

ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

УДК 620.179.18:691

Канд. техн. наук, доц. Авдеев В.П., канд. техн. наук, доц. Меркулов Д.В., асп. Подушкин Н.Н.
(Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)
Россия, г. Воронеж, (4732)715270, E-mail: avp@vgasu.vrn.ru

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ПО ИХ ОТРАЖАЮЩИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

The possibility of usage of the reflecting characteristics of building materials and products for a radio wave non-destructive control of their quality is considered. The analytical relations are giving, on the basis of which the given method of a control can be constructed, and link of the different reflecting characteristics among themselves. The results of the experiments indicating high performance of the given method represented.

В работе [1] рассмотрены возможности использования в радиоволновых средствах неразрушающего контроля качества (НКК) строительных материалов и изделий (СМиИ) поляризационных характеристик СВЧ поля и, в частности, поляризационной матрицы рассеяния. Измерения элементов этой матрицы выполняют различными способами [2], всегда связанными с амплитудно-фазовыми измерениями в поляризационно-ортогональных каналах системы НКК. С точки зрения практической реализации способа измерения элементов матрицы рассеяния представляет интерес их связь с отражающими характеристиками объекта контроля (ОК). Отражающие характеристики ОК – это измеренные в поляризационно-ортогональных каналах комплексные коэффициенты отражения $\dot{\Gamma}_1(z)$ и $\dot{\Gamma}_2(z)$, зависящие от расстояния z в месте подключения измерительной аппаратуры. Исследуемый ОК при этом является нагрузкой системы НКК, которая представляется длинной линией. Физические явления в такой линии иллюстрируются схемой, представленной на рис. 1.

В схеме падающая электромагнитная волна (ЭМВ) произвольной поляризации, имеющая в общем случае зависимость от времени t и пройденного расстояния z , представляется комплексным вектором $\dot{\vec{E}}_n(t, z)$. Она распространяется в направлении, противоположном направлению оси Oz . В преобразователе Пр она разделяется на ортогонально поляризованные составляющие $\dot{\vec{E}}_{n1}(t, z)$ и $\dot{\vec{E}}_{n2}(t, z)$, направления движения которых также противоположно направлению оси Oz .

Нагрузка линии характеризуется в общем случае комплексным векторным импедансом $\dot{\vec{Z}}_n(z)$, составляющие которого в поляризационно-ортогональных каналах также можно характеризовать, соответственно, комплексными векторными импедансами $\dot{\vec{Z}}_{n1}(z)$ и $\dot{\vec{Z}}_{n2}(z)$. С учетом обозначений можем записать:

$$\dot{\vec{Z}}_n(z) = \dot{\vec{Z}}_{n1}(z) + \dot{\vec{Z}}_{n2}(z).$$

Поляризационно-ортогональные составляющие отраженной ЭМВ $\dot{\vec{E}}_o(t, z)$ представлены на схеме как $\dot{\vec{E}}_{o1}(t, z)$ и $\dot{\vec{E}}_{o2}(t, z)$. Их направления распространения совпадают с направлением оси Oz и являются положительными. Значение z в точке «0» считают равным нулю.

Вследствие интерференции ЭМВ $\dot{\vec{E}}_n(t, z)$ и $\dot{\vec{E}}_o(t, z)$ в прямо-передающем канале будет иметь место суммарная ЭМВ, характеризующаяся соотношением:

$$\dot{\vec{E}}(t, z) = \dot{\vec{E}}_n(t, z) + \dot{\vec{E}}_o(t, z). \tag{1}$$

Учитывая направления распространения отраженной и падающей ЭМВ и используя общую форму представления ЭМВ, запишем:

$$\dot{\vec{E}}_n(t, z) = (\vec{e}_1 \dot{E}_{n1} + \vec{e}_2 \dot{E}_{n2}) e^{j(\omega t - kz)}, \tag{2}$$

и

$$\dot{\vec{E}}_o(t, z) = (\vec{e}_1 \dot{E}_{o1} + \vec{e}_2 \dot{E}_{o2}) e^{j(\omega t + kz)}, \tag{3}$$

где \vec{e}_1, \vec{e}_2 – орты выбранного базиса разложения ЭМВ;

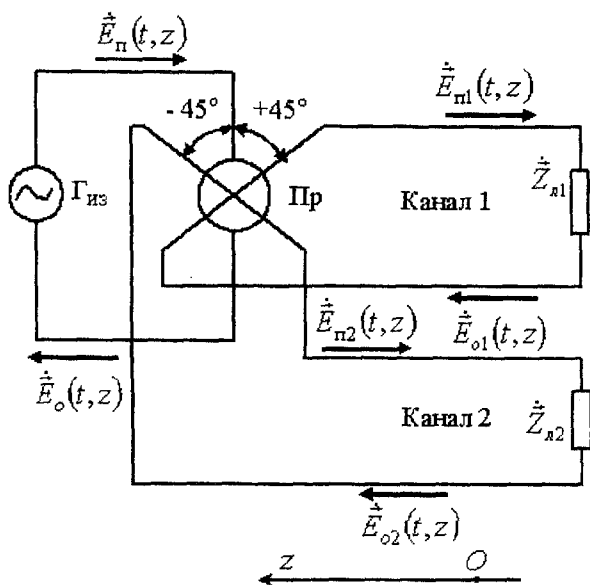


Рис. 1. Физическая модель взаимодействия электромагнитных волн в линии передачи

$\dot{E}_{n1} = |\dot{E}_{n1}|e^{j\varphi_{n1}}$, $\dot{E}_{n2} = |\dot{E}_{n2}|e^{j\varphi_{n2}}$ – поляризационно-ортогональные составляющие падающей ЭМВ, соответственно, в 1-м и 2-м каналах, $|\dot{E}_{n1}|$, $|\dot{E}_{n2}|$ и φ_{n1} , φ_{n2} – их амплитуды и фазы.

Аналогичные параметры для отраженной ЭМВ, т.е. $\dot{E}_{o1} = |\dot{E}_{o1}|e^{j\varphi_{o1}}$ и $\dot{E}_{o2} = |\dot{E}_{o2}|e^{j\varphi_{o2}}$.

Подставив (2) и (3) в (1), и преобразовав последнее, найдем:

$$\dot{E}(t, z) = \left[\begin{array}{l} \bar{e}_1 \dot{E}_{n1} \left(1 + \frac{\dot{E}_{o1}}{\dot{E}_{n1}} e^{j2kz} \right) + \\ + \bar{e}_2 \dot{E}_{n2} \left(1 + \frac{\dot{E}_{o2}}{\dot{E}_{n2}} e^{j2kz} \right) \end{array} \right] e^{j(\omega t - kz)}. \quad (4)$$

Для случая ортогонально-линейного разложения равенство (4) можно задать соотношением:

$$\dot{E}(t, z) = \left\{ \begin{array}{l} \bar{e}_x \dot{E}_{nx} [1 + \dot{\Gamma}_x(z)] + \\ + \bar{e}_y \dot{E}_{ny} [1 + \dot{\Gamma}_y(z)] \end{array} \right\} \cdot e^{j(\omega t - kz)}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\Gamma}_x(z) = \frac{\dot{E}_{ox}}{\dot{E}_{nx}} e^{j2kz}, \\ \dot{\Gamma}_y(z) = \frac{\dot{E}_{oy}}{\dot{E}_{ny}} e^{j2kz}. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Выражение (5) получено из (4) путем замены в последнем индексов «1» и «2» соответственно на «x» и «y». В (5) заложена информация об отражающих свойствах СМиИ в виде комплексных коэффициентов отражения $\dot{\Gamma}_1(z)$ и $\dot{\Gamma}_2(z)$. Эти коэффициенты в приемо-передающих каналах связаны между собой. Действительно, из (6) путем несложных преобразований находим:

$$\dot{\Gamma}_x = \dot{\Gamma}_y \cdot \frac{\dot{r}_n}{\dot{r}_o}, \quad (7)$$

где \dot{r}_n и \dot{r}_o – соответственно, комплексные параметры ортогонально-линейного разложения падающей и отраженной ЭМВ.

В выражении (7) зависимость коэффициентов отражения от z опущена в предположении, что расстояния до точек измерения коэффициентов отражения в каналах одинаковы. Это также соответствует условиям:

$$\dot{\Gamma}_x = \dot{\Gamma}_x(0), \quad \dot{\Gamma}_y = \dot{\Gamma}_y(0).$$

Обозначая за \dot{D} отношение комплексных коэффициентов отражения

$$\dot{D} = \frac{\dot{\Gamma}_y}{\dot{\Gamma}_x} \quad (8)$$

и подставляя его в (7), получим $\dot{r}_o = \dot{D} \cdot \dot{r}_n$.

Последнее равенство показывает, что комплексный коэффициент \dot{D} является коэффициентом деполаризации падающей ЭМВ.

Введем в рассмотрение обобщенную отражающую характеристику СМиИ – комплексный вектор отражения $\dot{\Gamma}$. Определим его как

$$\dot{\Gamma} = \bar{e}_x \dot{\Gamma}_x + \bar{e}_y \dot{\Gamma}_y. \quad (9)$$

Координаты вектора $\dot{\Gamma}$ в (9) связаны матричным равенством

$$\begin{pmatrix} \dot{\Gamma}_x \\ \dot{\Gamma}_y \end{pmatrix} = \frac{\dot{\Gamma}_y}{\dot{r}_o} \begin{pmatrix} \dot{r}_n \\ \dot{r}_o \end{pmatrix} = \frac{\dot{\Gamma}_x}{\dot{r}_n} \begin{pmatrix} \dot{r}_n \\ \dot{r}_o \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Равенство (10) позволяет представить вектор $\dot{\Gamma}$ через параметры поляризации падающей и отраженной ЭМВ и представить (9) в виде:

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{\Gamma}_x}{\dot{r}_n} (\bar{e}_x \dot{r}_n + \bar{e}_y \dot{r}_o) = \frac{\dot{\Gamma}_y}{\dot{r}_o} (\bar{e}_x \dot{r}_n + \bar{e}_y \dot{r}_o) \text{ или } \dot{\Gamma} = \lambda \dot{\Gamma}_o, \quad (11)$$

где $\lambda = \dot{\Gamma}_x / \dot{r}_n = \dot{\Gamma}_y / \dot{r}_o$.

$$\dot{\Gamma}_o = \bar{e}_x \dot{r}_n + \bar{e}_y \dot{r}_o. \quad (12)$$

Из (9), учитывая (10), (11), (12), можем также определить модуль и аргумент вектора $\dot{\Gamma}$ и представить их соотношениями:

$$|\dot{\Gamma}| = \frac{|\dot{\Gamma}_x|}{|\dot{r}_n|} \sqrt{|\dot{r}_n|^2 + |\dot{r}_o|^2} = \frac{|\dot{\Gamma}_y|}{|\dot{r}_o|} \sqrt{|\dot{r}_n|^2 + |\dot{r}_o|^2}, \quad (13)$$

$$\psi = \arctg \frac{\sqrt{|\dot{r}_n|^2 \sin^2 \delta_n + |\dot{r}_o|^2 \sin^2 \delta_o}}{\sqrt{|\dot{r}_n|^2 \cos^2 \delta_n + |\dot{r}_o|^2 \cos^2 \delta_o}} + \psi_x - \psi_y, \quad (14)$$

$$-\delta_n = \arctg \frac{\sqrt{|\dot{r}_n|^2 \sin^2 \delta_n + |\dot{r}_o|^2 \sin^2 \delta_o}}{\sqrt{|\dot{r}_n|^2 \cos^2 \delta_n + |\dot{r}_o|^2 \cos^2 \delta_o}} + \psi_y - \delta_o$$

где $|\dot{r}_n|$, δ_n – модуль и аргумент \dot{r}_n ,

$|\dot{r}_o|$, δ_o – модуль и аргумент \dot{r}_o .

Анализ полученных аналитических соотношений (7), (8), (11), (12), (13), (14) показывает, что в технических средствах НКК в качестве информативных параметров можно использовать отражающие характеристики ОК, измеренные приборами типа Р4-36, Р4-53.

Поляризационная матрица рассеяния ОК и его отражающие характеристики взаимосвязаны аналитически. Эту взаимосвязь можно установить, представляя физическую модель линии передачи в виде элементов цепи, как показано на рис. 2.

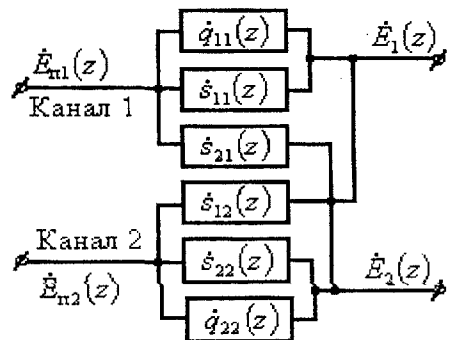


Рис. 2. Физическая модель линии передачи с учетом поляризационных характеристик СМиИ

Модель линии передачи, показанная на рис. 2, представляет собой цепь, в поляризационно-ортогональные каналы которой включены передаточные звенья. Коэффициенты передачи звеньев определяются элементами матриц рассеяния:

$$\dot{S}(z) = \begin{pmatrix} \dot{s}_{11}(z) & \dot{s}_{12}(z) \\ \dot{s}_{21}(z) & \dot{s}_{22}(z) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\dot{Q}(z) = \begin{pmatrix} \dot{q}_{11}(z) & 0 \\ 0 & \dot{q}_{22}(z) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Поляризационная матрица рассеяния (15) – это набор коэффициентов передачи виртуальной линии передачи, нагрузкой которой является ОК. Матрица передачи (16) – набор коэффициентов передачи реального приемо-передающего канала.

Для рассматриваемой цепи справедливо матричное равенство:

$$\begin{pmatrix} 1 + \dot{\Gamma}_1(z) & 0 \\ 0 & 1 + \dot{\Gamma}_2(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{E}_{n1}(z) \\ \dot{E}_{n2}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{q}_{11}(z) + \dot{s}_{11}(z) & \dot{s}_{12}(z) \\ \dot{s}_{21}(z) & \dot{q}_{22}(z) + \dot{s}_{22}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{E}_{n1}(z) \\ \dot{E}_{n2}(z) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Выполнив в (17) несложные преобразования, получим искомые зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_{11}(z) + \dot{s}_{12}(z) \cdot \dot{r}_n &= [1 - \dot{q}_{11}(z)] + \dot{\Gamma}_1(z), \\ \dot{s}_{21}(z) + \dot{s}_{22}(z) \cdot \dot{r}_n &= \dot{r}_n [1 - \dot{q}_{22}(z)] + \dot{r}_n \dot{\Gamma}_2(z). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Зависимость параметров от z в (18) и далее для простоты опущена.

Если потери в приемо-передающем канале небольшие ($\dot{q}_{11} = \dot{q}_{22} \approx 1$), то зависимости (18) преобразуются к виду:

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_{11} + \dot{s}_{12} \cdot \dot{r}_n &= \dot{\Gamma}_1, \\ \dot{s}_{21} + \dot{s}_{22} \cdot \dot{r}_n &= \dot{r}_n \dot{\Gamma}_2. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

С учетом (19) коэффициент деполаризации (8) можно представить соотношением:

$$\dot{D} = \frac{\dot{\Gamma}_2}{\dot{\Gamma}_1} = \frac{\dot{s}_{22} + (\dot{s}_{21}/\dot{r}_n)}{\dot{s}_{11} + \dot{s}_{12}\dot{r}_n}. \quad (20)$$

Полученные зависимости (19), (20) позволяют определить элементы поляризационной матрицы рассеяния и коэффициент деполаризации при известных значениях \dot{r}_n . Для их определения будем использовать прямой метод измерения [2].

Прямой метод предполагает измерения при двух различных поляризациях \dot{r}_{n1} и \dot{r}_{n2} падающей ЭМВ. Для этого метода из равенств (19) получаем систему уравнений относительно \dot{s}_{ik} ($i, k = 1, 2$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Gamma}_{11} &= \dot{s}_{11} + \dot{s}_{12} \cdot \dot{r}_{n1}, \\ \dot{r}_{n1} \dot{\Gamma}_{21} &= \dot{s}_{21} + \dot{s}_{22} \cdot \dot{r}_{n1}, \\ \dot{\Gamma}_{12} &= \dot{s}_{11} + \dot{s}_{12} \cdot \dot{r}_{n2}, \\ \dot{r}_{n2} \dot{\Gamma}_{22} &= \dot{s}_{21} + \dot{s}_{22} \cdot \dot{r}_{n2}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где $\dot{\Gamma}_{11}$, $\dot{\Gamma}_{21}$ и $\dot{\Gamma}_{12}$, $\dot{\Gamma}_{22}$ – соответственно, коэффициенты отражения, измеренные при падающих ЭМВ с \dot{r}_{n1} и \dot{r}_{n2} .

Решая ее, найдем значения элементов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_{11} &= \frac{\dot{r}_{n1} \dot{\Gamma}_{12} - \dot{r}_{n2} \dot{\Gamma}_{11}}{\dot{r}_{n1} - \dot{r}_{n2}}, \dot{s}_{12} = \frac{\dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{12}}{\dot{r}_{n1} - \dot{r}_{n2}}, \\ \dot{s}_{21} &= \dot{r}_{n1} \dot{r}_{n2} \frac{\dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21}}{\dot{r}_{n1} - \dot{r}_{n2}}, \dot{s}_{22} = \frac{\dot{r}_{n1} \dot{\Gamma}_{21} - \dot{r}_{n2} \dot{\Gamma}_{22}}{\dot{r}_{n1} - \dot{r}_{n2}}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Соотношения (22) показывают, что для измерения элементов поляризационной матрицы рассеяния необходимо знать параметры поляризации падающей ЭМВ \dot{r}_{n1} и \dot{r}_{n2} , а также измерять при этом комплексные коэффициенты отражения в каналах $\dot{\Gamma}_{ik}$ ($i, k = 1, 2$).

Таблица 1 – Эффективность ЭС «Радиоконтроль» при различных поляризационных параметрах ЭМВ

Номер	$ \dot{r}_{n1} $	δ_{n1} , град	$ \dot{r}_{n2} $	δ_{n2} , град	Годограф вектора электрического поля	Эффективность ЭС, %
1	1	120	1	300		92
2	1	0	1	180		92
3	1	90	1	270		94
4	1	45	1	135		89
5	1	0	1	90		91
6	2	90	0,5	270		91

Из (21) видно, что для одних и тех же значений параметра \dot{s}_{ik} ($i, k = 1, 2$) коэффициенты отражения имеют функциональную зависимость вида:

$$\dot{\Gamma}_{ik} = f(\dot{r}_{nk}).$$

Это значит, что при изменении поляризации падающей ЭМВ можно варьировать отражающие характеристики ОК и использовать это явление для повышения информативных возможностей рассматриваемого радиоволнового метода. Для подтверждения данного вывода по результатам экспериментальных исследований [3] были проведены соответствующие расчеты.

При использовании двух ЭМВ с коэффициентами $|\dot{r}_{n1}| = 1$, $\delta_{n1} = 120^\circ$ и $|\dot{r}_{n2}| = 1$, $\delta_{n2} = 300^\circ$, измерены мат-

рицы рассеяния ОК (керамической плитки), составивших обучающее множество для экспертной системы «Радиоконтроль» [4]. Затем с их помощью проведено «обучение» системы распознаванию типовых дефектов ОК.

Зная элементы матриц рассеяния \hat{s}_{jk} и параметры поляризации ЭМВ \hat{r}_{n1} и \hat{r}_{n2} по формулам системы (21) можно получить значения комплексных коэффициентов отражения $\hat{\Gamma}_{jk}$ для данных \hat{r}_{n1} и \hat{r}_{n2} . Кроме того, подставляя в (21) произвольные значения \hat{r}_{n1} и \hat{r}_{n2} , можно получить соответствующие им значения $\hat{\Gamma}_{jk}$.

В таблице 1 представлены результаты указанных расчетов для различных значений параметров поляризации. Для каждого набора таких значений было проведено обучение ЭС «Радиоконтроль» и рассчитана ее эффективность (процент правильно принятых решений о типе дефекта ОК из обучающего множества).

По данным таблицы можно сделать следующий вывод. ЭС оказалась наиболее эффективной (94 %) при использовании в качестве информативных параметров коэффициентов отражения,

рассчитанных для падающих ЭМВ с круговыми поляризациями (3-я строка в таблице). Это подтверждает идею, высказанную в [5], где «...предлагается использовать зондирующую волну круговой поляризации, для которой ориентация трещин не имеет значения».

Литература:

1 Информационные технологии XXI века: методы, модели, средства контроля и технологии в задачах строительства и обучения / Под общ. ред. А.М. Болдырева, ВГАСУ. – Воронеж, 2002. – 164 с.

2 Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.

3 Меркулов Д.В. Экспертная система для автоматизации радиоволнового неразрушающего контроля качества строительных материалов и изделий. // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2003. – №4. – С. 58–63.

4 Авдеев В.П. Экспертная система «Радиоконтроль» / В.П. Авдеев, Д.В. Меркулов, А.В. Распопов. – М.: ВНИИЦ, 2002 – № 50200200079.

5 А.С. 1180765 А СССР, МКИ¹ G 01 N 22/02. Устройство для обнаружения трещин / Н.Н. Пунько. – № 3723069/24-09. – Опубл. 23.09.85, Бюл. №35.

УДК 620.179

Канд. техн. наук, доц. Богданов Н.Г., асп. Плотников С. Н.
(Академия ФСО России),
Россия, г. Орел, тел. (4862)415300; E-mail: nic_506@orel.ru

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ КОНТРОЛЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

In article the device for the automated quality assurance of building designs by a vibrating method is described. Application of the microprocessor allows to provide an allowable error of measurements, and also to make quality assurance of various products on several to parameters.

При изготовлении строительных и машиностроительных конструкций, обследовании зданий и сооружений, подлежащих реконструкции, особое место уделяется вопросам контроля качества в процессе изготовления, а также технической диагностике их состояния в процессе эксплуатации. В настоящее время, согласно нормативным документам, рекомендуется проведение выборочных разрушающих испытаний, которые являются малоэффективными и не обеспечивают требуемой достоверности результатов контроля. Применение современных методов неразрушающего вибрационного контроля [1] является весьма актуальным научным направлением исследований в области управления качеством строительной продукции, а также позволяет реализовать ее достоверный контроль в процессе эксплуатации.

