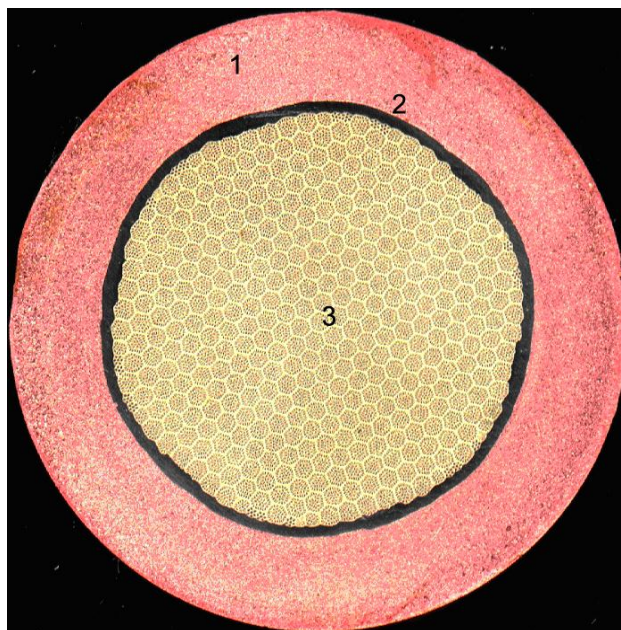


Рисунок 1 – Поперечное сечение сверхпроводника на основе Nb_3Sn , полученного по «бронзовой» технологии, диаметром 0,82 мм

Наиболее распространенным способом оценки чистоты и сплошности поверхности является вихретоковый контроль изделия. Этот способ является неразрушающим и позволяет проводить контроль провода непрерывно по всей длине.

Вихретоковый контроль основан на взаимодействии внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Распределение и плотность вихревых токов определяются источником электромагнитного поля, геометрическими и электромагнитными параметрами объекта контроля, а так же взаимным расположением источника поля и объекта контроля [3, 4].

Поскольку в год потребуется изготавливать около 25 тонн Nb_3Sn сверхпроводников (более 5 300 000 метров), ясно, что контроль должен проходить на больших скоростях (от 20 до 60 м/мин), в режиме автоматической разбраковки с высокой чувствительностью. Однако одной из наиболее актуальных задач является выбор оптимальной частоты тока возбуждения вихретокового преобразователя, которая дает максимальную разрешающую способность метода.

Для построения математической модели критерия дефектности провода были выбраны пять различных типов дефектов. Один из них представлял собой отверстие (несплошность), просверленное перпендикулярно поверхности провода, диаметром 0,3 мм и глубиной 0,2 мм. В качестве других четырех дефектов были выбраны инородные включения с различной магнитной проницаемостью $\mu - 1, 100, 300$ и 500 . Было принято, что включения располагаются под поверхностью медной стабилизации на глубине ~ 10 мкм. Геометрические размеры всех включений были одинаковыми – цилиндр диаметром 100 мкм и длиной 200 мкм. По результатам расчета построены зависимости величины ЭДС датчика от частоты для каждого дефекта (рисунок 2).

Представленный на рисунке 2 график показывает изменения уровня сигнала в зависимости от частоты для различных дефектов. Из графика видно, что при частотах менее 10 кГц сигнал от просверленного отверстия и включения с магнитной проницаемостью $\mu=1$ практически не различимы, в то время как сигнал от включений с более высокой магнитной проницаемостью высокий и почти не меняется до частоты 100 Гц. Контроль будет успешным в том случае, если мы сможем обнаруживать различные типы дефектов. Соответственно следует выбрать частоту, при которой уровень сигнала от дефекта позволит обнаружить как несплошности или включения со слабой магнитной проницаемостью, так и включения с высокой магнитной проницаемостью. Анализ графика, приведенного на рисунке 2, показывает, что оптимальная частота лежит в пределе от 100 до 200 кГц. Поэтому рабочую частоту вихретокового преобразователя установили на уровне 150 кГц.