Предлагаемый прибор, реализующий основные функции вибрационного контроля качества, основан на фундаментальных закономерностях строительной механики и позволяет автоматически оценивать кон-

тролируемые прочностные параметры по частоте резонансных механических колебаний. Применение такого прибора дает возможность исследовать ряд показателей качества изделия, однозначно связанных с основной частотой колебаний. Функциональная схема прибора приведена на рис. 1.

Принцип действия прибора основан на измерении амплитуды и частоты затухающих колебаний, возникающих в контролируемой конструкции после ударного механического воздействия. Полученные значения амплитуды и длительности каждого периода механических колебаний контролируемого изделия регистрируются по двум каналам первичными вибрационными преобразователями, в качестве которых применены интегральные акселерометры типа ADXL105 фирмы Analog Devices. Для уменьшения уровня электрических шумов и повышения амплитуды сигналов на выходах акселерометров установлены активные низкочастотные фильтры (ФНЧ) на микромощных усилителях типа КР140УД1208.

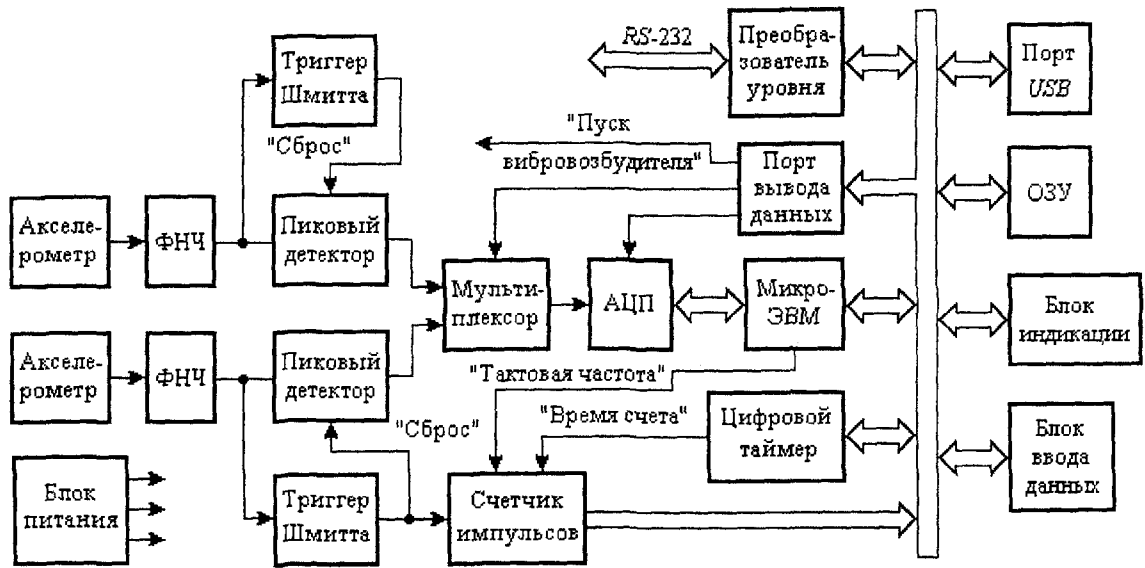


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорного прибора для виброчастотного контроля

Амплитуда каждого колебания, пропорциональная величине виброперемещения, по двум измерительным каналам выделяется и запоминается активными пиковыми детекторами, выходные сигналы которых поочередно коммутируются двухканальным мультиплексором и преобразуются в параллельный двоичный код быстродействующим 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Контроль частоты механических колебаний выполняется посредством цифрового измерения каждого периода электрического сигнала в одном из каналов преобразования. Из гармонических сигналов, поступающих с выходов низкочастотных фильтров, с помощью триггеров Шмитта формируются импульсы прямоугольной формы. В течение каждого периода T_{Xj} импульсы высокой тактовой частоты f_0 суммируются в цифровом счетчике, на выходе которого формируется двоичный код $N_{Xj} = T_{Xj} f_0$. В микро-ЭВМ вычисляется мгновенное значение резонансной частоты колебаний $f_{Pj} = 1/N_{Xj}$, а также определяется ее среднее значение f_P за интервал времени измерения, задаваемый цифровым таймером.

Ввод необходимых данных в энергонезависимую оперативную память (ОЗУ) однокристалльной микро-ЭВМ (информации о конструктивных параметрах контролируемых объектов, значения коэффициентов, применяемых при расчетах прочностных характеристик и т.п.) выполняется с помощью клавиатуры перед проведением цикла контроля. Полученные результаты вибрационных испытаний выводятся на табло блока индикации посредством стандартного интерфейса. Полученная информация о параметрах колебаний контролируемого объекта подвергается обработке процессором однокристалльной микро-ЭВМ, который используется также для управления процессом измерения.

Результаты цифровых измерений динамических параметров и рассчитанные по ним значения показателей качества контролируемого объекта накаплива-

ются в энергонезависимом ОЗУ. При необходимости регистрации результатов контроля накопленные в ОЗУ данные могут быть выведены на внешнюю ЭВМ или печатающее устройство через порты интерфейса RS-232 или USB.

Согласование выходных уровней сигналов, формируемых однокристалльной микро-ЭВМ, со стандартными уровнями сигналов интерфейса RS-232 осуществляется преобразователем уровня напряжения, а реализация протокола шины USB производится микросхемой порта USB.

С целью автоматического выделения двух контролируемых параметров – резонансной частоты и логарифмического декремента затухания колебаний – в каждом измерительном канале прибора производится кодирование амплитуды каждого колебания с помощью мультиплексора и АЦП с последующим разрядом пикового (амплитудного) детектора выходным сигналом триггера Шмитта. Расчет декремента затухания выполняется в микро-ЭВМ посредством вычисления разности амплитуд соседних колебаний с учетом длительностей периодов или частоты колебаний.

Алгоритм работы микроконтроллера определяется программным обеспечением, хранимым в энергонезависимой внутренней Flash-памяти программ микро-ЭВМ. Ввод и коррекция программного управления всеми функциональными узлами прибора реализуется посредством параллельного порта вывода.

Питание акселерометров и электронных блоков прибора осуществляется от интегрального стабилизатора на переключаемых конденсаторах, обеспечивающего высококачественную стабилизацию напряжения питания (+5 В) от одного автономного гальванического элемента с напряжением 1,5 В. Для повышения универсальности в приборе имеется стандартный разъем для подключения внешнего стабилизированного блока питания, обеспечивающего работу прибора от сети переменного тока.

Использование двух идентичных каналов измерения позволяет реализовать разделение регистрируе-

мых колебаний на изгибающую и крутильную компоненты посредством перпендикулярного размещения акселерометров на контролируемом объекте. Для расширения функциональных возможностей в приборе предусмотрена возможность двукратного наращивания числа измерительных каналов, которая обеспечивается применением микросхемы четырехканального мультиплексора и быстродействующего АЦП.

Наличие жидкокристаллического графического индикатора и реализация алгоритма задания расчетных коэффициентов в диалоговом режиме позволяют значительно упростить эксплуатацию прибора и обеспечить возможность его применения для контроля различных видов механических колебаний.

Реализация различных алгоритмов расчета прочностных параметров типовых строительных конструкций (жесткости, трещиностойкости и т.п.) по ре-

зультатам измерений частоты и амплитуды затухающих колебаний, расчет показателей качества контролируемого изделия, передача (вывод) результатов измерений на внешнюю ПЭВМ или на печатающее устройство осуществляются посредством специализированного программного обеспечения микро-ЭВМ. Программным способом можно также реализовать цифровую фильтрацию регистрируемых сигналов, что позволит существенно снизить влияние различных наводок и помех на результаты измерения.

Литература:

1 Патент № 2097727 РФ, МПК G 01 M 7/02. Способ неразрушающего контроля качества готового железобетонного изделия / В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев. Опубл. 10.11.97. – Бюл. № 33, 1997.

УДК 621.3.082.62:6

Канд. техн. наук, доц. Ногачева Т.И., асп. Кузнецова Е.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms@mail.ostu.ru

ЛОКАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

There were examined different schemes for measuring thermo-electric capacity (TEC) of materials. Experimental data's analysis revealed great precision of thermo-electric method. Dispersion of measuring results was from 10^{-7} to 10^{-8} . TEC's fluctuations of different material's surface layers were from 2 to 3 orders greater. In order to increase precision of determination of different physical quantities which correlate with the TEC necessary to enlarge measuring's locality.

Прочность и износостойкость металлических элементов механизмов и машин во многом зависит от однородности свойств их поверхностных слоев. Неоднородности обычно связаны с локальными дефектами, которые имеют пониженную сопротивляемость нагрузкам и износу. Поэтому контроль неоднородности рабочих (поверхностных) слоев материалов элементов механизмов и машин весьма важен для оценки состояния этих изделий. Основными требованиями, предъявляемыми к устройствам контроля, являются использование неразрушающих методов и возможность выявления в результате контроля дефектов структуры, имеющих малую площадь, т.е. метод контроля должен обеспечивать одновременно высокую локальность и чувствительность.

Механические методы контроля твердости поверхностных слоев являются разрушающими и поэтому непригодны. К неразрушающим методам относят электрические методы: магнитный, вихретоко-

вый, индуктивный, емкостной и термоэлектрический. Магнитный, вихретоковый, индуктивный и емкостной методы обеспечивают хотя и различную, но достаточно высокую чувствительность. Однако они не удовлетворяют требованию высокой чувствительности при условии локальности контроля из-за габаритных размеров первичных преобразователей.

Вышеуказанным требованиям отвечает термоэлектрический метод, при котором на контролируемую поверхность опускается электрод, образующий с поверхностным слоем полустественную термопару. В зависимости от структурного состояния каждого отдельного микроучастка поверхностного слоя термоэлектрическая способность (ТЭС) этих участков имеет различные значения, обусловленные химическим составом, структурой, в том числе ее дефектами, и микрогеометрией поверхности. Площадь соприкосновения термоэлектрода с контролируемой поверхностью может быть очень малой ($0,01 \text{ мм}^2$ и меньше). Кроме

того, в ряде работ приводятся сведения о наличии корреляционных связей между ТЭС, магнитными и некоторыми механическими свойствами материалов.

Как показал анализ возможных схем устройств контроля ТЭС поверхностных слоев материалов, деталей, изделий и образцов, такие исследования можно проводить на установках, реализующих одну из трех схем, представленных на рис. 1.

Во всех этих схемах контролируемая поверхность объекта контроля (ОК) подвергается местному нагреву до некоторой заданной температуры специальным нагревательным элементом НЭ. Измерительный прибор PV1 присоединяется к ОК с помощью двух наконечников Н1 и Н2, изготовленных из одного и того же материала. Причем наконечник Н1 обычно жестко связан с ОК, а наконечник Н2, именуемый измерительным, может свободно перемещаться в вертикальном и в горизонтальном направлениях. В установках используется также искусственная стандартная термопара ТП для определения по показаниям прибора PV2 температуры контролируемой поверхности в зоне нагрева.

Термо-ЭДС E , измеряемая вольтметром PV1, имеет три составляющие:

$$E = E_1 + E_2 + E_3, \tag{1}$$

где E_1, E_3 – соответственно, термо-ЭДС, возникающие в точках контакта наконечников Н1 и Н2 с контролируемой поверхностью ОК;

E_2 – термо-ЭДС, обусловленная неоднородностью ТЭС вдоль ОК на участке L между Н1 и Н2.

$$E_1 = (S_n - S_{m1})\theta_1, \tag{2}$$

$$E_2 = \int_0^L \theta_{(l)} dS_{m(l)}, \tag{3}$$

$$E_3 = (S_{m2} - S_n)\theta_2, \tag{4}$$

где S_n – ТЭС материала наконечников Н1 и Н2;

S_{m1} и S_{m2} – ТЭС материала образца в точках его контакта с наконечниками Н1 и Н2;

$S_{m(l)}$ – распределение ТЭС материала образца ОК вдоль его длины l ;

L – длина участка образца ОК между наконечниками Н1 и Н2;

θ_1 и θ_2 – соответственно, температуры в точках контакта Н1 и Н2 с материалом образца ОК.

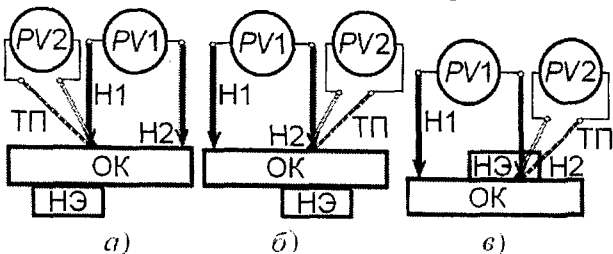


Рис. 1. Схемы исследования ТЭС: а и б – с нижним подогревом в области наконечников Н1, жёстко связанного с ОК, и Н2; в – с подогревом непосредственно в зоне контакта наконечника Н2 с ОК

В первой схеме (рис. 1, а) нагрев образца осуществляется около точки контакта наконечника Н1 с контролируемой поверхностью. Поэтому при достаточно больших значениях температуры θ_1 в этой точке контакта значения термо-ЭДС E_1 также достаточно велики даже при малых значениях $(S_n - S_{m1})$, а значения термо-ЭДС E_3 , напротив, малы, так как температура θ_2 в точке контакта измерительного наконечника Н2 мала (обычно она равна температуре окружающей среды). Преимуществом этой схемы является то, что наиболее высокий градиент температуры имеет место в области точки контакта наконечника Н1 с ОК, и поэтому влиянием флуктуаций $S_{m(l)}$ остальной части образца можно пренебречь, что позволяет считать значение термо-ЭДС E_2 практически постоянным. Однако из-за малых значений термо-ЭДС E_3 эту схему применять нецелесообразно.

В схеме на рис. 1, б нагрев осуществляется в области расположения измерительного наконечника Н2, но с противоположной стороны ОК. В этом случае в измерительной цепи температура в области контакта Н2 значительно выше, чем в предыдущем случае и поэтому значения термо-ЭДС E_3 много больше, чем в первой схеме.

Максимальное значение температуры в области контакта измерительного наконечника Н2 с объектом контроля, а соответственно и максимальное значение термо-ЭДС E_3 , может быть получено при использовании схемы представленной на рис. 1, в, когда НЭ расположен с той же стороны, что и наконечник Н2.

При использовании двух последних схем в случае перемещения измерительного наконечника Н2 вдоль поверхности образца значение термо-ЭДС E_2 несколько изменяется за счет неоднородности материала образца, вызывающей флуктуации значений $S_{m(l)}$.

При исследованиях распределения ТЭС по поверхности образца одним из важнейших требований является воспроизводимость результатов измерения. Для ее оценки проводились серии многократных измерений в одной и той же точке поверхности ОК. При этом электрическая цепь разрывалась после каждого измерения за счет подъема вверх наконечника Н2. При следующем измерении наконечник Н2 должен был опускаться на контролируемую поверхность в ту же самую точку, однако избежать смещения точки контакта было невозможно. Дисперсия показаний прибора PV1 обусловлена факторами:

- случайной погрешностью прибора PV1;
- непостоянством температур в точках контакта наконечников Н1 и Н2 с поверхностью ОК;
- смещением положения контакта наконечника Н2 на поверхности ОК относительно предыдущей точки и, соответственно, различием значений ТЭС материала образца S_{m2} в точках контакта;
- флуктуациями значений силы прижатия наконечника Н2 к поверхности ОК при каждом измерении.

С целью уточнения возможностей термоэлектрического метода проанализированы результаты экспериментальных работ, связанных с его использованием.

В работе [1] было проведено исследование повторяемости результатов измерения термоэлектрическим методом, реализованным на установке, схема которой приведена на рис. 2. Эта установка соответствует схеме, показанной на рис. 1, б, и отличается от неё тем, что в качестве наконечников Н1 и Н2 используются спаи стандартных хромель-копелевых термопар 2 и 3 типа ТХК и ХК (L). Измерительный прибор PV1 включен между копелевыми электродами стандартных термопар ТП2 и ТП3. Эти термопары служат для определения по показаниям вольтметров PV2 и PV3 температур в точках контакта наконечников Н1 (термопара 3) и Н2 (термопара 2) с контролируемой поверхностью ОК 1, изготовленного из стали 45 ГОСТ 1050-90. Кроме того, для обеспечения надежного контакта термопары 2 и 3 прижимались к контролируемой поверхности с усилием $P = 2,5$ Н при помощи пружин 5. В зоне контакта наконечника Н2 устанавливался асбестовый конус 4 для уменьшения теплоотдачи от контролируемой поверхности в окружающую среду и обеспечения равенства температур поверхностного слоя и наконечника. Для плавной регулировки температуры нагревательного элемента 6 использовался ЛАТР 7 модели Э30.

При определении распределения ТЭС материала по поверхности ОК 1 необходимо было точно фиксировать координаты точек, в которых проводились измерения. Для этого на контролируемой поверхности образца 1 была нанесена сетка, ячейки которой представляли собой квадраты размером 5x5 мм.

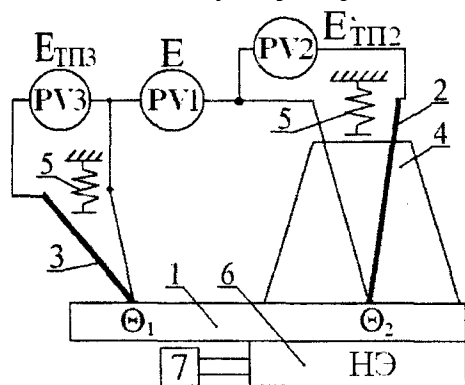


Рис. 2. Схема экспериментальной установки [1]

Исследования с помощью описанной установки проводились по следующей методике. Перед началом эксперимента нагревательный элемент выводился на установившийся режим работы. Время установления этого режима определялось в ходе предварительного исследования. Затем спай термопары 2, устанавливался в центр квадрата, подлежащего исследованию. Измерения проводились после выравнивания температур поверхности пластины и рабочего спаи термопары. Момент выравнивания температур определялся по постоянству показания вольтметра PV1, соответствующего постоянству значения термо-ЭДС полустественной термопары контролируемая поверхность – копелевый электрод. Фиксировались показания вольтметров PV3 и PV2, соответст-

вующие значениям термо-ЭДС, возникающих в двух стандартных термопарах и характеризующих температуру в точках установки наконечников Н1 и Н2 на исследуемой пластине:

$$E_{ТП2} = S_{\text{хк}} \cdot (\Theta_2 - \Theta_3), \quad (5)$$

$$E_{ТП3} = S_{\text{хк}} \cdot (\Theta_1 - \Theta_3), \quad (6)$$

где $S_{\text{хк}}$ – термоэлектрическая чувствительность термопар ТХК ХК (L);

Θ_1, Θ_2 – соответственно, температуры в точках контакта ОК с наконечниками Н1 и Н2.

Температуры Θ_1 и Θ_2 в соответствии с выражениями (5) и (6) равны:

$$\Theta_1 = E_{ТП3} / S_{\text{хк}} + \Theta_3, \quad (7)$$

$$\Theta_2 = E_{ТП2} / S_{\text{хк}} + \Theta_3. \quad (8)$$

где Θ_3 – температура окружающей среды.

Расчеты, связанные с показаниями прибора PV1:

$$E = S_{\text{мк}} (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (9)$$

проводились в предположении, что во всех точках исследуемой поверхности ТЭС одинакова и имеет некоторое усредненное значение, которому соответствует термоэлектрическая чувствительность полустественной термопары $S_{\text{мк}}$. Значение $S_{\text{мк}}$ в контролируемой точке рассчитывалось по выражению, полученному путем подстановки (7) и (8) в (9):

$$S_{\text{мк}} = \frac{E}{E_{ТП2} - E_{ТП3}} \cdot S_{\text{хк}}. \quad (10)$$

После этого термопару 2 поднимали вверх и затем через некоторый промежуток времени вновь опускали в контрольную точку, ожидали постоянства показаний всех трех вольтметров, регистрировали их и рассчитывали новое значение $S_{\text{мк}}$. Подобным образом измерения повторялись 10 раз. По описанной методике были проведены измерения термоэлектрической чувствительности полустественной термопары во всех ячейках координатной сетки.

Как показал анализ результатов обработки экспериментальных данных для двух произвольно выбранных в качестве примера точек рассчитанные дисперсии $D_{E_{ТП2}}$ и $D_{E_{ТП3}}$ составили для одной точки $4,176 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2$ и $1,393 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2$, а для второй точки – соответственно $1,492 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2$ и $4,047 \cdot 10^{-5} \text{ мВ}^2$. Эти дисперсии обусловлены случайными погрешностями измерительных приборов PV2, PV3 и непостоянством температур Θ_1 и Θ_2 . Кроме того, большие значения дисперсии $D_{E_{ТП2}}$ могут быть объяснены также непостоянством усилия прижатия измерительного наконечника при каждом повторном измерении.

Дисперсии термоЭДС полустественной термопары D_E и её термоэлектрической чувствительности

$D_{S_{mk}}$ составили для первой точки $2,462 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2$ и $1,955 \cdot 10^{-8} \text{ мВ}^2/\text{°C}^2$ и для второй – $2,114 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2$ и $1,254 \cdot 10^{-7} \text{ мВ}^2/\text{°C}^2$. Дисперсии D_E и $D_{S_{mk}}$ в свою очередь, обусловлены не только указанными выше причинами, но и смещением наконечника Н2 при повторных измерениях. Малое значение дисперсий $D_{S_{mk}}$ для обеих точек по сравнению с дисперсиями измеряемых термо-ЭДС может быть объяснено взаимной корреляцией величин, входящих в уравнение (10), используемое для расчета значения S_{mk} .

Так как при повторных измерениях установ наконечника Н2 всегда осуществлялся в одну и ту же точку координатной сетки, которой соответствует некоторое усредненное значение ТЭС, и с одним и тем же усилием прижатия, то его смещением можно пренебречь, а влияние усилия прижатия не учитывать.

Полученные результаты оценки среднего значения S_{mk} для обеих точек указывают на корреляционную связь величин, входящих в уравнение (10), и на хорошо воспроизводимость результатов оценки S_{mk} .

Исследование термоэлектрической чувствительности по поверхности указанной выше стальной пластины было проведено в 432 точки. Среднее значение термоэлектрической чувствительности составило $0,0115 \text{ мВ}/\text{°C}$, а дисперсия значений этой величины – $1,248 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}^2/\text{°C}^2$. Рассчитанное значение дисперсии $D_{S_{mk}}$ превышает на 3-4 порядка дисперсию этой же величины, полученной при многократных измерениях в одной и той же точке, и поэтому не может быть объяснено погрешностью метода. Флуктуации термоэлектрической чувствительности S_{mk} в этом случае обусловлены термоэлектрической неоднородностью исследуемого материала – электрода полустественной термопары. Аналогично в [1] проведены исследования ТЭС сталей марок У8 и 60С2, позволившие выявить сильную корреляционную связь между ТЭС сталей и их поверхностной твердостью (коэффициент корреляции для этих марок сталей не менее 0,92).

На рис. 3 представлена экспериментально полученная зависимость между ТЭС исследуемого материала и его поверхностной твердостью, хорошо аппроксимируемая экспоненциальной функцией вида:

$$H = a + b \cdot \exp(-S_{mk}/c), \quad (11)$$

где H – твердость поверхностного слоя материала;
 S_{mk} – ТЭС исследуемого материала;
 a, b и c – коэффициенты, зависящие от природы контролируемых материалов.

Для сталей коэффициенты равны: $a = 2302,6 \pm 230,26$; $b = 0,01129 \pm 0,001$; $c = -0,00113 \pm 0,0001$.

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных значений твердости от аппроксимирующей кривой равно $47,713 \text{ Н}/\text{мм}^2$, наибольшая абсолютная погрешность аппроксимации составила $\pm 47,25 \text{ Н}/\text{мм}^2$, относительная – не более $\pm 2\%$. Относительная погрешность определения твердости поверхностных слоев сталей по их ТЭС не превышала 12%.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о возможности использования нераз-

рушающего термоэлектрического метода контроля для определения твердости поверхностных слоев металлов, сплавов и изделий из них по значениям ТЭС контролируемых материалов.

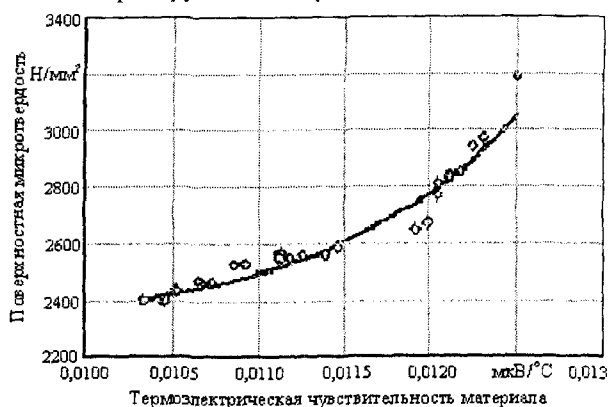


Рис. 3. Экспериментальная зависимость между термоэлектрической чувствительностью материала и его поверхностной твердостью

В работе [2] для оценки воспроизводимости также были проведены серии многократных измерений в одной и той же точке на поверхности ОК. Исследование проводилось на установке, принцип действия которой соответствует схеме, изображенной на рис. 1, б. Данная установка отличается от установки, приведенной на рис. 2, тем, что наконечником Н1 являлся сам ОК в точке его контакта с соединительным проводом, а в наконечником Н2 – электрод из алюминиевой проволоки, используемой при изготовлении термопары ТХА ХА(К). Между ними включался измерительный прибор Р/1 (модель В7-21А). Температура холодного конца ОК в точке его контакта с соединительным проводом контролировалась термометром 3 (ТМ3-3 ГОСТ 112-78). В качестве ОК была выбрана поверхность стальной трубы, используемой для изготовления колец подшипника. Анализ экспериментальных данных показал, что порядок $D_{S_{mk}}$, измеренной в одной и той же точке, составлял $10^{-7} - 10^{-8} \text{ мВ}^2/\text{°C}^2$, т.е. результаты работы [2], полученные с целью оценки воспроизводимости многократных измерений, аналогичны результатам работы [1].

На описанной установке были проведены исследования распределения S_{mk} естественной термопары сталь – баббит в 36 точках. Среднее значение S_{mk} этой термопары составило $0,0064 \text{ мВ}/\text{°C}$, дисперсия ее значений $D_{S_{mk}} = 1,34 \cdot 10^{-6} \text{ мВ}^2/\text{°C}^2$. Как и в предыдущем случае, флуктуации S_{mk} , определяемой в различных точках поверхности трубы, обусловлены термоэлектрической неоднородностью материалов, образующих естественную термопару.

Кроме того, в [3] были проведены исследования возможности применения термоэлектрического метода естественной термопары для определения температуры вспышек в зоне контактирования тел качения и колец приборных подшипников, работающих без смазки. Так как длительность температурных вспышек составляет $10^{-8} - 10^{-10} \text{ с}$, следовало оценить инерционность самих естественных термопар с целью вы-

явления возможности их применения для исследований. Инерционность естественных термопар определяется подвижностью электронов, и их постоянная времени лежит в диапазоне 10^{-11} - 10^{-12} с. Поэтому с помощью естественных термопар можно наблюдать колебания температур в диапазоне частот до 10^{12} Гц. Как правило, диапазон исследуемых частот ограничивает измерительная электронная аппаратура.

При экспериментах использовался запоминающий осциллограф С8-19, на входе которого установлен АЦП. Осциллограф обеспечивал последовательное запоминание и воспроизведение исследуемых сигналов за период, соответствующий четырем оборотам вала. Использование этого осциллографа позволяло синхронизировать начало записи термо-ЭДС с углом поворота вала путем использования фотоэлектрического преобразователя, фиксирующего начальное положение каждого оборота. Сравнение полученных реализаций значений термо-ЭДС за четыре оборота вала позволило выделить основные периодические составляющие и оценить степень влияния случайных составляющих на результаты измерений.

Значение генерируемой в зоне трения термо-ЭДС составляло единицы мВ. Изменение этого значения на 1 мВ, равное минимальному шагу квантования запоминающего осциллографа, при средней термоэлектрической чувствительности исследуемой естественной термопары $5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ соответствует изменению температуры в зоне трения на 200°C . Для уменьшения шага квантования измерительной установки сигнал от естественной термопары предварительно усиливался с помощью усилителя У4-28.

Проведенные исследования показали, что измеренные значения термоЭДС могут превышать их среднее значение не более чем на 50-70 %, а это означает, что превышение температуры в зоне вспышек превосходит разности средней температуры в зоне трения и температуры окружающей среды не более, чем в 5 раз. При температуре окружающей среды 20°C и средней температуре в зоне трения 70°C , рассчитанной по средним значениям термо-ЭДС и $S_{\text{МК}}$ естественной термопары, зонам вспышек соответствуют температуры порядка $400 - 500^\circ\text{C}$.

Таким образом, предварительно определив закон распределения по периоду оборота вала подшипника значений $S_{\text{МК}}$ исследуемой естественной термопары, составленной материалами элементов трения, и сопоставляя с ним распределение по тому же периоду оборота вала значений термо-ЭДС, генерируемых в зоне контактирования фрикционных элементов и измеренных в течение малых интервалов времени (время измерения цифровых электронных приборов составляет $10^{-9} - 10^{-11}$ с), можно значительно уменьшить эффект усреднения результатов определяемой температуры. По значениям термо-ЭДС, резко отличающихся от их среднего значения, и соответствующим значениям $S_{\text{МК}}$ можно приближенно определить температуру вспышек в зоне трения, а по частоте проявления всплесков термо-ЭДС можно оценить

вероятность появления вспышек температуры [4]. В настоящее время этот метод является единственным, позволяющим экспериментально получить информацию о температуре вспышек в зоне трения.

В рассматриваемых ниже работах реализована схема исследования ТЭС поверхности ОК с подогревом непосредственно в зоне контакта поверхности с наконечником Н2, представленная на рис. 1, в.

В работе [5] было предложено измерительное устройство, схема которого аналогична схеме, приведенной на рис. 2. Контролируемым объектом 1 в этой схеме являлась поверхность пластины, изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т. В точке контроля, кроме наконечника Н2, представляющего собой спай стандартной хромель-копелевой термопары, устанавливался нагреватель с регулируемым источником питания. Температуру горячего контакта и холодного конца пластины измеряли стандартными термопарами. Между копелевыми электродами термопар включался прибор РВИ (модель Щ 301-1).

Для исследования термоэлектрических свойств различных, предварительно заданных точек пластины в разработанной установке были предусмотрены специальные узлы, осуществляющие взаимное относительное перемещение горячего электрода и пластины. Заданное значение и точность перемещений обеспечили посредством микрометрических винтов. Холодные концы термопар для обеспечения постоянства температур были помещены в термостат.

Посредством механизмов позиционирования пластину перемещали в заданную позицию так, чтобы исследуемая точка оказалась под наконечником горячего электрода. Отсчет координат точек осуществлялся по шкалам механизмов перемещения. Далее, посредством эксцентрикового механизма, горячий электрод плавно опускался на пластину до соприкосновения с контролируемой точкой. Горячий электрод выдерживался в прижатом к пластине состоянии до установления стационарного теплового режима, т.е. до установления стабильных показаний вольтметров, которые регистрировались в стационарном тепловом режиме. Горячий электрод плавно поднимали, после чего пластину перемещали в следующую позицию и процесс измерения повторяли.

По результатам измерений рассчитывалась относительная $S_{\text{МК}}$ материала в контролируемой точке:

$$S_{\text{МКотн}} = \frac{S_{\text{МК}}}{S_{\text{ХК}}} = \frac{E}{E_{\text{ТП3}} - E_{\text{ТП2}}} \quad (12)$$

Проведенный анализ полученных в работе [6] экспериментальных данных показал хорошую воспроизводимость результатов измерения $S_{\text{МК}}$, аналогичную предыдущим работам.

При исследовании распределения $S_{\text{МКотн}}$ по поверхности пластины, изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т, получены результаты: среднее значение $S_{\text{МКотн}} = 0,22219$, ее дисперсия: $1,394 \cdot 10^{-6}$. Малое значение дисперсии объясняется малой термоэлектрической неоднородностью сплава Д16Т.

Исследования, проведенные для сплава Д16Т, показали, что под действием циклического нагружения его ТЭС возрастает (рис. 4), причем скорость нарастания зависит от амплитуды циклических напряжений и числа циклов, определяющих относительный уровень накопленных повреждений ψ (рис. 5).

Чувствительность ТЭС сплава Д16Т к изменению уровня накопленных повреждений тем выше, чем больше амплитуда циклических напряжений (рис. 6), однако диапазон уровня поврежденности при этом значительно уменьшается.

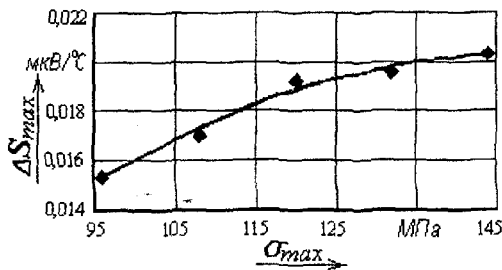


Рис. 4. Зависимость предельного значения ТЭС от амплитуды циклического напряжения

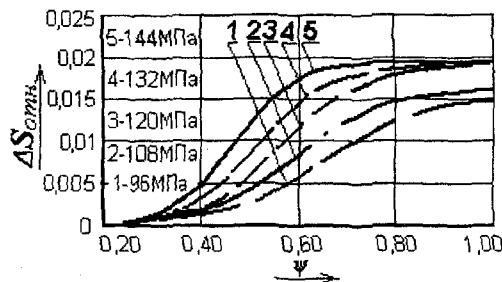


Рис. 5. Графики изменения ТЭС от ψ при различных амплитудах циклических напряжений

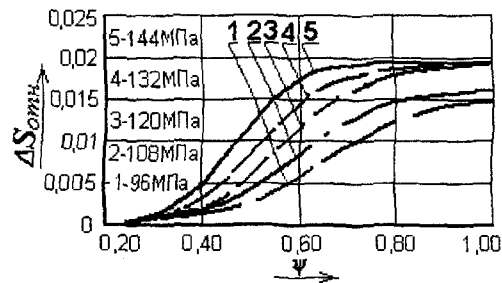


Рис. 6. Чувствительность ТЭС к изменению ψ при различных амплитудах циклических напряжений

При ψ более 0,3-0,4 и менее 0,8-0,95 зависимость между уровнем накопленных повреждений и изменением ТЭС с высокой степенью достоверности может быть описана уравнением вида:

$$\Delta S = \frac{A(1 - e^{-B\psi})}{(1 - C e^{-B\psi})}, \quad (13)$$

где A – коэффициент, зависящий от максимального изменения ТЭС;

B – коэффициент, связывающий относительную пластическую деформацию с ψ ;

C – коэффициент, зависящий от относительного приращения плотности дислокаций в материале [7].

Для сплава Д16Т и диапазона циклических напряжений от 0,96 до 144 МПа погрешность определения ψ не превышает 16 % при значениях уровня повреждений от 0,40 до 0,70.

Таким образом, на основании предварительно установленной зависимости типа выражения (13), можно по изменению значений ТЭС исследуемых материалов оценить степень их поврежденности.

В работе [8] на подобной установке было проведено исследование ТЭС режущей кромки твердосплавной пластины, напаянной на державку. В точке контроля устанавливался наконечник Н2 (заостренный спай хромель-копелевой термопары), хромелевый электрод которой был помещен в НЭ. Соответственно, через нагреваемый хромелевый электрод тепловая энергия поступала в контролируемую точку твердосплавной пластины. К НЭ прикреплялся слюдяной конус, позволяющий уменьшить теплоотдачу поверхности твердосплавной пластины вблизи указанной точки в окружающую среду. Для определения температуры холодного края державки на хвостовик державки был установлен наконечник Н1 (спай хромель-копелевой термопары). Для обеспечения надежного контакта термопары прижимались к контролируемым поверхностям грузами. Эти грузы были подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство усилия прижатия термопар к указанным поверхностям. Милливольтметр, включенный между двумя хромелевыми электродами стандартных термопар, измерял разность ЭДС, возникающих при точечном нагревании режущей кромки твердосплавной пластины в двух полустественных термопарах: одной, образованной хромелевым электродом стандартной термопары и твердосплавной пластиной, второй – аналогичным электродом второй стандартной термопары и холодным концом державки реза. Для точного позиционирования наконечника Н2 (нагреваемого электрода) на режущей кромке механизм его перемещения был оснащен отсчетным устройством, кроме этого была обеспечена визуализация контакта электрода с исследуемой поверхностью.

По результатам измерений проведенных в [9] рассчитывался коэффициент k термоэлектрической чувствительности твердосплавной пластины 0025 Т5К10 ГОСТ 25395-90, определяемый отношением термоэлектрической чувствительности полустественной термопары хромель - материал твердосплавной пластины $S_{хм}$ к термоэлектрической чувствительности стандартной хромель-копелевой термопары $S_{хк}$:

$$k = \frac{S_{хм}}{S_{хк}} = \frac{E}{E_{ТН2} - E_{ТН1}}, \quad (14)$$

где $E_{ТН2}$ и $E_{ТН1}$ – термо-ЭДС, генерируемые стандартными термопарами в точках контакта наконечников с режущей кромкой.

Учитывая тот факт, что флуктуация термо-ЭДС $E_{ТН1}$ за время проведения эксперимента составила $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ мВ, что соответствует колебаниям температуры на сотые доли градуса, их влияние при расчете k не учитывалось, и расчет проводился по формуле:

$$k = \frac{E}{E_{ТП2}} \quad (15)$$

В работе были последовательно проведены две серии измерений термоэлектрической чувствительности в одной и той же точке режущей кромки с разницей в один час. Воспроизводимость результатов измерения k оказалась хорошей, что подтверждается малым порядком значения дисперсии $D_k = 10^{-8}$. На этой же установке были проведены исследования распределения k по поверхности пяти резцов, изготовленных из того же материала, что и резец, используемый при проведении многократных измерений в одной точке. Были получены следующие средние значения k : 0,6067, 0,6071, 0,6267, 0,6049, 0,6238. Для каждого из резцов рассчитаны D_k , составившие соответственно: $3,93 \cdot 10^{-6}$, $4,12 \cdot 10^{-6}$, $3,78 \cdot 10^{-6}$, $3,89 \cdot 10^{-6}$ и $4,12 \cdot 10^{-6}$. Из полученных результатов видно, что термоэлектрическая неоднородность материала режущих кромок исследуемых резцов велика, вследствие этого D_k отличается на два порядка от дисперсии той же величины, измеренной в одной точке.

Исследования режущих кромок твердосплавных инструментов показали, что концентрация дефектов структуры, изменение химического и фазового состава, накопление внутренних механических напряжений под действием температуры, нагрузок и взаимодействия с другими материалами при резании, сопровождаются значительными изменениями ТЭС материала режущей кромки. Причем возникновению выкрашивания режущей кромки предшествует скачкообразное изменение k , как показано на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость среднего значения k режущей кромки резца с пластиной 0025 T5K10 от ее износа

Изменение k на участке режущей кромки резца с напайной твердосплавной пластиной 0025 T5K10 ГОСТ 25395-90 с различной поврежденностью, накопленной в процессе резания со скоростью $V \approx 108$ м/мин, представлено на рис. 8. В результате работы резца дисперсия распределения ТЭС материала режущей кромки возрастает и изменяется от $4 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-4}$.

Анализ дисперсий распределения ТЭС $D_{СМК}$ вдоль режущей кромки резцов с различной поврежденностью выявил её увеличение с ростом поврежденности, что видно из диаграммы, приведенной на рис. 9.

Таким образом, исследования, проведенные в работе [9], показали, что значение $D_{СМК}$ вдоль режущей кромки резцов может служить основой для оценки их остаточной стойкости [10].

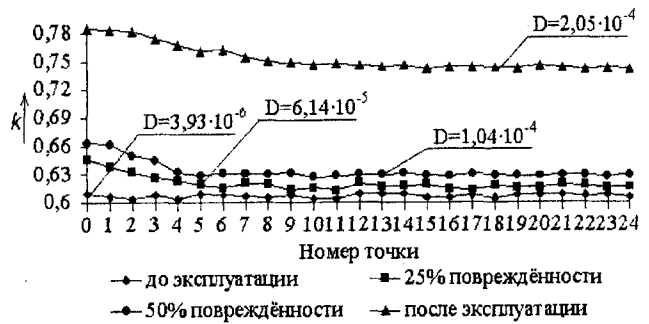


Рис. 8. Распределение коэффициента k на участке режущей кромки резца с пластиной 0025 T5K10 до эксплуатации и с разной поврежденностью

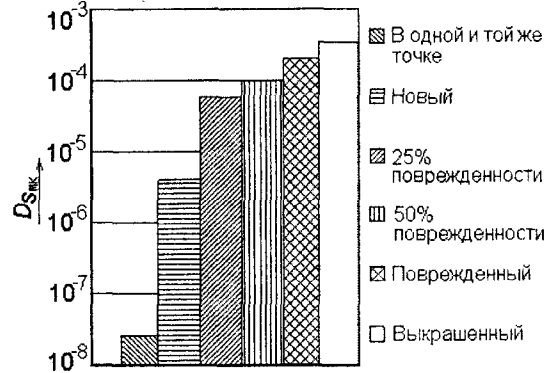


Рис. 9. Значения $D_{СМК}$ измеренных в одной и той же точке на рабочем участке нового, с различной поврежденностью и выкрашенного резцов

В работе [11] проведено исследование k биметаллической ленты, рассчитываемого по формуле, аналогичной (14). В этой работе, как и во всех предыдущих, получена высокая воспроизводимость результатов измерения. Проведенные в [5] исследования распределения k по поверхности биметаллических лент типа «Электросталь» и «CANTHAL» показали, что усредненные значения k по поверхности ленты равны 0,576 и 0,574, а значения их дисперсий составляют $5,939 \cdot 10^{-5}$ и $1,760 \cdot 10^{-5}$ соответственно и показывают наличие термоэлектрической неоднородности материала, вызывающей флуктуацию значений k по поверхности ленты. Поэтому для повышения точности определения толщин слоев биметаллов и различных проводящих покрытий на проводящих основаниях термоэлектрическим методом необходимо определять значения ТЭС материалов покрытия и основания в каждой контролируемой точке. Такая задача может быть успешно решена с помощью специальной установки, предложенной в [12].

Анализ экспериментальных данных, полученных в рассмотренных работах, показывает, что ТЭС различных материалов изменяется от точки к точке вдоль их поверхности. Для повышения точности определения величин, зависящих от значений ТЭС контролируемой поверхности, необходимо знать распределение ТЭС по ее материалу, при этом следует выбирать определенный шаг измерения ТЭС по поверхности материала, обеспечивающий требуемую локальность [13].

Следует учитывать, что при контакте горячего и холодного стандартных электродов (наконечников Н1 и Н2) с поверхностью ОК между электродами образуется электрическая цепь, по которой протекает ток, создаваемый термо-ЭДС. Максимальная плотность тока приходится на поверхностный слой материала ОК. Термоэлектрические неоднородности (ТЭН) материала при контроле термоэлектрическим методом находятся в установившемся неоднородном тепловом поле, изменяющемся как по поверхности контролируемого материала, так и внутри объема образца, поэтому ТЭН создают свои термо-ЭДС, взаимодействующие с термо-ЭДС, генерируемой полустационарной измерительной термопарой на границе горячий электрод-поверхность ОК. Наибольшее значение термо-ЭДС из-за ТЭН естественного электрода будет иметь место при скачкообразном изменении ТЭС материала в области, прилегающей к зоне контакта горячего электрода измерительной термопары с ОК, где изменение температуры, приходящееся на единицу длины, наиболее велико. Определение ТЭС материала ОК в локальной точке контакта горячего электрода с поверхностью ОК по значению суммарной термо-ЭДС измерительной термопары приводит к возникновению погрешности. При переносе измерительного горячего электрода в новую точку, которую окружают другие ТЭН, погрешность измерения также изменяется.