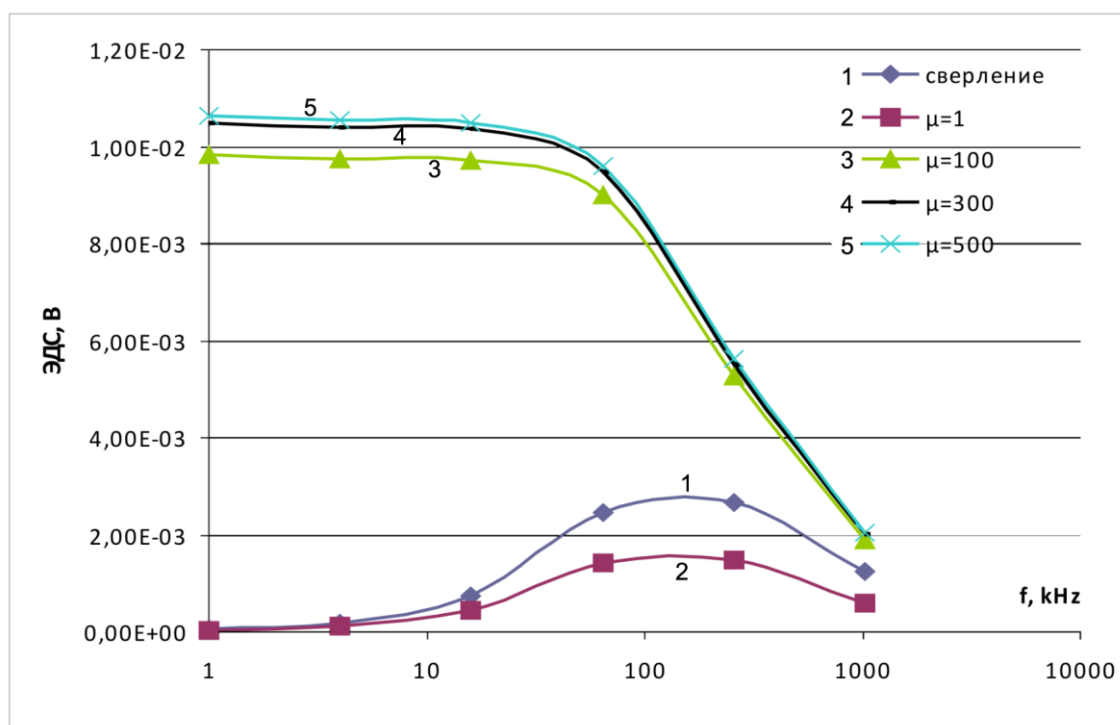


Рисунок 2 – Зависимость величины сигнала (ЭДС датчика) от рабочей частоты вихрекового преобразователя для дефектов с разной магнитной проницаемостью (1 – сверление, 2 – немагнитное включение, 3,4,5 – магнитные включения)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕДЬ/НЕ МЕДЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Во второй части работы была изучена возможность определения медь/не медь с использованием вихревых токов. Медный стабилизирующий слой является необходимым элементом сверхпроводников для крупных магнитных систем. Обладая высокой электропроводностью, и находясь в тесном механическом и тепловом контакте со сверхпроводящей сердцевиной провода, он способен отвести локальное выделение тепла.

Количество медной стабилизации должно строго соответствовать требованиям расчётчиков магнитной системы и быть стабильным по всей длине проводника, достигающей иногда нескольких километров. От точности определения количества меди зависит точность расчета одной из важнейших конструктивных критических характеристик – критической плотности тока, по которой проходит приемка продукции. Повышение объемной доли стабилизирующей меди неизбежно приводит к уменьшению размера токонесущей сердцевины стренда и, следовательно, к снижению критического тока. С другой стороны уменьшение доли стабилизирующей меди, хотя и повышает критический ток, приводит к снижению стабильности магнитной системы. В связи с этим количество меди в сверхпроводнике принято характеризовать специальным параметром - «медь/не медь», т.е. отношением объемных долей медной и немедной составляющих проводника. По требованию разработчиков проекта ИТЭР параметр «медь/не медь» должен составлять $1,0 \pm 0,1$.