Указанная погрешность является случайной и не может быть исключена из результатов оценки значения локальной ТЭС. Для уменьшения влияния погрешности следует исключить прохождение термо-тока в поверхностном слое материала, что может быть достигнуто путем расположения горячего и холодного электродов на противоположных сторонах ОК напротив друг друга. Тогда рассматриваемая составляющая погрешности создается неоднородными внутренними областями ОК. Стабилизация значения погрешности может быть обеспечена усреднением по возможно большей внутренней области материала значений термо-ЭДС. Эта проблема решается применением теплового экрана, создающего в материале плоское тепловое поле вблизи контролируемого участка [14, 15]. При этом кроме усреднения значений результирующих термо-ЭДС, обусловленных ТЭН, происходит выравнивание во внутренних слоях материала потенциалов, вызванных шунтирующими токами [16], что резко уменьшает значение случайной погрешности оценки локальной ТЭС материала. При перемещении горячего электрода внутри теплового экрана в различные точки ОК с одинаковой температурой можно определить лишь изменения термо-ЭДС, обусловленные изменениями ТЭС поверхностного слоя ОК именно в этих точках.

Литература:

1 Нестерович Ю.И. Разработка метода и средства термоэлектрического контроля металлов и сплавов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 2000. – 17 с.

2 Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Плахова Е.В., Скворень В.Н. Исследование температуры зоны трения методом естественной термопары // СЛА-

ВЯНОТРИБО-4. Трибология и технология: Материалы междунар. науч.- практич. симп. – В 4 Кн. Кн. /РГАТА – МВ СЕЗАМУ. Рыбинск, 1997. – С. 65-68.

3 Скворень В.Н. Разработка метода и средств контроля температуры в зоне сухого трения // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 1999. – 16 с.

4 Ногачева Т.И. Термоэлектрический метод при ближней оценке температуры вспышек в зоне трения // Сб. тр. МНТК «Приборостроение-2005», Ялта, 2005.

5 Корндорф С.Ф., Тупикин Д.А. Способ выявления и оценки параметров термоэлектрических неоднородностей в приповерхностном слое металлических изделий // Известия Орел ГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – 2003. №3. – С. 78-83.

6 Тупикин Д.А. Термоэлектрический метод контроля накопленных повреждений в металле при многоциклового усталости, на примере алюминиевого сплава // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 2003. – 16 с.

7 Тупикин Д.А. Термоэлектрический метод контроля усталостных явлений в металлах. // Контроль. Диагностика. – 2003. – №11. – С. 53-61.

8 Корндорф С.Ф., Мельник Е.Е. Термоэлектрическое устройство для контроля механической неоднородности рабочей кромки металлорежущего инструмента // Приборы и техника эксперимента. 2003. – №2. – С.166-167.

9 Мельник Е.Е. Метод и средство контроля состояния и оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 2003. – 16 с.

10 Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Мельник Е.Е. Термоэлектрический способ контроля металлов сплавов // Патент РФ №2229703. Бюл. № 15, 2004.

11 Углова Н.В. Термоэлектрический метод и устройство контроля толщины слоев двухслойных проводящих материалов // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Орел, 2005. – 16 с.

12 Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Углова Н. Термоэлектрическое устройство для контроля толщины слоев двухслойных проводящих материалов. Патент РФ №2223441. Бюл. № 21, 2004.

13 Кузнецова Е.В. Уменьшение влияния трибоэлектрических явлений на результаты контроля температуры в зонах резания и трибосопряжений / Е.В. Кузнецова, Е.Е. Мельник, Е.В. Семина // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Матер. 4-ой МНТК / Под общей редакцией В.В. Клюева. – М.: РОНКиТД, 2005. – С. 89.

14 Ногачева Т.И. Повышение точности контроля толщины слоев двухслойных материалов путем создания плоского теплового поля // Контроль. Диагностика. – № 9. – 2004. С. 49-51.

15 Ногачева Т.И. Способ повышения точности определения локальной термоэлектрической способности материалов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Матер. 4-ой МНТК / Под общей редакцией В.В. Клюева. – М.: РОНКиТД, 2005. – С. 57.

16. Ногачева Т.И. Влияние шунтирующих токов на точность определения толщины покрытия // Материалы 7-го ВНТС: Инженерно-физические проблемы новой техники. – Москва, 2003. – С. 142-143.

Д-р техн. наук, проф. Куценко С.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419892; E-mail: chemistry@mail.ostu.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ КОНТАКТА ФАЗ В БАРБОТАЖНЫХ РЕАКТОРАХ ПО ГАЗОНАПОЛНЕНИЮ

In work, the method of definition of time of contact of phases on gas saturation sparing systems considered (examined) due to fixing initial and working levels.

Для интенсификации химического взаимодействия в системах жидкость-газ широко используется барботаж газа через слой жидкости. Для конструктивного расчета барботажных аппаратов наиболее важной величиной является время контакта газовой и жидкой фаз. На основании гидродинамической теории движения газовых пузырей в жидкости можно определить скорость их подъема в барботажном реакторе.

Тогда время контакта пузырьков с жидкой фазой рассчитывается по формуле:

$$\theta = \frac{h}{w}, \quad (1)$$

где θ – время контакта, с;

h – высота подъема, м;

w – скорость подъема газового пузырька, м/с.

Поскольку скорость пузырька зависит от его размера, режима движения жидкости и ряда других факторов, время контакта фаз, рассчитанное по формуле (1), будет характеризоваться «размытой» плотностью вероятности. Следовательно, для практического определения среднего времени пребывания газа в реакторе этот способ мало пригоден.

Среднее время контакта фаз проще определить по газонаполнению, т.е. объему газожидкостной смеси, и объемному расходу газа:

$$\theta = \frac{f(h-h_0)}{V}, \quad (2)$$

где V – объемный расход газа, м³/с;

f – площадь сечения реактора, м²;

h – рабочая высота барботажного слоя, м;

h_0 – высота жидкости в реакторе без подачи газа, м.

Однако уравнение (2) не пригодно для точного расчета времени контакта фаз, т.к. в нем не учитывается увеличение объема газовых пузырьков по высоте жидкости за счет уменьшения гидростатического давления. Поэтому для более точного определения времени контакта фаз целесообразнее воспользоваться массовым расходом газа и газосодержанием, то есть массой газа, содержащегося в виде пузырьков в барботажном слое. Если принять за величину давления газа среднее арифметическое давление в барботажном слое, то, с учетом уравнения Клапейрона-

Менделеева, получится следующее выражение для расчета времени контакта фаз:

$$\theta = \frac{m}{G} = \frac{(p_n - p_0)}{2} \cdot \frac{f(h-h_0) \cdot M}{R \cdot T \cdot G}, \quad (3)$$

где G – массовый расход газа, г/с;

m – масса газа в пузырьках, г;

M – молекулярная масса газа, г/моль;

T – температура барботажного слоя, К;

p_n – давление на дне реактора, Па;

p_0 – давление над барботажным слоем в реакторе, Па;

R – газовая постоянная, Дж/мольК.

Как было показано в работе [1], при больших значениях рабочей высоты барботажного реактора, а также при использовании в качестве рабочей жидкости расплавов солей металлов, имеющих плотность, большую, чем у воды, следует использовать в качестве среднего эффективного давления среднее логарифмическое давление в барботажном слое. Тогда формула для расчета времени контакта фаз при отсутствии взаимодействия газа с жидкостью будет иметь вид:

$$\theta = \frac{m}{G} = \frac{p_n - p_0}{\ln p_n - \ln p_0} \cdot \frac{f(h-h_0) \cdot M}{R \cdot T \cdot G}. \quad (4)$$

В промышленной практике чаще всего барботажные аппараты представляют собой вертикальные цилиндрической формы реакторы. С учетом неизменности площади сечения f такого реактора по высоте газонаполнение барботажной системы, ΔV , можно вычислить по разности уровней жидкости в период работы (h) и до начала подачи газа (h_0):

$$\Delta V = f(h_p - h_0). \quad (5)$$

Таким образом, задача определения газонаполнения барботажной системы сводится к контролю уровня жидкости в аппарате при подаче газа. Однако известные методы контроля уровня жидкости из-за быстрой пульсации барботажного слоя не могут быть использованы. Поэтому для определения газонаполнения барботажных систем рядом авторов предлагались другие методы, связанные с изменением физико-химических свойств рабочей среды. В частности, методы, основанные на изменении диэлектрической проницаемости или электропроводности газожидко-

стной системы в зависимости от величины газонаполнения. Широкого использования эти методы также не получили ввиду сложного конструктивного оформления и неоднозначной интерпретации выполняемых измерений. Особую трудность вызывает определение газонаполнения при осуществлении высокотемпературных барботажных процессов в расплавленных средах, например при хлорировании титанового концентрата в расплаве хлоридов щелочных металлов.

Простой замер уровня расплава в жидкофазных хлораторах осуществляется с помощью обычного мерного штыря. Понятно, что точность такого замера невелика, и расхождение в определяемых величинах газонаполнения для одних и тех же условий проведения процесса достигает 20 %. Не более точным методом является определение границы раздела барботажный слой – газовое пространство по высоте настыли, которая образуется по периметру рабочей шахты хлоратора. В данной работе изложен разработанный и опробованный автором новый метод контроля газонаполнения в расплавленных хлораторах, который может использоваться и для простых барботажных систем, и при обычных температурах.

Основой предложенного способа является использование замкнутой электрической цепи, состоящей из рабочего расплава и двух электродов, погруженных в расплав. При включении в схему источника напряжения, сила тока I в цепи будет определяться суммарным сопротивлением электродов и расплава:

$$I = \frac{U}{R_{Э1} + R_{Э2} + R_p + R_k}, \quad (6)$$

где U – рабочее напряжение;

$R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ – сопротивления электродов;

R_p – сопротивление расплава;

R_k – сопротивление контактов.

Если подобрать материал электродов таким образом, чтобы их электропроводность была гораздо меньше электропроводности расплава, то сила тока в цепи будет определяться величиной сопротивления электродов. Естественно, контакты должны иметь минимальное сопротивление ($R_k \rightarrow \min$). Поскольку сопротивление электродов будет зависеть от глубины погружения в расплав, то при изменении уровня последнего будет меняться сила тока в цепи. Для исключения влияния изменения электропроводности расплава при пропускании газа величина $R_{Э}$ должна быть существенно больше R_k .

Преимущество предложенной измерительной схемы состоит в том, что суммарное сопротивление электродов при барботажном режиме усредняется и происходит интегральное сглаживание неравномерности уровня в течение определенного промежутка времени:

$$R_{Э} = \frac{1}{T} \int_0^T [R_{Э1}(\tau) + R_{Э2}(\tau)] d\tau \approx \text{const}. \quad (7)$$

На рис. 1 представлена лабораторная установка для определения газонаполнения, включающая: реакционный сосуд 1, графитовые электроды уровне-

меры 2, амперметр-самописец марки Н376 3, источник переменного тока 5 со стабилизатором напряжения СН-150, понижающий трансформатор 4.

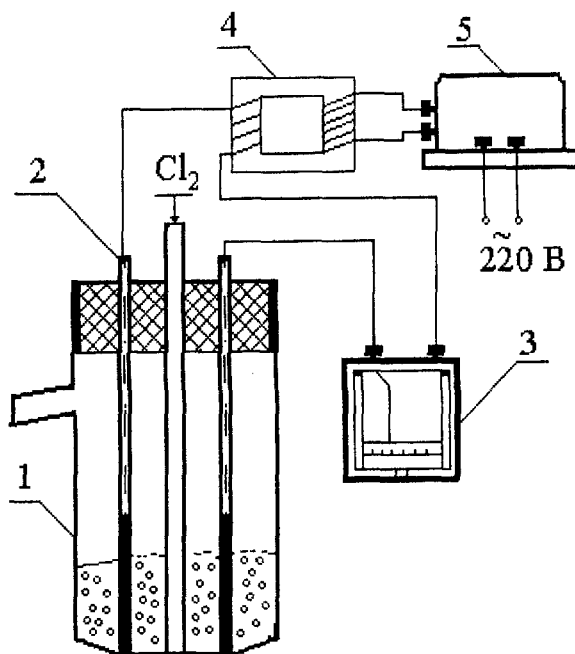
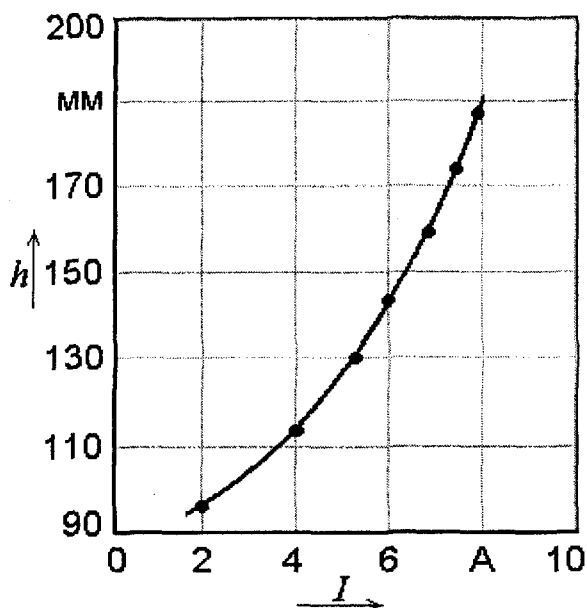


Рис. 1. Установка для определения газонаполнения

Основным рабочим элементом измерительной схемы является электрод-уровнемер. Материал электрода подбирался таким образом, чтобы его сопротивление было больше сопротивления расплава, и была обеспечена однородность по длине стержня. Для работы в расплаве хлоридов металлов и атмосфере хлора наиболее подходящим материалом оказался графит. Наиболее сложной задачей при изготовлении электродов-уровнемеров стало создание надежных контактов между электродом-уровнемером и внешним токоподводящим проводом. Трудные условия работы, связанные с высокой температурой и агрессивным воздействием газов и расплава, способствуют быстрому увеличению сопротивления газов и контакта в результате его коррозии. Поэтому верхняя нерабочая часть электрода помещалась в кварцевый чехол. Были опробованы различные способы соединения графитового стержня и токоподводящего провода. Наиболее надежный контакт был получен заливкой места контакта стержня с медным проводом сплавом Деварда в атмосфере аргона. При этом графитовые стержни предварительно прокаливались в вакууме при температуре 900 °С. На рис. 2 представлена градуировочная кривая зависимости силы тока от уровня расплава эквимольная смеси хлорида калия и натрия при температуре 800 °С и напряжении 3,5 В.

Нелинейная форма зависимости, приведенной на рис. 2, вызвана остаточным электрическим сопротивлением контакта. По мере уменьшения сопротивления электродов при подъеме уровня расплава градиент dI/dh уменьшается за счет увеличения доли постоянного сопротивления контактов в общем сопротивлении электрода-уровнемера.



h – уровень расплава, мм; I – сила тока, А

Рис. 2. Градуировочная кривая

Разработанная конструктивная схема позволяет с достаточной степенью точности определять барботажный уровень расплава в реакционном сосуде.

Колебания силы тока, вызванные кратковременным изменением электрического сопротивления электродов-уровнемеров при барботаже расплава, невелики и сглаживаются вследствие достаточной инерционности амперметра-самописца. Таким образом, усредненный уровень барботажного слоя определяется по градуировочной кривой.

Более оптимальным регистрирующим прибором мог бы явиться обычный счетчик электроэнергии – готовое интегрирующее устройство. В этом случае среднее значение силы тока ($I_{\text{ср}}$) за время τ можно было бы определять по формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\Delta W}{U \cdot \tau}, \quad (8)$$

где ΔW – разность показаний счетчика за время τ ;
 U – напряжение на электродах.

Литература:

1 Куценко С.А., С.А. Амирова *Определение времени контакта фаз в барботажном реакторе* / С.А. Куценко, С.А. Амирова // *Теоретические основы химической технологии.* – В 3-х т. – Т. 1. – М.: Высшая школа, 1969. – С. 136-137.

УДК 535.3-34

Канд. техн. наук, доц. Тарасова М.А.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орел, тел. (4862)419889; E-mail: martar1@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОМ АНАЛИЗЕ ЧУГУНА

The considered question of the matrix effect at determination of the sulphur, silicon, manganese, phosphorus in cast iron. The explored influence of the efficient atomic number of the test on intensity of the fluorescences of the sulphur, is installed mutual influence element. The formed equations to regressions adequately describing behaviour element in test. On the grounds of studies is designed x-rays - a fluorescent method of the determination element in cast iron, is shown accuracy of the determination of the sulphur, manganese, silicon, phosphorus, root-mean-square inaccuracy of the determination these element forms 0,02-0,01 in interval concentration 0,025-2,0 %.

Задача выполнения массовых количественных определений в различных продуктах минерального сырья, охраны окружающей среды, цветной и черной металлургии и др. рентгенофлуоресцентным методом, предъявляет высокие требования к потребительским качествам методического обеспечения [1]. Оно должно обеспечивать анализ заданного набора элементов в возможно более широком круге объектов анализа; необходимую точность определения элементов в возможно более широком диапазоне

изменения их содержания; высокую экспрессность и производительность анализа. При этом желательно, по возможности, чтобы не требовалось использование трудоемких, длительных и дорогостоящих операций подготовки проб. Применительно к анализу природных объектов, большинством указанных качеств обладают методики рентгенофлуоресцентного анализа, основанные на способе стандарта-фона. В промышленном производстве, в частности в металлургии, применяют простые эмпирические способы:

внешнего стандарта и калибровки [2]. Для гетерогенных материалов калибровка осуществляется путем построения градуировочной характеристики, которая может быть задана уравнением регрессии [3]. В качестве образцов сравнения часто используют собственные образцы, аттестованные на производстве. Такие способы дают вполне удовлетворительные результаты по правильности, воспроизводимости, экспрессности и себестоимости анализа.

Программа исследований при разработке методики определения кремния, фосфора, серы, марганца в чугунах включала такие пункты, как настройка дискриминатора, выбор режима работы трубки, определение аппаратурной погрешности, выбор способа определения содержания элементов в образце, калибровку прибора, определение точности метода. Использовались Государственные стандартные образцы (ГСО) чугуна – комплект ЧГ8а – ЧГ11а и ЧГ1а – ЧГ6а. Образцы содержат указанные элементы, диапазоны содержаний которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазон содержаний элементов в ГСО

Элемент	Диапазон содержаний, %
Углерод	2,8 – 3,8
Кремний	0,2 – 3,6
Марганец	0,1 – 1,5
Сера	0,006 – 0,85
Медь	0,04 – 0,1
Фосфор	0,02 – 0,6
Хром	0,02 – 0,2
Ванадий	0,05 – 0,4
Титан	0,03 – 0,14
Мышьяк	0,02 – 0,085

Исследования выполнялись на рентгеновском спектрометре СРМ-25, источник возбуждения – рентгеновская трубка с родиевым анодом, кристалл анализатор – по схеме Иогансона.

Режим работы дискриминатора устанавливали после снятия амплитудного распределения для элемента в соответствующем канале дискриминатора. В качестве образцов использовали стандартные образцы, изготовленные в ЗАО «Научприбор». Рассеянное излучение снимали в отдельном канале по стандартному образцу, содержащему борную кислоту. Контрастность для каждого образца соответствует значениям, установленным в технических условиях (ТУ) на спектрометр.

Известно, что интенсивность характеристических спектральных линий I_c пропорциональна току: $I_c \approx i$ [4].

Таблица 2 – Оптимальные условия определения элементов

Номер стандартного образца	Элемент	Контрастность	Напряжение на трубке, кВ	Ток трубки, мА	Аппаратурная погрешность, %
81	Si	41	40	50	0,30
87	S	63	40	50	0,90
104	P	813	40	50	0,24
122	Mn	119	40	50	0,43
163	рассеянное	–	–	–	–

Зависимость интенсивности I_c от напряжения трубки качественно другая. Для каждой серии спектральных линий существует напряжение возбуждения (потенциал возбуждения) $U_{возб}$. При $U < U_{возб}$ соответствующих спектральных линий не возникает; при $U > U_{возб}$ интенсивность спектральных линий возрастает с увеличением напряжения трубки, и для области напряжений, не превышающих $U = 3U_{возб}$ это возрастание описывается выражением:

$$I_c = \text{const } i (U - U_{возб})^2 \quad (1)$$

При повышении напряжения больше $U = 10U_{возб}$ увеличение интенсивности спектральных линий практически не происходит.

Исследовали зависимость интенсивности линий от тока и напряжения на рентгеновской трубке, учитывая, что наибольший $U_{возб} = 6,54$ эВ для марганца и наименьший $U_{возб} = 1,83$ эВ для кремния.

Результаты исследований показали (рис. 1), что для серы, фосфора, кремния при напряжении 40 кВ и выше, токе 55 мА увеличение интенсивности происходит незначительно. Для марганца существенное увеличение интенсивности наблюдается при напряжении от 40 до 50 кВ. Выбор режима работы трубки почти всегда является компромиссом между условиями ее эксплуатации, в частности, охлаждением трубки, интенсивностью спектральных линий и временем одного определения (замера). Был выбран следующий режим работы трубки: 40 кВ, 50 мА.

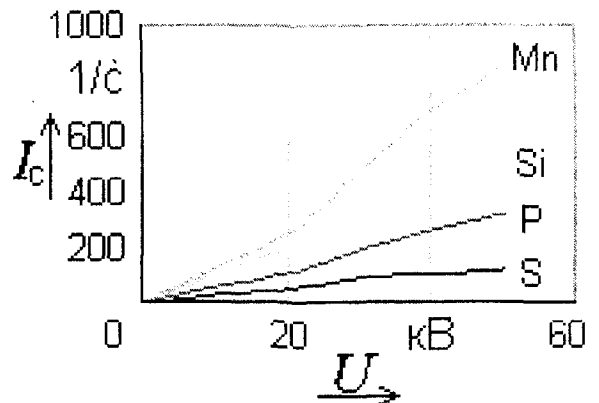


Рис. 1 Зависимость интенсивности элементов от напряжения на рентгеновской трубке

Определили относительную инструментальную (аппаратурную) погрешность спектрометра после многократного анализа стандартных образцов.

Таким образом, установили оптимальные режимы определения элементов на спектрометре (таблица 2).

При выбранных оптимальных условиях произвели измерение интенсивности линий определяемых элементов в стандартных образцах (СО) ЧГ8а – ЧГ11а. Результаты измерений показали, что графики зависимости интенсивности от содержания элементов в СО прямолинейны во всем диапазоне содержаний для элементов: кремний, фосфор, марганец. График зависимости интенсивности I_c от содержания серы имеет положительную кривизну – вогнутая кривая.

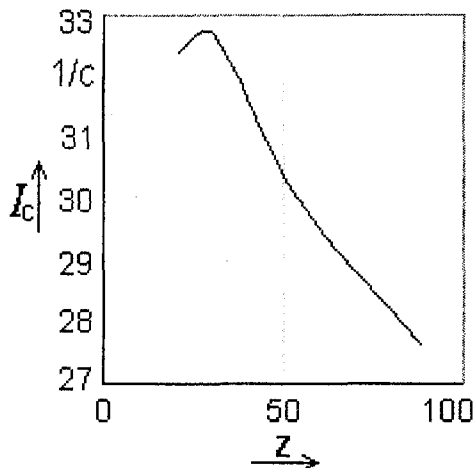


Рис. 2. Зависимость интенсивности серы от среднего атомного номера Z стандартного образца

Установили средний атомный номер элементов каждого образца, как $\bar{Z} = \sum_i^N Z_i C_i$. При этом учитывали содержание C_i и атомный номер Z_i кремния, серы, фосфора и марганца. Для образцов:

$$8A - \bar{Z} = 88,5 (C_s = 0,013\%),$$

$$9A - \bar{Z} = 21,2 (C_s = 0,068\%),$$

$$10A - \bar{Z} = 54,7 (C_s = 0,006),$$

$$11A - \bar{Z} = 31 (C_s = 0,039\%).$$

Построили график зависимости интенсивности серы от \bar{Z} (рис. 2). Согласно графику, с увеличением \bar{Z} интенсивность серы уменьшается.

Оба явления указывают на присутствие матричного эффекта при анализе проб чугуна.

Интенсивность флуоресценции элемента зависит не только от его концентрации, его радиационно-физических свойств (поглощающей и рассеивающей способности, выхода флуоресценции и т.д.) и ис-

пользуемого для возбуждения флуоресценции излучения, но и от концентрации и свойств присутствующих элементов. Это влияние присутствующих (вносящих искажения в результаты анализа) элементов сказывается различным образом на интенсивности флуоресценции анализируемого элемента. Влияние матрицы проявляется как на селективном ослаблении интенсивности линии определяемого элемента, так и на дополнительном возбуждении определяемого элемента от присутствующих элементов (межэлементное возбуждение) [5]. На основании результатов исследований установлено, что матричный эффект проявляется в ослаблении интенсивности серы. По этой причине целесообразным является проведение анализа проб в тот период, когда состав образцов и проб максимально близок. Этому положению отвечают те стандартные образцы, которые использованы для разработки методики.

Корреляционный анализ показал значительные связи между определяемыми элементами (таблица 3). Результаты корреляционного анализа позволили выбрать способ количественной оценки концентрации определяемого элемента – анализ с помощью системы уравнений связи.

Для учета относительных случайных инструментальных (аппаратурных) погрешностей, связанных с работой спектрофотометра, его отдельных узлов (трубки, счетчиков, дискриминаторов и др.), как правило, работают не с абсолютными интенсивностями, а с относительными. Выполняют нормирование интенсивности линии определяемого элемента.

В качестве нормировочного образца использовали ГСО ЧГ 1А. Следует отметить, что исследованию по оценке случайной погрешности анализа без нормировки и с нормировкой показали незначительное увеличение погрешности при работе с нормировкой.

Градуировочная характеристика для каждого элемента задается уравнением множественной регрессии общего вида:

$$C_i = \alpha_0 + \sum_j \alpha_j I_j + \sum_{ij} \alpha_{ij} I_i I_j + \dots, \quad (2)$$

где C_i , I_i – соответственно, содержание и интенсивность аналитической линии определяемого i -того элемента;

I_j – интенсивность аналитической линии j -того влияющего элемента;

α_0 , α_i , α_{ij} – эмпирические числовые параметры, найденные методом наименьших квадратов.

Таблица 3 – Результаты корреляционного анализа

Элемент	Коэффициент корреляции			
	S	Si	P	Mn
S	0,914	-0,297	0,855	-0,823
Si	-0,498	0,999	-0,210	0,244
P	0,667	-0,199	0,997	-0,712
Mn	-0,620	0,248	-0,690	0,999

Новый методико-программный комплекс основан на использовании рентгеновского аналитического спектрометра СРМ-25, подробно описанного в работе [6]. ЗАО «Научприбор» постоянно модернизирует СРМ-25 с последующим внедрением результатов в выпускаемые аналитические комплексы. Модернизация ведется по улучшению аппаратных параметров и программно-методического обеспечения с учетом существующих разработок. В настоящее время разрабатывается новая программная оболочка, отличительной особенностью которой является возможность использования в среде Windows.

Для разрабатываемой методики выполнена калибровка прибора и последующий анализ проб. При калибровке измерительного оборудования составлены уравнения регрессии. Рассчитаны следующие параметры:

- коэффициенты ковариации и парной корреляции;
- коэффициенты множественной корреляции и детерминации;
- выборочная и остаточная дисперсии;
- коэффициенты Стьюдента и Фишера.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, а также перечисленные выше вы-

числения направлены на получение в автоматическом режиме оптимальной формы уравнения регрессии и построения градуировочной характеристики.

Получены следующие уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} C_P &= 0.038 + 0.044I_P - 0.021I_S + 0.011I_{Mn} \\ C_{Si} &= -0.057 + 0.577I_{Si} \\ C_S &= 0.008 + 0.025I_S + 0.002I_P - 0.007I_{Mn} \\ C_{Mn} &= -0.054 + 0.595I_{Mn} - 0.005I_P + 0.030I_S \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции для каждого уравнения имеет значение:

- 1) для фосфора: $R_P = 0,999$;
- 2) для серы: $R_S = 0,986$;
- 3) для кремния: $R_{Si} = 0,999$;
- 4) для марганца: $R_{Mn} = 0,999$.

Рассчитаны такие аналитические характеристики методики, как чувствительность, воспроизводимость и сходимость результатов анализа.

На основании проведенных исследований разработан рентгенофлуоресцентный метод определения элементов в чугунах. Среднеквадратичная относительная погрешность метода показана в таблице 4.

Таблица 4 – Среднеквадратичная относительная погрешность определения элементов в чугунах

Фосфор		Кремний		Сера		Марганец	
Диапазон, %	$S_r, \%$	Диапазон, %	$S_r, \%$	Диапазон, %	$S_r, \%$	Диапазон, %	$S_r, \%$
0,04-0,40	0,02	0,8-3,6	0,02	0,010-0,040	0,01	0,1-1,5	0,01

Правильность предложенного рентгенофлуоресцентного метода определения элементов в чугунах оценивалась по определению содержания элементов в Государственных стандартных образцах ГСО 3А и сравнением со стандартизованным химическим методом. Результаты показали отсутствие систематической погрешности.

Предложенный рентгенофлуоресцентный метод может широко применяться на промышленных предприятиях и организациях цветной и черной металлургии, геологической и добывающей отраслей, а также при решении задач охраны окружающей среды. Это обусловлено важными достоинствами метода:

- большим набором определяемых элементов, возможностью определения элементов в широком интервале содержания;
- широким кругом анализируемых объектов;
- быстротой и точностью анализа;
- возможностью автоматизации процессов измерения, расчета, хранения, обработки и выдачи результатов анализа.

Распространению предложенного рентгенофлуоресцентного метода определения элементов в чугунах способствует развитие его теоретических основ, разработка новых способов анализа, создание практических методик определения отдельных элементов в конкретных объектах, серийный выпуск рентгеновской аппаратуры.

Литература:

- 1 Ильин Н.П. К семидесятилетию журнала «Заводская лаборатория» и рентгеноспектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68. – № 1. – С. 25-37.
- 2 Кордюков С.В. Методико-программные комплексы рентгенофлуоресцентного анализа – основа аналитического обеспечения ГРП / С.В. Кордюков, В.А. Симаков, М.В. Абрамов // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 11. – С. 39-44.
- 3 Молчанова Е.И. Программа оболочка для проведения рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на аналитическом комплексе СРМ 25 / Е.И. Молчанова, А.Н. Смагунова, И.М. Прекина // ИВМ. Аналитический контроль. – 1989. – №2. – С. 38-42.
- 4 Лосев Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. – М.: Наука, 1969. – 336 с.
- 5 Рентгено-флуоресцентный анализ. Применение в заводских лабораториях / Под ред. Х. Эрхардта // Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1985. – 253 с.
- 6 Тарасова М.А. Разработка нового методико-программного комплекса рентгенофлуоресцентного определения элементов на спектрометре СРМ-25 / М.А. Тарасова, Т.Е. Бухвостова // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – № 1. – С. 22-25.
- 7 Ревенко А.Г. Развитие рентгенофлуоресцентного анализа в России в 1999-2000 гг. (обзор) / А.Г. Ревенко, С.Б. Дабагов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68. – № 5. – С. 3-14.

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ**

УДК: 612.014.462.9

Канд. биол. наук Бобров А.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.osu.ru

**ЗАВИСИМОСТЬ МОДАЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОРЯДКА СОЧЕТАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО
РАЗДЕЛЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ИНФОРМАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ**

Dependence of informational saturation (modality) of torsion radiation upon a combination order of two informational matrixes, through which this radiation is transmitted, has been investigated. It was discovered that modality of the affecting factor is defined mainly with informational properties of "outlet" matrix faced the object and value area for an index of its possible biological activity is limited with the values of biological activity for informational matrixes used separately.

Приобретение и перенос информации является уникальным и важнейшим свойством торсионных полей (ТП). При пропускании торсионного излучения через вещество информационной матрицы (ИМ) это излучение приобретает информацию о структуре спиновой системы ИМ в результате взаимодействия с ее характеристическим ТП [1].

Изучение эффективности прямого и опосредованного (с применением активированной воды) информационного воздействия торсионного компонента излучения квантовых генераторов на биообъекты показало, что степень стимуляции или ингибирования их жизнедеятельности зависит от основного параметра воздействия – вещества ИМ [2-4]. Из приведенных на рис. 1 результатов исследования следует, что опосредованное информационное воздействие водой, активированной с применением пенициллина или метациклина в качестве ИМ, стимулирует жизнедеятельность микроорганизмов, тогда как воздействие с использованием воды, активированной с применением ряда металлов (дюраль, серебро, медь и свинец), ингибирует их жизнедеятельность [5-7].

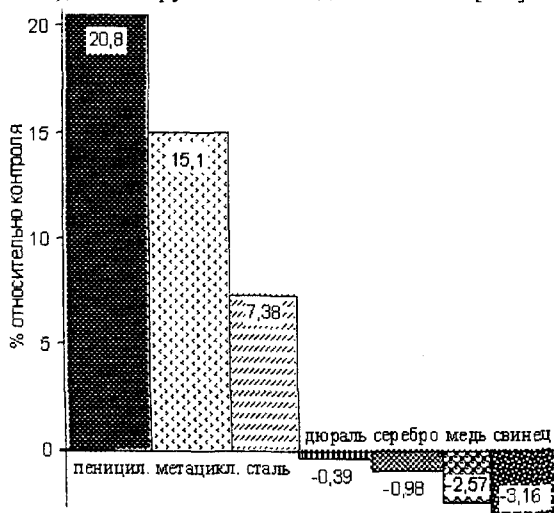


Рис. 1. Зависимость биологической активности воды от вещества информационной матрицы, использованной при активации

Менее изучена зависимость результатов от применения различных веществ, используемых в качестве ИМ, при прямом информационном воздействии.

Исследования показали, что независимо от метода, при информационном воздействии с применением пенициллина и метациклина сохраняется модальность воздействующего фактора [5-7]. В обоих случаях эффективность информационного воздействия на микроорганизмы с применением матрицы-пенициллина в среднем на 4-6% превышала эффективность воздействия с применением матрицы-метациклина (рис. 2). Это позволяет предположить, что зависимость эффективности опосредованного информационного воздействия от вещества ИМ распространяется на метод прямого информационного воздействия.

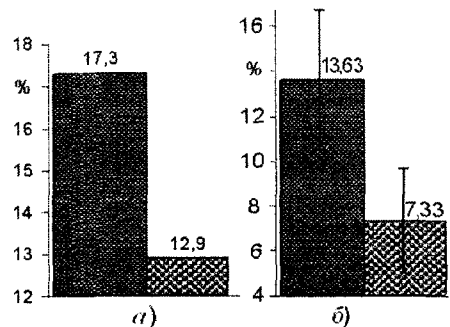


Рис. 2. Зависимость показателя эффективности информационного воздействия от вещества информационной матрицы: а - прямое воздействие; б - опосредованное воздействие активированной водой

Систематические исследования взаимодействия торсионного компонента излучения квантовых излучателей с веществом ИМ до настоящего времени не проводились. Не изучен механизм модуляции торсионного компонента излучения информацией о структуре спиновой системы ИМ. К нерешенным проблемам относится вопрос о «живучести» матрицы – сохранении ее информационных свойств в условиях многократного воздействия излучения на ее структуру и т.д. Актуальность таких исследований определяется

как потребностями быстро развивающихся прикладных задач применения информационных методов в медицине и различных направлениях биотехнологии, так и необходимостью развития фундаментальных представлений о механизмах информационного обмена на уровне «вещество-поле». Данная работа содержит результаты исследования зависимости эффективности информационного воздействия на микроорганизмы от порядка сочетания двух ИМ.

Методика исследования

Методика исследования основана на одновременной регистрации и последующем сравнении жизнедеятельности дрожжевых клеток в группах «экспериментальных» популяций, подвергшихся информационному воздействию, и контрольных популяций, в которых микроорганизмы воздействию не подвергались. Жизнедеятельность дрожжевых клеток определялась из выражения:

$$\frac{(ПЗА)_{\text{экс}} - (ПЗА)_{\text{контр}}}{(ПЗА)_{\text{контр}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $(ПЗА)_{\text{экс}}$ – среднее значение показателя зимазной активности в группе экспериментальных популяций;

$(ПЗА)_{\text{контр}}$ – среднее значение показателя зимазной активности в группе контрольных популяций.

О показателе зимазной активности судили по величине газовыделения в популяции.

В качестве источника торсионного компонента излучения использовался импульсный светодиодный излучатель с длиной волны $\lambda = 590$ нм (желтое свечение, 100 светодиодов типа КИПД40ж20-ж п6, световое пятно 100x100 мм); Частота повторения импульсов 3,2 кГц; длительность импульса возбуждения 150 нс. Продолжительность воздействия во всех экспериментах – 90 с.

В каждом эксперименте участвовало 2 группы по 8 популяций. В «экспериментальной» группе дрожжи подвергались информационному воздействию; в контрольной группе информационное воздействие на дрожжи не производилось.

С целью повышения достоверности результатов экспериментальных исследований проводились серии из 10 однотипных экспериментов. Выборки в каждой серии экспериментов содержали 80 чисел.

Результаты экспериментов

На рис. 3 приведен результат 4-х серий экспериментов, в которых в качестве информационных матриц использовались пенициллин и медь.

Информационное воздействие с применением матрицы-пенициллина привело к повышению жизнедеятельности дрожжевых клеток на 5,1% относительно контроля. Воздействие с применением матрицы-меди снизило жизнедеятельность дрожжевых клеток на 1,1% относительно контроля.

Воздействие на дрожжевые клетки излучением, пропущенным сначала через матрицу-пенициллин, а затем матрицу-медь, привело к повышению жизне-

деятельности относительно контроля на 1,1%. При обратном порядке расположения информационных матриц показатель жизнедеятельности в группе экспериментальных популяций составил 3%.

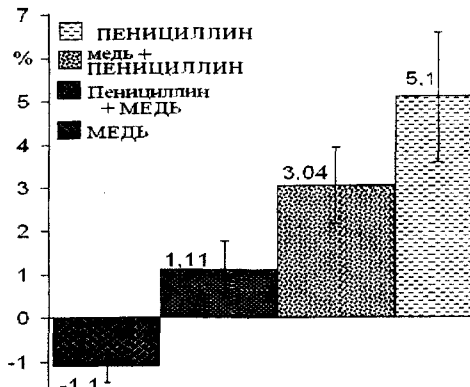


Рис. 3. Зависимость эффективности информационного воздействия от порядка сочетания информационных матриц меди и пенициллина

На рис. 4 приведены результаты 4-х серий экспериментов, в которых в качестве информационных матриц использовались пенициллин и свинец.

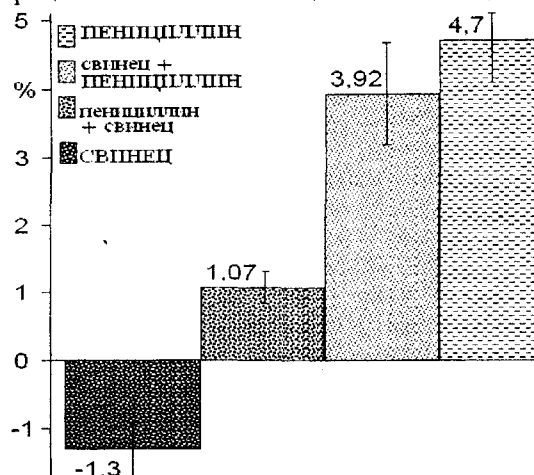


Рис. 4. Зависимость эффективности информационного воздействия от порядка чередования информационных матриц свинца и пенициллина

Информационное воздействие с применением матрицы-пенициллина привело к повышению жизнедеятельности дрожжевых клеток на 4,7% относительно контроля. Воздействие с применением матрицы-свинца снизило показатель жизнедеятельности на 1,1%. При пропуске излучения через две матрицы результат воздействия зависел от порядка их сочетания. Как и в результатах, приведенных на рис. 3, биологическая активность воздействующего фактора, обусловленная его информационным насыщением («информационной модальностью»), определялась, в основном, информационными свойствами «выходной» матрицы – обращенной к объекту воздействия.

Обнаруженная закономерность повторяется при сочетании иных веществ в качестве ИМ. На рис. 5 представлены результаты 4-х серий экспериментов с участием стальной и медной матриц.

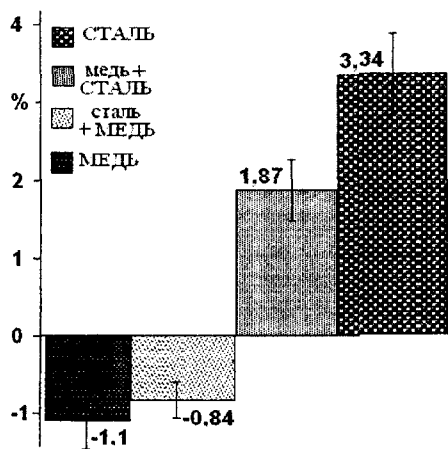


Рис. 5. Зависимость эффективности информационно-воздействующего от порядка чередования информационных матриц стали и меди

В отличие от примеров, приведенных на рис. 3 и 4, в которых четкая зависимость эффективности информационного воздействия от структуры спиновой системы использованных веществ отсутствует, на рис. 5 заметна преобладающая роль меди, использованной в качестве выходной матрицы.

Отличительная особенность результатов информационного воздействия с участием двух пространственно разделенных веществ в качестве ИМ заключается в том, что показатели биологической активности воздействующего фактора, полученные при воздействии, всегда занимают промежуточные значения между значениями показателей, полученных при использовании ИМ, содержащих одно из этих веществ.

Результирующее информационное содержание («модальность») излучения, пропущенного через пространственно разделенные вещества, отражает процесс взаимодействия двух информационных составляющих на полевом уровне. Этот процесс имеет неаддитивный характер, поскольку его результат зависит от порядка сочетания веществ.

Обнаружено, что модальность излучения определяется в основном, информационными свойствами «выходной» матрицы, обращенной к объекту.

Литература:

- 1 Акимов А.Е. Эвристическое обсуждение проблемы поиска дальностей. EGS-концепция. МНТЦ ВЕНТ. М.: 1991.
- 2 Бобров А.В. Торсионный компонент электромагнитного излучения. Информационные торсионные поля в медицине и растениеводстве. Депонированная работа. ВИНТИ, Деп. № 635-В98, М.: 1998.
- 3 Бобров А.В. Исследование влияния параметров информационного воздействия с применением квантовых генераторов на жизнедеятельность биологических объектов. Отчет о НИР. ОрелГТУ. – Гос. регистр. № 01.2.00 105789, Орел: 2002 – 85 с.
- 4 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. ОрелГТУ: 2003. – С. 313-350.
- 5 Бобров А.В. Биологические и физические свойства активированной воды. ВИНТИ, Деп. № 2282-В2002. М.: 1999.
- 6 Бобров А.В. Полевые информационные взаимодействия. ОрелГТУ: 2003. – С. 378-429.
- 7 Бобров А.В. Исследование факторов, определяющих биологическую активность воды. Препринт № 1. – ОрелГТУ. – Орел: 2004. – С. 29.

УДК. 616.073

Канд. техн. наук, доц. Егоров Б.А., асп. Бодров М.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УДАРНОГО ОБЪЕМА СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

The article contents mathematical description of systolic volume that based on experimental data. In addition, article includes review of different mathematical methods that can be applying description of systolic volume under eternal influence. Besides article presents new unique formula which allows to calculate systolic volume using change of arterial pressure.

Ударный объем сердца (УО) является одним из основных параметров, характеризующих способность организма воспринимать внешние физические нагрузки. Такими нагрузками могут быть как физическая работа, так и воздействие физическими полями, например, с лечебной целью. Среди лечебных воздействий физическими полями наиболее распро-

странено токовое воздействие (электротерапия) силой 0-50 мА, которое применяется для лечения различных заболеваний и последствий травм в более чем 40% случаях [1], что обусловлено целым рядом существенных преимуществ, таких, как минимум побочных эффектов, локальность и направленность воздействия. Эффективность такого способа лечения

значительно зависит от особенностей организма пациента, то есть от того, способен ли организм воспринимать нагрузку без нежелательных последствий. Современные методики лечения, руководства и рекомендации [2] рассчитаны на субъективную оценку самочувствия пациента специалистом во время процедуры, что приводит не только к потере эффективности лечения, но и к нежелательным последствиям. Попытки ввести коррекцию лечебного воздействия за счет таких откликов, как изменения частоты пульса или дыхания, артериального давления и др. недостаточно эффективны, т.к. названные показатели значительно зависят от эмоционального состояния и очень нестабильны [3]. В этом смысле УО является более перспективным показателем [4]. Однако измерение УО в процессе токовых воздействий не представляется возможным традиционной кардиоаппаратурой из-за опасности прохождения воздействующих токов через электроды отведения. Проведенные на кафедре «ПМиС» ОрелГТУ эксперименты [3] с использованием принципов экотомоскопии позволили исследовать неизученные ранее изменения УО от воздействующего по принципу амплипульсотерапии тока. Полученные в ходе исследования данные могут быть использованы для создания биоуправляемых аппаратов с биологической обратной связью, использующих УО в качестве информативного параметра, но это затруднено сложностью измерения УО [5]. Данная задача может быть решена двумя способами: использованием математических методов, позволяющих найти зависимость УО от силы воздействующего

тока, или определением параметра, непосредственно связанного с УО и пригодного для измерения.