Существуют различные методы определения отношения «медь/не медь» [5, 6]. Наиболее распространены весовой метод и метод компьютерного анализа изображения. Эти методы имеют высокую точность и хорошо отработаны, однако у них есть и недостатки. Так в обоих случаях необходимо использовать вредные и опасные кислоты, более того во всех случаях определение параметра проводится на небольшом образце относительно общей длины проводника, которая может достигать 20 километров. Помимо прочего эти методы контроля являются разрушающими, следовательно, невозможно проводить контроль по всей длине проводника без разрезки его на части. Однако в процессе длительного технологического передела могут возникать участки с нестабильным отношением медь/не меди. Для того

чтобы определять их длину, без ущерба для производительности, необходима методика непрерывного неразрушающего контроля этого параметра.

В данной работе было проведено исследование возможности применения неразрушающего бесконтактного метода вихретокового контроля для определения доли медной стабилизации, чтобы объединить его с контролем поверхности провода за одну операцию, избавившись при этом от необходимости пробоотбора образцов.

Применение вихревых токов для определения объемной доли меди возможно благодаря разнице в удельных электропроводностях внешней оболочки из высокочистой бескислородной меди (~1,7 мкОм·см) и сердцевины провода, состоящей из оловянистой бронзы, ниобия и тантала (~15,22 мкОм·см).

На первом этапе работы была оценена возможность использования вихревых токов для определения объемной доли медной стабилизации в заготовке, имеющей вид прутка диаметром 5,86 мм, с номинальным коэффициентом заполнения по меди (отношения объема медной части к объему всего образца) ~49%, чему соответствует номинальная толщина медной оболочки $T_{\text{мн}} = 0,85$ мм.

Для определения оптимальной частоты вихретокового преобразователя методом конечных элементов был проведен расчет напряжения $U_{\text{вн}}^*$, вносимого в проходной вихретоковый преобразователь при изменении частоты f в диапазоне от 500 Гц до 8 кГц (рисунок 3 и 4).

Напряжение $U_{\text{вн}}^* = U_{\text{вн}}/U_0$ нормировано по напряжению холостого хода U_0 . Толщина меди $T_{\text{м}}$ изменялась от 0,55 мм до 1,45 мм. Зависимости были построены при компенсации (установке нуля) на образце с номинальной толщиной меди равной $T_{\text{мн}}=0,85$ мм. Внешний диаметр прутка при расчетах считали постоянным, а изменялась лишь объемная доля стабилизирующей меди.