Полученные зависимости могут быть использованы для программирования микроконтроллера.

Математические методы исследования

Представим экспериментальные данные для двух пациентов в виде корреляционного поля на рис. 1.

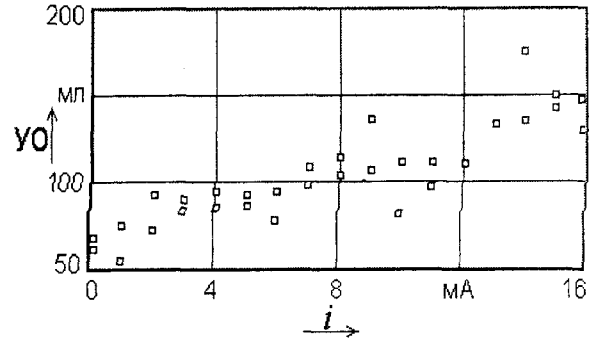


Рис. 1. Корреляционное поле

Произведем аппроксимацию экспериментальных данных, применяя полином вида:

$$d + c \cdot x + b \cdot x^n + a \cdot x^{n+1} + \dots + m \cdot x^i, \quad (1)$$

где a, b, c – коэффициенты полинома,
 d – свободный член полинома,
 i, n – степень полинома и степень члена полинома.

Для определения коэффициентов полинома используется система уравнений, которая для уравнения регрессии 4-го порядка имеет следующий вид:

$$\begin{cases} b_0 \cdot n + b_1 \cdot \sum_{i=0}^4 IA_i + b_2 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^2 + b_3 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^3 + b_4 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 = \sum_{i=0}^4 UO A_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^2 + b_1 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^3 + b_2 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 + b_3 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^5 + b_4 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^6 = \sum_{i=0}^4 (IA_i)^2 \cdot UO A_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^3 + b_1 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 + b_2 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^5 + b_3 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^6 + b_4 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^7 = \sum_{i=0}^4 (IA_i)^3 \cdot UO A_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 + b_1 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^5 + b_2 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^6 + b_3 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^7 + b_4 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^8 = \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 \cdot UO A_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i) + b_1 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^2 + b_2 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^3 + b_3 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^4 + b_4 \cdot \sum_{i=0}^4 (IA_i)^5 = \sum_{i=0}^4 (IA_i) \cdot UO A_i, \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) позволяет получить значения коэффициентов полинома. Формулы (3), (4) являются полиномами 3^й и 10^й степеней:

$$UO_{appr}(I) = 0,22 \cdot I^3 - 4,5 \cdot I^2 - 28 \cdot I + 47, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} UO_{appr}(I) = & 3,45 \cdot I^{10} + 13,069 \cdot I^9 - 3,05 \cdot I^8 - \\ & - 64,33 \cdot I^7 - 55,272 \cdot I^6 + 89,694 \cdot I^5 + 130,42 \cdot I^4 - \\ & - 19,705 \cdot I^3 - 71,204 \cdot I^2 + 7,562 \cdot I + 110,4 \end{aligned} \quad (4)$$

где I – значение силы терапевтического тока, мА.

Аппроксимация полученных результатов полиномами вида (3) и (4) представлена на рис. 2.

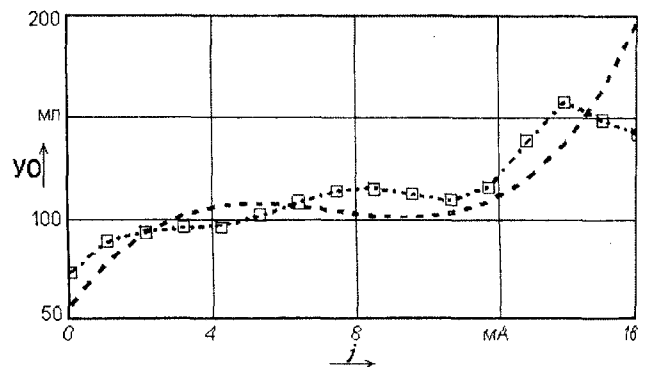


Рис. 2. Аппроксимированные функциональные зависимости между УО и I

Как видно из рис. 2, усредненные экспериментальные данные (обозначены квадратами) лучше всего аппроксимируются полиномом 10 степени (штрихпунктирная линия на рис. 2). Применение полиномов других видов ограничено немонотонностью и наличием «крутых» перегибов у аппроксимируемой функции. Применение сплайн-аппроксимации или адаптированной сплайн-аппроксимации не дает лучшего результата [6]. Аналогичный результат аппроксимации дает полином Эрмита, но его использование усложняет алгоритм программы микроконтроллера.

Значения отклонений Δ для каждой точки аппроксимированных функций вычислены по формуле:

$$\Delta = УО_{оп}(I) - УО_{сп}. \quad (5)$$

Значения Δ для полинома (3) даны в таблице 1. Как видно из таблицы, значение $\Delta_{max} = 20$ мл.

Проведем анализ адекватности использования полинома (4). Основным параметром, определяющим адекватность модели, является коэффициент детерминации K , определяющий наличие или отсутствие связи между данными [7], вычисляемый по формуле:

$$K = \frac{Qr}{Qe}, \quad (6)$$

где Qr , Qe – коэффициенты.

Вычислим значение Qr по формуле:

$$Qr = \beta \cdot A^T \cdot \bar{Y}O - n \cdot Y\bar{O}^2, \quad (7)$$

где A^T – матрица значений правой части системы (2);

β – матрица значений коэффициентов b_n ;

$\bar{Y}O$ – вектор средних значений $УО$ 3-х пациентов.

Вычислим значение Qe по формуле:

$$Qe = \sum_{i=1}^{15} (Y\bar{O} - \bar{Y}O)^2. \quad (8)$$

Вычислим значение Qu по формуле:

$$Qu = Qr + Qe. \quad (9)$$

В результате вычисления коэффициента K по формуле (6), получим: $K = 0,9$.

Проверим гипотезу о распределении Фишера, используя следующую формулу:

$$F = \frac{Qr \cdot (n - k)}{(n - k) \cdot Qe}. \quad (10)$$

В результате вычисления получили $F = 0,909$. Сравним его с табличным значением $F(5,3)$, $p = 0,975$. $F(5,3) = 14,78$. Вычисленное значение меньше табличного, значит, гипотеза принимается, $K = 0,9$, следовательно, модель можно признать адекватной.

Вычислим доверительные интервалы для каждого коэффициента b_i по формулам:

$$b_0 = t \cdot k \cdot s \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^5 УО_i / (5 \cdot Qx)}, \quad b_1 = t \cdot k \cdot s \cdot \sqrt{b/Qx}, \quad (11)$$

$$b_2 = t \cdot k \cdot s \cdot \sqrt{b_2^2/Qx}, \quad b_3 = t \cdot k \cdot s \cdot \sqrt{b_3^2/Qx}. \quad (12)$$

В формулах (11) – (12) коэффициент t распределения Стьюдента для $p = 0,975$; Коэффициент Qx вычисляется по формуле

$$Qx = \sum_{i=1}^5 n \cdot I^2 - \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 n \cdot I^2.$$

где n – количество результатов измерений.

Таким образом, доверительные интервалы каждого из коэффициентов системы (2) имеют

$$b_0 = 110 \pm 5,76; \quad b_1 = 7,562 \pm 1,35; \quad b_2 = -71,204; \\ b_3 = -19,705 \pm 2,56; \quad b_4 = 130,42 \pm 6,63; \quad b_5 = 89; \\ b_6 = -55,272 \pm 3,54; \quad b_7 = -64,33 \pm 6,23; \quad b_8 = -3, \\ b_9 = 13,069 \pm 2,45; \quad b_{10} = 3,457 \pm 1,05.$$

Для получения аналитической зависимости $УО$ и I можно воспользоваться разбитием риментальной зависимости (рис. 1) на элементарные прямые, которые описываются уравнением $y = kx + b$.

Из графика рис. 1, видно, что изменения исходят по одному закону, и можно выделить типичных участка: 0...5; 5...10; 10...15 мА.

Вывод уравнения каждой прямой осуществим методом наименьших квадратов. Общий вид уравнения представлен формулой:

$$S = \sum_{i=1}^{15} (УО_{сп} - k \cdot I - b)^2.$$

Для первой прямой получаем систему уравнений

$$\begin{cases} S(k, b) = -\sum_{i=0}^5 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \cdot I \\ S(k, b) = -\sum_{i=0}^5 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \end{cases}$$

Решая ее при условии $S(k, b) = 0$, получаем значения коэффициентов $k = 5,273$; $b = 71,51$.

Уравнение для первой прямой имеет вид:

$$УО_1(I) = 5,273 \cdot I + 71,51.$$

Для второй прямой:

$$\begin{cases} S(k, b) = -\sum_{i=5}^{10} 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \cdot I \\ S(k, b) = -\sum_{i=5}^{10} 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \end{cases}$$

Решая ее при условии $S(k, b) = 0$, получаем значения коэффициентов $k = 1,529$; $b = 93,286$.

Уравнение для второй прямой имеет вид:

$$УО_2(I) = 1,529 \cdot I + 93,286.$$

Для третьей прямой:

$$\begin{cases} S(k, b) = -\sum_{i=10}^{15} 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \cdot I \\ S(k, b) = -\sum_{i=10}^{15} 2 \cdot (УО_{сп} - k \cdot I - b) \end{cases}$$

Решая ее при условии $S(k, b) = 0$, получаем значения коэффициентов $k = 8,543$; $b = 24,71$.

Уравнение для третьей прямой имеет вид:

$$УО_3(I) = 8,543 \cdot I + 24,71. \quad (21)$$

Графики зависимостей $УО(I)$, построенные по уравнениям (17), (19) и (21), представлены на рис. 3.

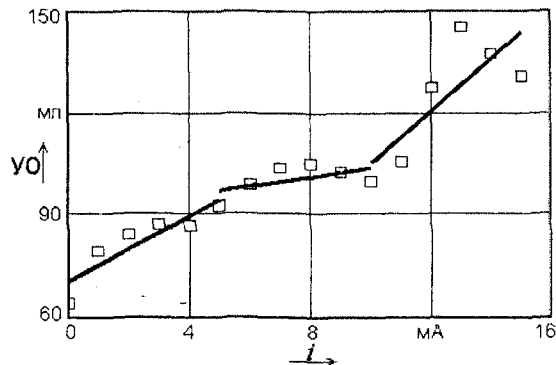


Рис. 3. Графическое представление зависимости $УО$ от I при использовании метода разбиений

Из полученных уравнений, описывающих изменение $УО$ от силы терапевтического тока, лучше всего для программирования микроконтроллера лучше всего подходят зависимости (15), (19), (21), что объясняется относительной легкостью программирования функций, содержащих аргументы только в первой степени, по сравнению со степенными функциями.

Большинство математических методов позволяют получить с достаточной точностью значения $УО$ в диапазоне экспериментальных данных. Вне диапазона экспериментального исследования вероятность получения достоверных результатов очень мала. Так как производится математическая обработка усредненных данных, индивидуальные особенности каждого пациента не учитываются, что снижает достоверность полученных результатов. Поэтому наиболее целесообразно использование функциональной зависимости $УО$ и какого-либо другого параметра, изменение которого не сопряжено с трудностями.

В работе [8] неоднократно отмечалось, что $УО$ может быть косвенно вычислен по формуле Старра:

$$УО = 100 + 0,5 \text{ ПД} - 0,6 \text{ ДД} - 0,6 \text{ В}, \quad (22)$$

где ПД и ДД – пульсовое и диастолическое давление; В – возраст пациента.

В процессе проведенных исследований в Красноярской государственной медицинской академии [9] в формулу Старра (22) были введены поправки.

При оценке $УО$ замечено, что вычисления по формуле (22) отличаются от метода термодилуции в сторону уменьшения в среднем на 30%, а $УО$, вычисленный по модифицированной формуле Старра ближе к истинному значению, отличаясь от него на 10%. То же самое происходит с минутным объемом крови (МОК).

Однако формула Старра, даже модифицированная, не позволяет оценить изменение $УО$ в динамике,

поэтому требуется дополнительная модификация, позволяющая использовать данную формулу для динамического измерения $УО$.

Для дальнейшей модификации формулы Старра использованы следующие предположения:

– на изменение $УО$ влияет приращение систолического давления;

– на изменение $УО$ влияет приращение диаметра аорты.

Геометрически аорту можно представить в виде цилиндра с изменяющимися основаниями, что обусловлено приращением диаметра аорты при сокращении левого желудочка. Изменения оснований можно считать одинаковым ввиду малого времени сокращения желудочка. Высота цилиндра определяется временем сокращения желудочка и приращением систолического давления. Модель представлена на рис. 4.

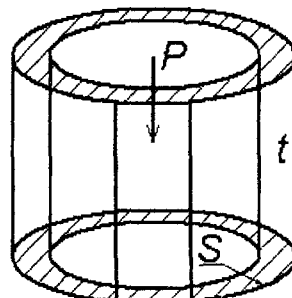


Рис. 4. Геометрическое представление $УО$

Формула, позволяющая вычислить $УО$ в динамике, представлена следующим выражением:

$$УО = (100 + 0,64 \text{ ПД} \cdot d \text{ СД} \cdot dD - 0,57 \text{ ДД}) \cdot (k/10 + 1,2), \quad (23)$$

где k – коэффициент терапевтического тока ($k = 2 \dots 8$);

СД – систолическое давление.

Применение в выражении (23) числа 100 обусловлено следующим соображением: значение $УО$ в покое не превышает 100 (обычно 60-70 мл). В динамике, при постоянно увеличивающейся нагрузке, как было выявлено в ходе проведенных экспериментов, значение $УО$ может возрасти до 150 мл и выше. Поэтому в динамическом режиме целесообразно получать слегка завышенное значение в начале измерения, что в дальнейшем будет компенсировано при увеличении нагрузки. Также из формулы Старра исключен возраст пациента, что объясняется динамикой процесса, и изменением $УО$, происходящего, в основном, за счет приращения систолического давления. Наличие в формуле пульсового давления, вычисляемого как разность между систолическим и диастолическим давлениями, позволяет уменьшить погрешность, вызванную погрешностью измерения систолического и диастолического давлений, которая обычно составляет 10 – 15%. Введение коэффициента k , изменяющегося от 1,3 до 1,8, математически определяет тангенс угла наклона прямой, заданной уравнением вида:

$$y = kx, \quad (24)$$

где $x = (100 + 0,64 \text{ ПД} \cdot d \text{ СД} \cdot dD - 0,57 \text{ ДД})$.

При переходе от одной точки измерения к следующей производится разбиение функциональной зависимости $УО$ от силы тока I на n -ое количество элементарных прямых. Количество таких прямых определяет достоверность вычисленного значения $УО$. График зависимости $k(I)$ представлен на рис. 5.

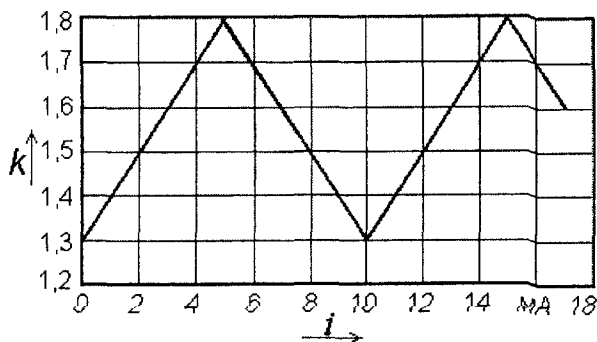


Рис. 5. График зависимости $k(I)$

Как видно из рис. 5 (исходные данные), коэффициент k повторяет изменение $УО$. Изменение $УО$, в основном, обусловлено приращением систолического давления, а приращение диаметра аорты мало по сравнению с приращением систолического давления, поэтому изменением диаметра аорты можно пренебречь, т.е. принять его постоянным, равным 0,03.

Тогда окончательная формула, используемая для вычисления значения, $УО$ будет иметь вид:

$$УО = (100 + 0,0192 \cdot ПД \cdot dCD - 0,57 \cdot ДД) \cdot (k/10 + 1,2). (25)$$

На рис. 6 представлены данные о значении $УО$, вычисленные с помощью формулы (25) и измеренные с помощью эхотомоскопа. Жирной линией построена функциональная зависимость (25), тонкой – значения $УО$, измеренные с помощью эхотомоскопа.

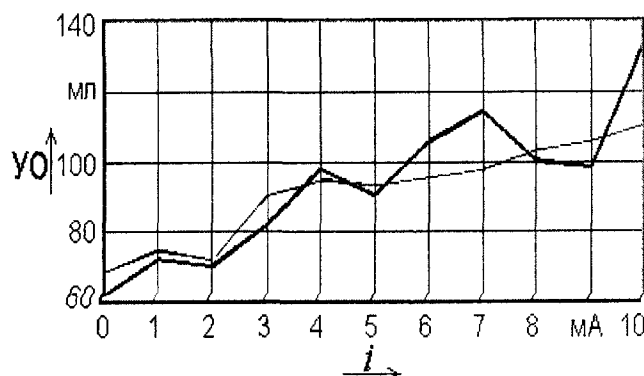


Рис. 6. Зависимость $УО(I)$, полученная с помощью измерения эхотомоскопом

Для расчета погрешностей предложено использовать значения $УО$, вычисленные для 3-х пациентов по модифицированной формуле (23), которые сведены в таблицу 2. Средние значения $УО$, усредненные по 3-м пациентам, сведены в таблицу 3.

Таблица 1 – Значения среднеквадратического отклонения

$I, \text{ мА}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\Delta, \text{ мл}$	-18	17	0,2	6,4	12	6	-2	-10	2,2	15	13	10	-2	3	10	20

Таблица 2 – Результаты вычислений по 3-м пациентам

Первый пациент		Второй пациент		Третий пациент	
$I, \text{ мА}$	$УО, \text{ мл}$	$I, \text{ мА}$	$УО, \text{ мл}$	$I, \text{ мА}$	$УО, \text{ мл}$
0	76,8	0	64,733	0	61,9
1	93,77	1	94,83	1	72,28
2	96,69	2	67,47	2	69,44
3	79,05	3	110,62	3	82,17
4	81,8	4	86,972	4	98,42
5	90,56	5	86,972	5	88,97
6	88,7	6	93,697	6	106,54
7	94,25	7	121,201	7	114,74
8	117,79	8	109,796	8	100,57
9	99,82	9	132,082	9	98,216
10	94,22	10	126,518	10	134,01
11	103,08	11	125,962	11	120
12	113,515	12	157,114	12	130
13	125,56	13	124,045	13	140
14	127,82	14	146,65	14	170
15	137,5	15	149,812	15	155

Таблица 3 – Средние значения ударного объема, измеренные эхотомоскопом и усредненные по 3-м пациентам

I, мА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
УО, мл	66,7	63,7	73,3	81,7	85,2	93,5	106,5	104,5	111,3	118	103,2	127,5	122,7	150,2	156,7	136,2

Таблица 4 – Значения СКО ударного объема

I, мА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СКО, мл	2,52	10,38	4,93	4,77	2,73	2,12	4,56	5,54	2,78	7,75	9,4	4,98	7,58	9,11	7,79	5

Вычислим отклонения значений ОУ, вычисленных с помощью модифицированной формулы Старра от усредненных, измеренных эхотомоскопом. Вычисления производятся по формуле:

$$\Delta УО = |УО_{ст} - УО_{эТ}|, \quad (26)$$

где $УО_{ст}$ – значение УО, вычисленное по формуле Старра для каждого пациента;
 $УО_{эТ}$ – среднее значение УО, измеренное эхотомоскопом и усредненное по 3-м пациентам.

Найдем сумму квадратов отклонений по формуле:

$$\Delta УО^2 = \sum_{i=0}^n (УО_{ст} - УО_{эТ})^2. \quad (27)$$

Вычислим значения дисперсии D и среднеквадратического отклонения (СКО) σ УО по формулам:

$$D = \frac{\sum_{i=0}^m (УО_{ст} - УО_{эТ})^2}{m}; \quad \sigma = \sqrt{D}, \quad (28)$$

где m – количество измерений по каждому пациенту ($m = 30$).

Вычисленные значения СКО ударного объема представлены в таблице 4.

В среднем, значение СКО во всем диапазоне измерения не превышает $\sigma = 5,779$, что незначительно для динамического режима, в котором важнее не точное численное изменение УО, а во сколько раз изменится значение УО при увеличении силы тока. График распределения СКО показан на рис. 7.

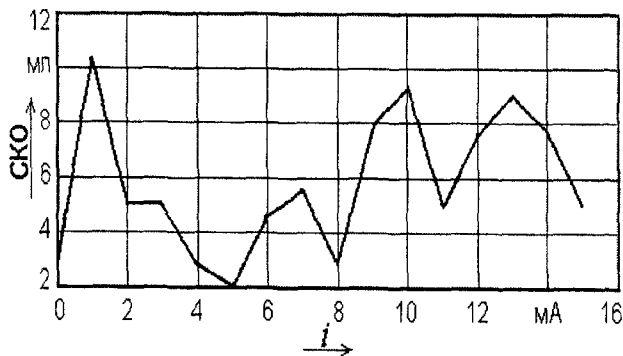


Рис. 7. График распределения СКО ударного объема

В среднем, значение СКО на промежутке измерения не более $\sigma = 5,7$ мл, значит, модифицированная формула (23) может быть использована для вычисле-

ния УО сердца при разработке биоуправляемых аппаратов, например токовой физиотерапии.

Для создания программы управления биоуправляемых физиотерапевтических систем с физической обратной связью, регулирующих величину воздействия на основании данных об изменении УО, могут быть использованы формулы, полученные с помощью математических методов приближения, в частности выражения (15), (19), (21). Оптимальным решением является использование формулы (25), позволяющей учесть изменение параметра, непосредственно связанного с УО – артериальным давлением, позволяя получить не значение УО, усредненное для «среднего» пациента, как при использовании известных математических методов, а индивидуальное значение.

Литература:

- 1 Ушаков А.А. Современная физиотерапия в клинической практике. - М.: «АМНИ», 2002. – 364 с.
- 2 Маркин С.П. Лечение и реабилитация больных, перенесших мозговой инсульт / Воронеж. Гос. мед. Акад. – Воронеж: 2004.
- 3 Турусбеков Б.Т., Абакаров А.М. Сердечно-сосудистая система и работоспособность спортсменов. – Фрунзе: 1982.
- 4 Бодров М.А., Егоров Б.А. Возможность использования ударного объема сердца для тренировки и реабилитации спортсмена // Физическая культура, спорт и туризм. Интеграционные процессы науки и практики. Матер. 3-й МНПК / Под ред. В.С. Макеевой. – Орел: ОрелГТУ, 2005, С. 232-238.
- 5 Егоров Б.А., Бодров М.А. Комплекс для исследования ударного объема сердца // Приборостроение 2005. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. // Под ред. А.В. Збрудского – Винница - Ялта, 2005, С. 42-48.
- 6 Егоров Б.А., Бодров М.А. Аппроксимация откликов сердечнососудистой системы человека на электровоздействия физиотерапевтического диапазона // Проблемы восстановительной медицины: Сб. науч. тр. МНПК. – Воронеж: 2005. – С. 56-69.
- 7 Дрейтер М. Прикладной регрессионный анализ / М. Дрейтер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика. – 1986.
- 8 Гайтон А. Физиология кровообращения. Минутный объем сердца и его регуляция. – М.: Медицина. – 1988. – 322 с.
- 9 Назаров И.П., Акулов В.Ю., Фурсов А.А., Шамаева С.В. Взаимосвязь показателей гемодинамики, определенных методом термодилуции и по формуле Старра / Красноярская гос. Мед. Акад. Краевая клиническая больница. – Красноярск: 2002. – С. 118-123.

Донцов В.М.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)415549, E-mail: dwm@mail.ostu.ru, dwm@mail57.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОЛЯ В ТЕПЛИЦАХ

This paper considers principles of formed of the light field computer-based model. This model was used to research of operation of louver light regulator in greenhouses.

Одним из решающих факторов, определяющих рост и развитие растений, является световой поток, падающий на листовую покров. В тепличном овощеводстве используются технологии, включающие в себя облучение растений естественным солнечным светом, искусственное и комбинированное облучение.

Современные теплицы должны проектироваться и строиться с учетом тех фактов, что в летние месяцы температура внутри теплиц может существенно превышать допустимый для нормального развития растений максимум, а в зимние месяцы естественная освещенность растений может не обеспечивать достаточный приток энергии для фотосинтеза.

Возможным компромиссным решением указанных проблем становится применение узкополосного жалюзийного экрана (УЖЭ) в качестве регулятора солнечной радиации, проникающей в теплицу [1]. Однако использование жалюзийного экрана связано с задачей разработки удовлетворительных алгоритмов функционирования автоматической системы управления положением жалюзи, иначе применение такого экрана может привести к отрицательным последствиям [2].

Конструктивно УЖЭ представляет собой несколько узких полос светоотражающего материала, смонтированных под крышей теплицы и имеющих возможность вращаться вокруг продольной оси.

Создание алгоритмов функционирования регулятора подразумевает наличие четкого представления о поведении объекта управления. В нашем случае это означает понимание сущности процесса изменения облученности растений в зависимости от положения солнца на небосклоне, угла поворота жалюзи, количество и места расположения источников искусственного освещения. Для формирования этих представлений были использованы методы численного моделирования распределения светового поля [3].

Известны несколько методов актуализации подобных моделей. Мы использовали метод прямой трассировки лучей. Суть метода заключается в следующем. Все объекты внутри теплицы (растения, жалюзи, элементы конструкции) представляются в виде простейших геометрических поверхностей и тел. Объекты могут иметь такие атрибуты, как прозрачность, коэффициенты отражения, преломления и диффузного рассеяния. Соответствующие коэффициенты могут быть заданы для различных областей спектра, в том числе в виде матрицы. Каждый источ-

ник искусственного освещения разбивается на малые участки, от каждого из которых формируется исходящий «луч света». Лучи могут иметь такие атрибуты, как яркость и спектральный состав. Спектральный состав задается вектором дискретных отсчетов на нескольких длинах волн. Яркость отдельного излучаемого луча определяется общей яркостью источника и его характеристикой направленности [4].

Солнечный свет моделируется потоком параллельных лучей, исходный угол падения которых задан широтой местности, текущим временем года, временем суток и географической ориентацией моделируемой теплицы. Астрономическое положение солнца рассчитывается по соответствующему алгоритму. Яркость «солнечных лучей» задается в зависимости от моделируемых облачности и прозрачности ограждающих конструкций теплицы.

Каждый сформированный луч может пересечь тот или иной объект теплицы, тогда путь луча прекратится, и, в зависимости от соотношения текущих атрибутов луча и объекта, будут сформированы или не сформированы вторичные (отраженные, рассеянные) лучи с новыми атрибутами, как показано на рис. 1. Расчет, выполняемый в соответствии с модулируемым процессом, будет продолжаться до тех пор, пока текущая яркость обрабатываемого луча не станет ниже некоторого порогового значения. Объекты, модулирующие растения, разбиваются на участки. Облученность каждого участка P_j определяется по формуле:

$$P_j = \sum_{i=1}^N S_i E_i, \quad (1)$$

где N – количество лучей, попавших на участок;

E_i – яркость каждого луча;

S_i – коэффициент, учитывающий спектральный состав луча.

Помимо облученности участка растения, определяется усредненный спектральный состав света, падающего на участок (в виде вектора).

Для завершения полноты картины распределения светового поля нами был использован определенный экспериментально коэффициент облучения растений рассеянным светом K_D , появляющимся за счет атмосферы Земли. С учетом K_D выражение (1) примет вид:

$$P_j = K_D P_j. \quad (2)$$

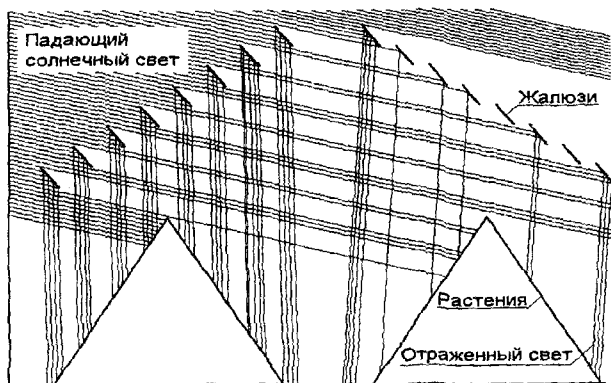


Рис. 1. Метод прямой трассировки лучей

Кроме того, в модель были введены алгоритмы, предназначенные для расчета сигналов U_k датчиков облученности растений в зависимости от места установки и технических характеристик этих датчиков:

$$U_k = R(S) \sum_{j=1}^M D_j P_j, \quad (3)$$

где D_j – коэффициент, учитывающий форму диаграммы направленности датчика;
 $R(S)$ – функция, определяющая согласованность спектральной характеристики чувствительности датчика с усредненным спектральным составом света, падающего на j -тый участок растения;
 M – количество участков растений, попадающих в зону «видимости» датчика.

Таким образом, рассмотренная модель может являться частью более глобальной модели всей системы управления совместно с объектом управления.

Важным этапом применения описанной модели для проектирования системы управления УЖЭ экраном является проверка степени адекватности результатов моделирования реальному объекту управления.

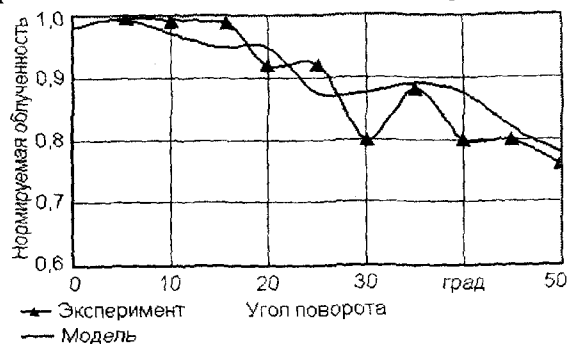
Выполнены замеры светового поля в экспериментальной теплице в зависимости от времени суток и положения жалюзи. Для проведения измерений использовался люксметр Ю-117 с косинусной насадкой.

По геометрическим характеристикам теплицы и жалюзийного экрана сформирована модель, результаты работы которой сопоставлены с экспериментальными данными. На рис. 2 приведены типичные зависимости суммарной нормированной облученности участка растений в теплице от угла поворота жалюзи.

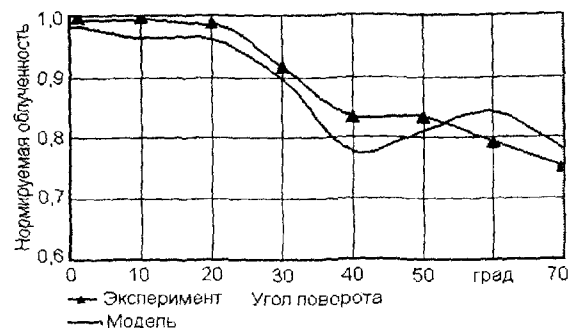
Особенностью данного исследования является наличие в теплице двускатной крыши, под каждым скатом которой был установлен жалюзийный экран с независимым управлением (рис. 1).

При проведении экспериментальных работ возникли существенные трудности, повлиявшие на точность полученных данных. Во-первых, установка жалюзи под определенным углом была возможна только путем отсчета времени работы электропривода, а вследствие неидеальности механических частей, вращение было неравномерным. Во-вторых, измерение облученности растений в различных точках теплицы

для нескольких положений жалюзи потребовало значительного времени (до 15 мин), а за это время в ряде опытов существенно менялись метеорологические условия. Повышение точности измерений возможно статистическим усреднением большого объема материала с учетом поправок на время года, но получение достаточного объема экспериментальных данных сопряжено с большими экономическими затратами.



а) Скат 1 – 25 июня, 14 часов



б) Скат 2 – 25 июня, 14 часов 30 минут

Рис. 2. Зависимость облученности растений от угла поворота жалюзи

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование модели прямой трассировки лучей для расчета светового поля в теплице вполне оправдано, а модель является адекватной целям проектирования системы управления. Разница между экспериментальными и расчетными параметрами составила не более 10 %, что допустимо для светотехнических величин в сельскохозяйственном производстве.

Литература:

- 1 Шарупич В.П. Радиационный режим и светотехническое оборудование теплиц 0 - VII световых зон СССР. – Орел: МИИП. – «Поиск», 1992.
- 2 Проведение экспериментальных исследований теплозащитных свойств жалюзийного узкополосного экрана СТЭЖ-1 по снижению перегрева в летних условиях в экспериментальной теплице в АОЗТ СХП «Нежинское» в соответствии с гос. контрактом №144.17.2.26.99 / Отчет о НИР. – Орел: «ГИПРОНИСЕЛЬПРОМ», 2001, 47 с.
- 3 Донцов В.М. Система управления трансформирующимся жалюзийным экраном // Сб. науч. тр. учёных Орловской обл. – Вып. 2. – Орел: 1996. – С. 69-73.
- 4 Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Д-р техн. наук, проф. Подмастерьев К.В., канд. техн. наук, доц. Мишин В.В., канд. техн. наук Марков В.В.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

The result of mathematical model the electrical resistive of the bearing of rolling is produce. The elaborated mathematical model is account micro- and macro geometry of the bodies and walks of rolling of the rings of bearing, the several parameters of bearing and the regime his exploitation.

Постановка задачи моделирования

Одним из важнейших критериев, определяющим эксплуатационные характеристики, в частности долговечность, подшипника качения, является состояние смазки в его зонах трения, которое, в свою очередь, формируется в результате совместного воздействия внутренних и внешних факторов, таких, как микро- и макрогеометрия тел и дорожек качения колец, свойства конструкционных материалов, объем и реологические свойства смазочного материала, нагрузка, частота вращения, температура, степень защиты зон трения от абразивных частиц и т.п.

В этой связи предлагается использовать состояние смазки в подшипнике в качестве комплексного критерия в процессе диагностирования, контроля и прогнозирования его технического состояния. Смазочный материал обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому флуктуации толщины смазочной пленки, ее разрушения приводят к соответствующим изменениям электрического сопротивления (R) подшипника. Это свойство применяется для количественной оценки состояния смазки в зонах трения при разработке электрорезистивных методов диагностирования [1].

Процессы, происходящие в зонах трения, носят сложный характер, поэтому для получения достоверной информации об объекте диагностирования необходимо иметь соответствующие математические модели, адекватно их описывающие. Известна обобщенная математическая модель вероятности разрушения смазочного слоя в зонах трения подшипника качения [2]. Ее выходным параметром является оцениваемая с помощью диагностического параметра НИВ вероятность микроконтактирования (P_k) в подшипнике. Несмотря на широкие исследовательские возможности известной модели, ее практическое применение ограничено только режимом смешанной смазки в подшипнике, так как при граничной смазке P_k принимает единичное значение, а при жидкостной – нулевое.

Данная работа направлена на усовершенствование известной модели. Также рассматривается смазанный

и нагруженный однорядный подшипник качения (ПК), имеющий два кольца и z тел качения. В качестве выходного параметра выбран параметр R , который является более универсальным и пригодным к использованию при различных режимах смазки в подшипнике.

В основу обобщенной математической модели электрического сопротивления подшипника заложена гипотеза о случайном характере изменения этого сопротивления. Схема построения модели получена объединением двух схем, первая из которых (рис. 1, а) раскрывает взаимосвязь сопротивления фрикционного контакта тела и дорожки качения с конструктивными параметрами подшипника, режимами его эксплуатации и свойствами смазочного материала, а вторая (рис. 1, б) – представляет собой электрическую схему замещения подшипника качения (ПК).

Принятые допущения

– основными составляющими электрического сопротивления подшипника являются сопротивление стягивания и сопротивление смазочной пленки;

– для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя (нормированное выражение кривой опорной поверхности) и материала по высоте единичного выступа (форма выступа);

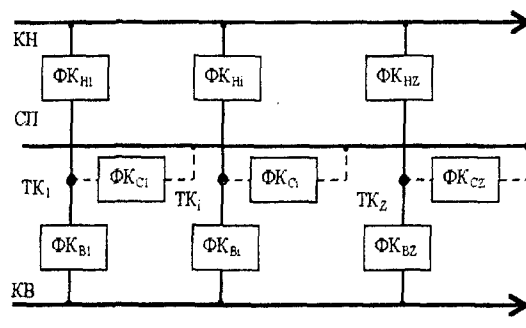
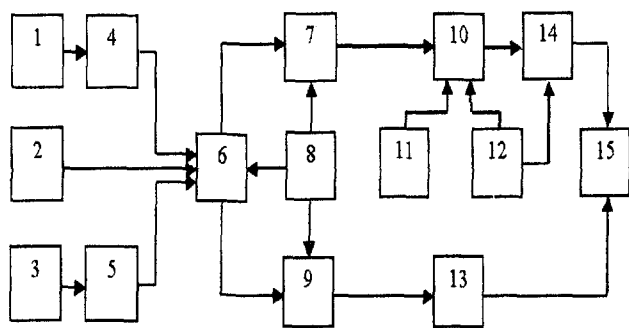
– в качестве модели единичной неровности принимается сферический сегмент;

– контакт неровностей считается упругим, для описания деформации используются формулы Герца;

– для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется нормальный закон распределения вероятности;

– расчеты выполняются применительно к контакту шероховатой поверхности с гладкой, переход к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется оценкой композиции законов распределения высоты микронеровностей контактирующих поверхностей;

– результаты математического моделирования получены без учета влияния центробежных сил и гороскопических моментов.



а)

б)

1 – шероховатость; 2 – свойства материалов; 3 – параметры макрогеометрии; 4 – распределение материала по высоте шероховатого слоя; 5 – условная кривизна поверхностей; 6, 7 – фактическая площадь контакта и давление; 8 – нагрузка; 9 – размеры пятен контакта; 10 – толщина смазочной пленки; 11 – режимы эксплуатации; 12 – свойства смазочного материала; 13, 14 и 15 – сопротивления стягивания, смазочной пленки и контакта; ПК – подшипник качения; КН, КВ – кольцо наружное и внутреннее; ТК_{*i*} – *i*-е тело качения; СП – сепаратор; ФК_{Н_{*i*}}, ФК_{В_{*i*}}, ФК_{С_{*i*}} – фрикционные контакты *i*-го тела качения с наружным кольцом, внутренним кольцом и сепаратором

Рис. 1. Схема построения обобщенной математической модели электрического сопротивления ПК

Математическое описание геометрии рабочих поверхностей подшипника качения

Одним из основных параметров технического состояния ПК является качество рабочих поверхностей его деталей, поэтому при составлении математической модели возникает необходимость в математическом описании геометрии рабочих поверхностей.

При обработке поверхности ее геометрия образуется в результате суммарного воздействия периодических факторов и случайных возмущений. Вид обработки, кинематика, подача, биение шпинделя, дисбаланс заготовки, профиль режущих кромок инструмента и другие постоянно действующие факторы определяют систематическую (периодическую) составляющую геометрии, а процессы, происходящие при деформации обрабатываемого материала (вырывы, сколы, наросты и т.п.), формируют ее случайную составляющую. При монтаже подшипника геометрия дорожек качения претерпевает изменения, характеризующие отклонения от круглости, а при эксплуатации и транспортировке появляются различные локальные дефекты. Таким образом, профиль реальной рабочей поверхности, например, дорожки качения, имея систематические и случайные составляющие, характеризуется в общем случае регулярными отклонениями от круглости – макроотклонениями (овальность или огранки соответствующего порядка), шероховатостью, а также локальными дефектами (трещина, лунка, раковина и т.п.).

Среди методов описания профиля поверхности наибольшее распространение находят методы, основанные на использовании законов распределения вероятности высот неровностей, корреляционных функций, спектральной плотности распределения высот неровностей, ряда Фурье, теории случайных полей [3, 4]. На основе сравнительного анализа методов с учетом того, что моделируемый профиль замкнут, в качестве базового выбран метод гармонического разложения, согласно которому профиль пред-

ставляется в виде совокупности гармонических составляющих отклонений текущего радиуса от геометрического центра его номинального сечения. С учетом рекомендаций [5] радиус дорожки качения наружного (внутреннего) кольца подшипника $R_{Н(В)}$ в зависимости от угловой координаты φ предложено описывать следующим выражением:

$$R_{Н(В)}(\varphi) = R_{Н(В)0} + \sum_1^p Q_{Н(В)k} \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_{Н(В)k}), \quad (1)$$

- где $R_{Н(В)0}$ – средний радиус дорожки качения;
- Q_k, φ_k – амплитуда и фазовый угол k -й гармоники отклонения;
- k – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трехвершинную огранку и т.п.);
- p – предельный номер учитываемой гармоники.

Данный метод принят для описания регулярных отклонений от круглости. Его можно использовать и для моделирования шероховатости, однако с учетом высокого качества рабочих поверхностей деталей подшипника и анализа операции их финишной обработки для описания шероховатости выбран метод, использующий законы распределения вероятности высоты неровностей профиля. Выбор обусловлен тем, что на уровне шероховатости в профиле доминирует случайная составляющая (для поверхностей, полученных шлифованием с доводкой, отношение среднего квадратического отклонения случайной составляющей профиля к полному среднему квадратическому отклонению профиля R_q составляет 0,8 – 0,97 [6]).

Для описания распределения материала по высоте шероховатого слоя приемлемым с учетом характера финишной обработки поверхностей является нормальный закон распределения вероятности [7]. Дифференциальная функция распределения высоты микронеровностей рабочих поверхностей тел и дорожек качения ПК может быть выражена функцией:

$$f(h_w) = \frac{1}{R_q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{h_w^2}{2 \cdot R_q^2}\right), \quad (2)$$

где R_q – среднеквадратическое отклонение профиля

$$R_q = R_a \cdot \sqrt{\pi/2} \quad [2];$$

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля;

h_w – высота неровностей профиля.

В реальном трибосопряжении обе контактирующие поверхности являются шероховатыми. Для учета микрогеометрии обеих поверхностей в выражении (2) используются приведенные характеристики [3]:

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}. \quad (3)$$

Индексами 1 и 2 отмечены параметры шероховатости соответствующих поверхностей.

Сложнее обстоит дело с моделированием локальных дефектов поверхностей, поскольку необходимо задавать не только ряд их размерных параметров, но и различные виды профилей. Наиболее распространенными повреждениями являются дефекты типа «впадина» – лунки, раковины, риски, трещины. Для описания их профилей предложены функции $D(x)$ на базе полиномов Чебышева и Баттерворта:

$$\begin{cases} D(x) = D_{max} / \sqrt{[m_n(x-x')]^s + 1} \\ D(x) = D_{max} / \sqrt{\varepsilon^2 T_n^s m_n(x-x') + 1} \end{cases}, \quad (4)$$

где s, ε – коэффициенты профиля дефекта;

D_{max}, m_n и x' – соответственно, параметры глубины, протяженности и смещения дефекта;

$T_n(x)$ – полином Чебышева степени n с аргументом $m_n(x-x')$.

Обоснование выбора данных функций более подробно рассмотрено в работе [8]. Здесь лишь отметим, что представленные функции обеспечивают возможность моделирования различных по глубине, протяженности и характеру рельефа дефектов перечисленных выше типов путем задания соответствующих значений указанных в выражениях (4) параметров.

Обобщенная математическая модель электрического сопротивления подшипника качения

На основе приведенных выше рассуждений и с учетом ранее полученных в работе [7] данных разработана обобщенная компиляционная математическая модель электрического сопротивления работающего подшипника в реальных условиях эксплуатации опоры качения. Модель содержит математическое описание электрического сопротивления ПК, работающего при граничной или смешанной смазке между контактирующими поверхностями. Выражения, составляющие математическую модель для конкретного вида смазки в подшипнике, приведены в таблице 1.