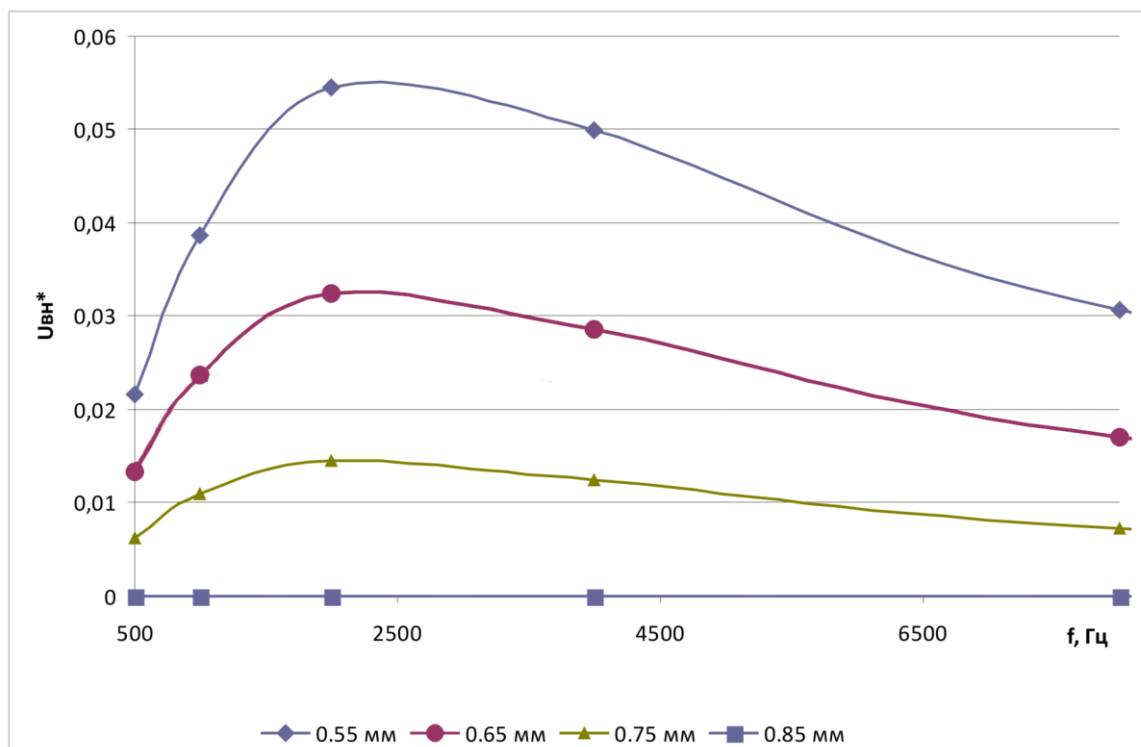


Рисунок 3 – Зависимость нормированного вносимого напряжения от рабочей частоты дефектоскопа для толщин медного слоя, меньших, чем номинальная толщина меди

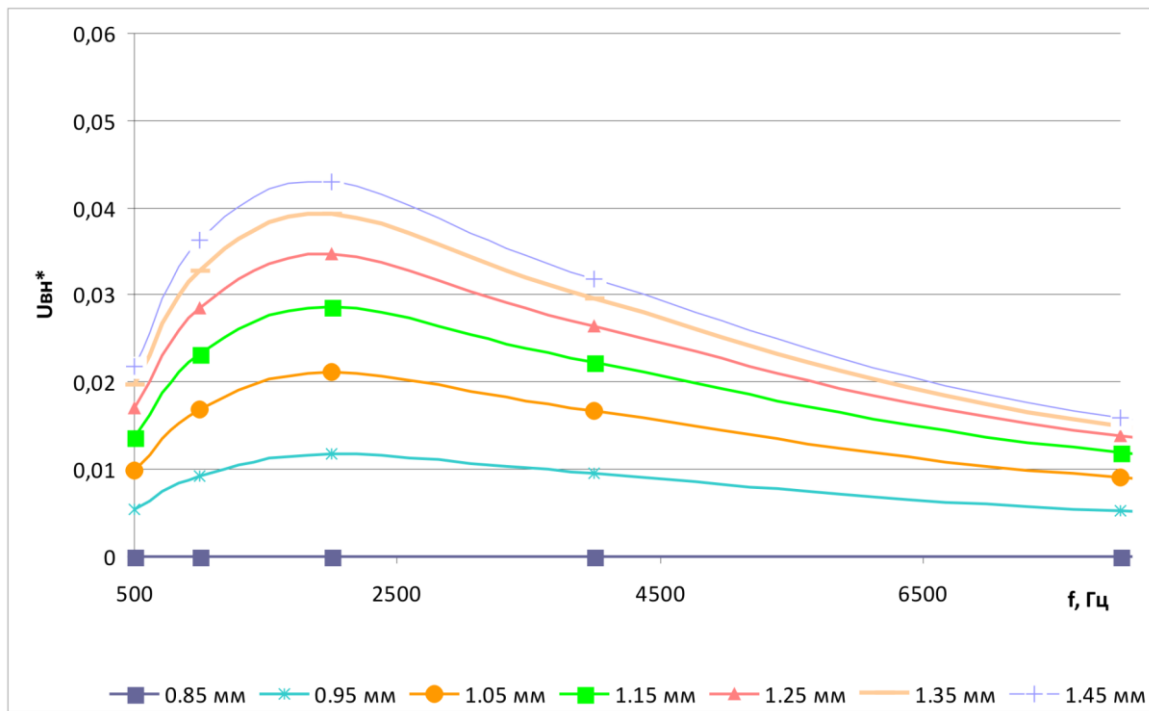


Рисунок 4 – Зависимость нормированного вносимого напряжения от рабочей частоты дефектоскопа для толщин медного слоя, больших, чем номинальная толщина меди

Анализ графиков 3 и 4 показывает, что при увеличении или уменьшении толщины медной оболочки увеличивается величина вносимого напряжения. Следует отметить, что чем больше разница между значением толщины медной оболочки и номинальным значением ($T_{\text{мн}}=0,85$ мм), тем выше значение вносимого напряжения (сильнее сигнал). Для различных толщин медной оболочки (0,55-1,45 мм) зависимость носит экстремальный характер, и максимум соответствует значению частоты $f = 2$ кГц. Таким образом, оптимальные условия контроля достигаются при частоте 2 кГц, так как при этой частоте достигается максимальная разрешающая способность метода, а соответственно и максимальная точность.

ВЫВОДЫ

1. Проведен расчет и построена зависимость величины сигнала от рабочей частоты дефектоскопа для разных дефектов, возникающих на поверхности Nb_3Sn сверхпроводников диаметром 0,82 мм.
2. На основании полученных результатов выбрана оптимальная частота тока возбуждения вихретокового преобразователя – 150 кГц.
3. Проведен расчет и построена зависимость величины сигнала от рабочей частоты дефектоскопа для Nb_3Sn сверхпроводников диаметром 5,86 мм с разной толщиной медной оболочки.
4. Определена оптимальная частота вихретокового преобразователя для контроля отношения медь/не медь в Nb_3Sn сверхпроводниках – 2 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиков, А.К. Разработка сверхпроводников для магнитной системы ИТЭР в России / А.К. Шиков, А.Д. Никулин, А.Г. Силаев, А.Е. Воробьева, В.И. Панцырный, Г.П. Ведерников, Е.А. Дергунова, Л.В. Потанина, Э.И. Плашкин, С.В. Судьев // Цветная металлургия. – 2003. – № 1
2. Способ изготовления композитного сверхпроводника на основе соединения Nb_3Sn : патент 2069399 Рос. Федерация / Никулин А.Д., Шиков А.К., Силаев А.Г., Воробьева А.Е., Давыдов И.И., Чукин А.М., Малафеева О.В., Панцырный В.И., Хлебова Н.Е., Беляков Н.А., Мареев К.А. – 1996.
3. Герасимов, В.Г. Неразрушающий контроль. книга 3 Электромагнитный контроль / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков. – Москва: Высшая школа. – 1992.

4. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / [П.И. Беда, Б.И. Выборнов, Ю.А. Глазков и др.]; под ред. Г.С. Самойлова. – Москва: Машиностроение, 1976.

5. T. Pyon, W.H. Wames, M. Siddall. Evaluation of Cu:SC ratio measurements by chemical etching, electrical resistivity, and image analysis, IEEE Transaction on applied superconductivity, vol. 3, no. 1. March 1993.

6. International standard IEC (International Electrotechnical Commission) 61788-12 Superconductivity – part 12: Matrix to superconductor volume ratio measure – Copper to non-copper volume ratio of Nb₃Sn composite superconducting wires, IEC, 2002-06.

Воробьева А.Е.

ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»
кандидат технических наук, зам. директора
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5А
Тел. +7 499 1908214,
E-mail: vor@bochvar.ru;

Дергунова Е.А.

ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5А
Тел. +7 499 1908717
E-mail: vor@bochvar.ru;

Балаев С.М.

ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»
аспирант, научный сотрудник
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5А
Тел.+7 499 1908081
E-mail: semyon2005@inbox.ru;

Тронза В.И.

ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»
аспирант, младший научный сотрудник
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5А
Тел.+7 499 1908081
E-mail:vladimir.tronza@gmail.com

Фигуровский Д.К.

ГОУ ВПО МГУПИ 107996, Москва, ул. Стомынка, д. 20
кандидат технических наук доцент
Тел.+7 499 2680051
E-mail: dkfigurov@bk.ru;

Шкатов П.Н.

ГОУ ВПО МГУПИ
доктор технических наук, профессор
107996, Москва, ул. Стомынка, д. 20
Тел.+7 903 6820269
E-mail:Petr_shkatov@mail.ru

Уважаемые авторы!

Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Подписано в печать 21.07.2010 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 8,2.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.