Модель описывает характер влияния на электрическое сопротивление ПК таких характеристик, как номинальная макрогеометрия, регулярные макроотклонения (эксцентricность, овальность, огранка дорожек качения), шероховатость тел и дорожек качения, параметры локальных дефектов дорожек качения, электрические, механические, физические и химические свойства конструкционных и смазочных материалов, а также режимы и условия работы ПК в изделии (таблица 2). Для практического использования модели при выполнении теоретических исследований следует последовательно решать задачи согласно графе «Решаемая задача» таблицы 2.

Таблица 1 – Математическое описание электрического сопротивления подшипника качения

Граничная смазка	Смешанная смазка
1	2
$R_{\Pi} = \left(\sum_{i=1}^z \frac{1}{R_{\Sigma i}} \right)^{-1}$ (5)	
$R_{\Sigma i} = R_{Bi} + R_{Hi}$ (6)	
$R_{Hi} = K_{R1} \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{2}{D_2}} \right)^{-0.5} \cdot \Psi_R(h)$	$R_{Hi} = K_{R1} \cdot K_{R2} \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{2}{D_2}} \right)^{-0.5} \cdot \Psi_R(h)$ (7)
$R_{Bi} = K_{R1} \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{2}{d_2}} \right)^{-0.5} \cdot \Psi_R(h)$	$R_{Bi} = K_{R1} \cdot K_{R2} \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{2}{d_2}} \right)^{-0.5} \cdot \Psi_R(h)$ (8)
$\Psi_R(h) = \left[L \left(\frac{d}{R_q} \right) \cdot \left[1 - L \left(\frac{d}{R_q} \right) \right] + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \left[\frac{1}{2} - L \left(\frac{d}{R_q} \right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{4} \right]^{-0.5}$ (9)	

Продолжение таблицы 1

1	2
	$K_{R1} = \frac{\rho_m}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta}}; K_{R2} = \frac{\rho_{cm}}{\rho_m} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_{H(B)}}{A_{CH(B)} - A_{rH(B)}} \quad (10)$
	$A_{rH} = \pi \cdot N \cdot \beta \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{2}{D_2}} \right) \cdot \Psi_A(h) \quad (11)$
	$A_{rB} = \pi \cdot N \cdot \beta \cdot \left(R_p - a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{2}{d_2}} \right) \cdot \Psi_A(h) \quad (12)$
	$\Psi_A(h) = L \left(\frac{d}{R_q} \right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2} \right) - \frac{1}{2} \quad (13)$
	$N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}; d = R_p - \delta_{H(B)}; \beta = \sqrt{r_{np} \cdot r_{ноп}} \quad (14)$
	$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \sum \rho} \right)^2} - A_{Д} \quad (15)$
	$\delta_H = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{2}{D_2}} \quad (16)$
	$\delta_B = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{2}{d_2}} \quad (17)$
	$a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2 \cdot K}{\pi \cdot n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1 - \eta^2}{E} \right)^2} \cdot F_r^2; r_k = n_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (1 - \eta^2) \cdot F_r}{E \cdot \sum \rho}} \quad (18)$
-	$\begin{cases} \frac{\partial k_0(x)}{\partial x} = \frac{6\mu_b(V_a + V_b)[h_0 - h(x)] \exp[nk_0(x)]}{h^3(x)} \\ h(x) = h_{m1} - \delta + x^2(\lambda_a + \lambda_b)/2 + A'k_0(x)/E'_y + D(x) \end{cases} \quad (19)$
	$\begin{cases} \sum_0^{z-1} C_\delta(\varphi) [W(\varphi) \cos[\alpha - \chi(\varphi) + i\gamma] - 0,5G_r(\varphi)]^{3/2} \cos(\alpha + i\gamma) = F_r \\ \sum_0^{z-1} C_\delta(\varphi) [W(\varphi) \cos[\alpha - \chi(\varphi) + i\gamma] - 0,5G_r(\varphi)]^{3/2} \sin(\alpha + i\gamma) = 0 \end{cases} \quad (20)$
	$G_r(\varphi) = 2[R_u(\varphi) - D_w - R_b(\varphi)] \quad (21)$
	$F_i = C_\delta(\varphi) \{W(\varphi) \cos[\alpha - \chi(\varphi) + i\gamma] - 0,5G_r(\varphi)\}^{1,5} \quad (22)$

В таблице 1 использованы следующие условные обозначения: индексы $H(B)$, i свидетельствуют о принадлежности параметра наружному (внутреннему) кольцу и (или) i -ому телу качения; D_w – диаметр тела качения; D_2 (d_2) – диаметр по дну желоба наружного (внутреннего) кольца; D_3 (d_3) – диаметр желоба наружного (внутреннего) кольца; E и η – соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона; $\Sigma\rho$ – сумма главных кривизн соприкасающихся тел в начальной точке касания; F_r – радиальная нагрузка; $(2K/\pi a)$, a , n_a , n_b – коэффициенты; δ – сближение контактирующих поверхностей; $r_{пр}$, $r_{топ}$ – соответственно, радиусы закругления вершин микронеровностей в продольном и поперечном направлениях; ρ_m – удельное сопротивление пятна металлического контакта; n – число вероятных контактов (пятен контакта); r_k – радиус пятна контакта; R_Σ – сопротивление одновременного контакта тела качения с кольцами; R_B , R_H – соответственно, сопротивления контакта тела качения с внутренним и наружным кольцами подшипника; R_p – сопротивление подшипника приграничной смазке; $R_{см}$ – сопротивление подшипника при смешанной смазке; R_{1m} , R_{2m} – коэффициенты, определяемые кривизной контактирующих поверхностей; μ_0 , n_V – соответственно, динамическая вязкость и пьезокоэффициент вязкости смазочного материала; V – скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей; A_d – площадь локального дефекта; A_r , A_c – соответственно, фактическая и контурная площади контакта; $k_0(x)$, $h(x)$ – гидродинамическое давление и толщина смазочной пленки в точке с координатой x ; λ_a , λ_b – кривизны поверхностей до деформации; h_{m1} – наименьшее расстояние между недеформированными поверхностями; V_a , V_b – скорости перемещения поверхностей; α – координата ближайшего к F_r тела качения; W и χ – модуль и аргумент вектора смещения кольца; $\gamma = 2\pi/Z$ – угловое расстояние между телами качения; z – число тел качения; C_δ , G_r – упругая характеристика и радиальный зазор в подшипнике; S_{m1} , S_{m2} – средний шаг неровностей профиля в двух перпендикулярных сечениях (продольном и поперечном); $h_{ш}$ – высота неровностей профиля; $L(d/R_q)$ – функция Лапласа (табулирована); N – число всех неровностей, находящихся в пределах номинальной площади контакта двух поверхностей; d – номинальный зазор между контактирующими поверхностями.

Для проведения теоретических исследований разработаны алгоритм и программа расчета электрического сопротивления (R) работающего подшипника. Программа позволяет исследовать вид и параметры функции изменения R от времени. При этом обеспечивается возможность раздельного или совместного моделирования шероховатости и отклонений от круглости (например, эксцентricность, овальность или огранка заданного порядка) дорожек качения обоих колец подшипника.

Исходными данными для расчетов являются:

- конструктивные параметры подшипника (внутренний и наружный диаметры дорожек качения колец, число и диаметр тел качения и др.);
- параметры, характеризующие свойства материала деталей подшипника (модуль упругости, коэффициент Пуассона, удельное сопротивление);
- параметры режима эксплуатации подшипника (радиальная нагрузка, частота вращения, тип и количество смазочного материала);
- параметры макрогеометрии и шероховатости тел и дорожек качения.

Таким образом, оценка состояния смазочной пленки в зонах трения подшипника по его электрическому сопротивлению является многопараметровой, что, с одной стороны, обеспечивает возможность реализации комплексного контроля состояния, характеризуемого совместным влиянием всей совокупности внутренних параметров ПК и внешних факторов, а с другой – создает условия контроля отдельных характеристик технического состояния ПК.

Литература:

- 1 Подмастерьев К.В. *Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения*. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
- 2 Подмастерьев К.В. *Обобщенная модель вероятности разрушения смазочного слоя в зонах трения подшипника качения // Известия ОрёлГТУ*. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орёл: ОрёлГТУ, 2003. – № 3. – С. 65-70.
- 3 Мышкин Н.К. *Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец*. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
- 4 Демкин Н.Б. *Теория контакта реальных поверхностей и трибология // Трение и износ*. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
- 5 Эльперин А.И. *Диагностирование реодинамики систем трения / А.И. Эльперин, А.К. Явленский, Г.И. Талашов*. – СПб.: Наука, 1998. – 142 с.
- 6 Витенберг Ю.Р. *Шероховатость поверхностей и методы ее оценки*. – Л.: Судостроение, 1971. – 106 с.
- 7 Марков, В.В. *Контроль подшипников качения по параметрам электрического сопротивления / В.В. Марков, В.В. Мишин // Контроль. Диагностика*, 2004. – № 9. – С. 30-41.
- 8 Пахолкин, Е.В. *Моделирование и теоретическое исследование влияния локальных дефектов рабочих поверхностей трибосопряжения на состояние смазочного слоя в зоне трения (на примере подшипника качения) / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Известия ОрёлГТУ*. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орёл: ОрёлГТУ, 2003. – № 3.

Таблица 2 – Содержание обобщенной математической модели электрического сопротивления подшипника качения

Решаемая задача	Рассчитываемые параметры	Параметры технического состояния системы						Свойства смазочного материала	Режимы	Комплексные расчетные параметры	Расчетные зависимости
		Внутренние параметры подшипника									
		Нормальная макрогеометрия, число тел качения	Регулируемые отклонения	Локальные дефекты	Шероховатость	Свойства материалов					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Определение радиальной нагрузки в контактных зонах	F_r	$R_{\text{экв}}, d_{\text{в}}, G_{\text{в}}$ $\xi, f_{\text{в(к)}}$ $D_{\text{в}}, \alpha$	$Q_{\text{в(к)}}$ $\varphi_{\text{в(к)}}$	-	-	$E_{\text{в(к)}}, E_{\text{с}}, h_{\text{к}}$ $(\sigma), h$	-	$F_{\text{в}}, F_{\text{с}}$	$C_{\delta}, \alpha_0, S_{\text{в(к)}}$	(20) – (22)	
Определение средней толщины смазочной пленки в контактных зонах	$h_{\text{ср(к)}}$	$R_{\text{экв}}, d_{\text{ср}}, f_{\text{ср(к)}}$ $D_{\text{ср}}, G_{\text{ср}}$	-	ε $\chi', D_{\text{ср(к)}}$ $T_{\text{ср(к)}}, m_{\text{к}}$ $A_{\text{к}}$	-	$E_{\text{в(к)}}, E_{\text{с}}, h_{\text{к}}$ $(\sigma), h$	$\mu_{\text{с}}, n$	$n_{\text{к}}$ или $n_{\text{с}}$	α_0, k_1, k_2 $S_{\text{в(к)}}, A'$	(19)	
Определение сближения тел качения с наружным и внутренним кольцами ПК	$d_{\text{ср(к)}}$	$D_{\text{в}}, D_{\text{с}}, D_{\text{вк}}$ $d_{\text{с}}, G_{\text{с}}$	$Q_{\text{в(к)}}$ $\varphi_{\text{в(к)}}$	-	-	$E_{\text{в(к)}}, E_{\text{с}}, h_{\text{к}}$ $(\sigma), h$	-	$F_{\text{с}}$	$S_{\text{в(к)}}, \alpha$	(16) – (18)	

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Определение конформной площади контакта тел качения с наружным и внутренним кольцами ПК	$A_{\text{вн}}^{\text{вн}}$	-	n_a, n_b, S_f	$A_{\text{в}}$	-	$E_{\text{н(в)}}, E_{\text{в}}, h_{\text{н(в)}}, h_{\text{в}}$	-	$E_{\text{в}}$	a	(15)
Определение фактической площади контакта тел качения с наружным и внутренним кольцами ПК	$A_{\text{вн}}^{\text{вн}}$	D_w, D_b, d_b, D_b, d_b	-	-	$R_{q1}, R_{q2}, R_{p1}, R_{p2}, S_{p1}, S_{p2}, r_{ps}, r_{per}$	-	-	-	$b, N, d, Y_d(b)$	(11) - (14)
Определение сопряжения контакта одного тела качения с наружным (внутренним) кольцом ПК	$R_{\text{в}}, R_{\text{н}}$	D_w, D_b, d_b, D_b, d_b	-	-	R_{q1}, R_{q2}	$r_{\text{н}}$	$r_{\text{вн}}$	-	$K_{\text{вб}}, K_{\text{вд}}, Y_K(h), b, N, h_b, r_K$	(7) - (10)
Определение сопряжения одновременного контакта одного тела качения с наружным и внутренним кольцами ПК	R_{Σ}	-	-	-	-	-	-	-	$R_{\text{в}}, R_{\text{н}}$	(6)
Определение сопряжения ПК	$R_{\text{н}}$	-	-	-	-	-	-	-	R_{Σ}	(5)

УДК 620.179

Канд. техн. наук, доц. Пахолкин Е.В., канд. техн. наук, Севрюгина Н.С.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: Eugene P@vpost.ru

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

The complex researches of characteristics the motor oils in the process of exploitation are describe. The methodic and equipment for experimental researches is offer. The description of original device for the diagnostic the motor oil by electrical parameter is give.

В источниках [1, 2] представлено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение пригодности относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r моторного масла в качестве диагностического параметра, обеспечивающего достоверную оценку технического состояния масла в процессе его эксплуатации. Практическое внедрение предлагаемого метода диагностирования предполагает разработку соответствующего инструментального и методического обеспечения. При этом возникает ряд исследовательских задач по обоснованию метрологических характеристик средства измерения (установление диапазона измерения, требований к точности измерительного средства, анализ характеристик вспомогательных средств). Не менее важными являются вопросы адаптации существующего методического обеспечения для диагностирования рассматриваемого объекта.

Анализ диапазона изменения диэлектрической проницаемости моторного масла и требований к точности измерения

Уже на этапе экспериментальных исследований [3] встала проблема выбора методического обеспечения и измерительных средств для измерения ϵ_r . Проведенный поиск показал, что наиболее близким по содержанию и назначению является нормативный документ (ГОСТ 6581-75), регламентирующий порядок проведения испытаний трансформаторных масел. Данный стандарт также регламентирует основные требования к используемым для измерения техническим средствам. На основании содержания стандарта была разработана экспериментальная измерительная установка и алгоритм измерения ϵ_r . Причем, на данном этапе, при отсутствии априорной информации о диапазоне изменения ϵ_r моторного масла в процессе его эксплуатации, измерения проводились с заведомо повышенной точностью.

В состав использованной в эксперименте измерительной установки входят:

- мост измерительный универсальный Е7-4;
- двухэлектродная цилиндрическая ячейка по ГОСТ 6581-75;

– термометр по ГОСТ 2823-73.

Измерение ϵ_r моторного масла проводилось по следующему алгоритму:

- контроль температуры в лаборатории;
- подготовка измерительной ячейки – очистка рабочих поверхностей обработкой Н-гексаном;
- измерение электрической емкости измерительной ячейки с воздухом;
- подготовка пробы и заполнение измерительной ячейки исследуемым маслом;
- измерение электрической емкости измерительной ячейки с маслом;
- выполнение действий по ГОСТ 6581-75 с целью оценки паразитной емкости измерительной ячейки.

К основным факторам, приводящим к формированию погрешности измерения ϵ_r в данном эксперименте, следует отнести следующее:

- инструментальная погрешность моста Е7-4;
- субъективная погрешность оператора;
- несовершенство метода измерения;
- влияние условий выполнения измерений.

Перечисленные факторы вносят различный вклад в суммарную погрешность измерений. Очевидно, что пренебречь первыми двумя факторами невозможно, и они вносят доминирующий вклад в погрешность. Третий фактор (несовершенство метода измерения ϵ_r) в определенной степени устраняется при использовании рекомендаций ГОСТ 6581-75.

Для оценки влияния температуры на результат измерения были проведены отдельные исследования, показавшие несущественность влияния данного фактора: при измерении электрической емкости ячейки с маслом в условиях изменения температуры в диапазоне от 10 до 50 °С результат измерения практически не изменяется.

Паспортные данные на мост Е7-4 регламентируют погрешности измерения в следующем виде (для диапазона значений от 10 до 100 пФ):

$$\delta = \left(2 + \frac{30}{C_x} \right), \quad (1)$$

где δ – относительная погрешность измерения электрической емкости C_x (пФ), %.

На рис. 1 представлен график $\delta(C_x)$, показывающий, что для диапазона значений $C_x = 30 \dots 70$ пФ погрешность δ (в начале диапазона измерения) может достигать 3 %. Значения погрешности δ вычислены по формулам, приведенным в ГОСТ 6581-75.

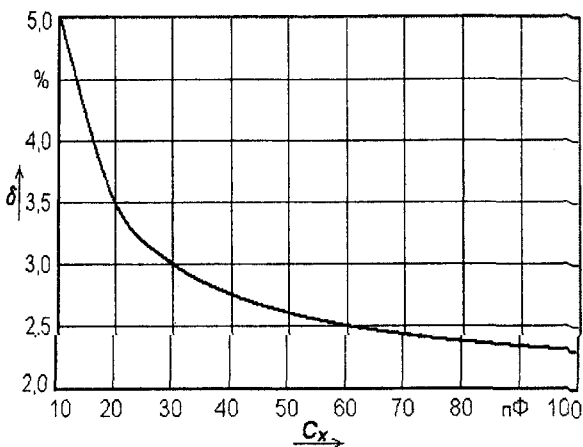


Рис. 1. Нормируемая погрешность моста E7-4

Используемый ГОСТ 6581-75 регламентирует, что погрешность измерений электрической емкости не должна превышать по модулю $(1+0,01C_x)$ пФ. В связи с этим были проведены дополнительные исследования точности измерений мостом E7-4. Применение образцового магазина электрической емкости показало, что реальное значение относительной погрешности δ_d в диапазоне значений $C_x = 35 \dots 75$ пФ заметно меньше (δ_d не превышает 1%). Результаты данных исследований показаны на рис. 2.

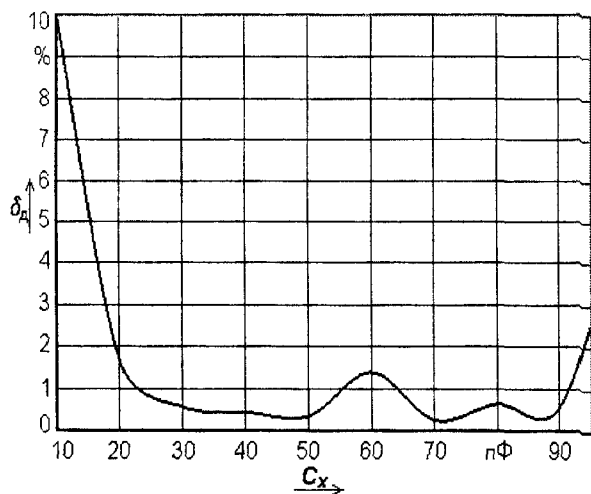


Рис. 2. Погрешность моста E7-4 при измерении меры электрической емкости

Полученные данные свидетельствуют, что, с одной стороны, инструментальная погрешность может оказаться существенно меньше нормируемой; с другой стороны, погрешность измерительной установки формируется в результате совокупного действия ряда дополнительных факторов, к которым следует отнести субъективную погрешность, влияние каче-

ства очистки рабочих поверхностей измерительной ячейки перед проведением измерений и др.

Целью исследований точности измерительной установки являлось получение статистических оценок погрешности измерения ϵ_r моторного масла и определение доверительного интервала.

Алгоритм анализа точности следующий:

- аналитическое описание результата измерения ϵ_r ;
- определение паразитной емкости измерительной цепи;
- выполнение многократных измерений и получение n отсчетов;
- обработка результатов многократных измерений с целью получения статистических оценок погрешности (среднеквадратического отклонения электрической емкости);
- получение интервальных оценок результата измерения ϵ_r моторного масла.

В соответствии с ГОСТ 6581-75 результат измерения ϵ_r при использовании двухэлектродной измерительной ячейки определяется по формуле:

$$\epsilon_r = \frac{C_0 - C_n}{C_1 - C_n}, \quad (2)$$

где C_0, C_1, C_n – соответственно, электрические емкости ячейки с воздухом, ячейки с маслом, паразитная емкость измерительной цепи.

$$C_n = \frac{(C_0 \cdot \epsilon_k - C_k)}{(\epsilon_k - 1)}, \quad (3)$$

где ϵ_k – относительная диэлектрическая проницаемость образцового материала;

C_k – электрическая емкость ячейки с образцовым материалом.

Анализ представленных выражений показывает, что использование методики обработки результата измерения ϵ_r в соответствии с ГОСТ 6581-75 позволяет в значительной мере устранить систематические аддитивную и мультипликативную инструментальные погрешности измерительной установки.

Емкость C_n определялась следующим образом. В качестве образцового вещества использован Н-гексан, для которого $\epsilon_k = 1,883$ (при 25 °С). Измерения для определения C_n проведены при температуре окружающей среды 24 °С. Результаты измерений: $C_0 = 34,4$ пФ, $C_k = 61$ пФ. Результат расчета паразитной емкости: $C_n = 4,2$ пФ. Далее полученное значение для данной конкретной измерительной установки принято за константу.

При выполнении многократных измерений отсчеты производились с точностью, соответствующей половине деления шкалы (цена деления – 0,1 пФ).

Таким образом, точность измерений в эксперименте была выше регламентированной ГОСТ 6581-75 практически на порядок. Измерения осуществлялись в следующей последовательности:

– очистка рабочих поверхностей измерительной ячейки;

– измерение электрической емкости измерительной ячейки с воздухом;

– заливка пробы масла в ячейку и измерение электрической емкости измерительной ячейки с маслом;

– измерение температуры.

В результате получена 21 пара значений (C_0 и C_1), обработанные отдельно с нахождением статистических оценок погрешности измерения.

Обработка результата измерения ϵ_r выполнялась по алгоритму обработки косвенных измерений, который предполагает вначале раздельную обработку серий прямых измерений. Таким образом, необходимые операции по установлению значений точечных оценок результатов измерения C_0 и C_1 , а также проверки законов распределения вероятности результатов в сериях уже были выполнены ранее.

Далее определена оценка среднего значения ϵ_r :

$$\bar{\epsilon}_r = f(\bar{C}_0, \bar{C}_1); \bar{\epsilon}_r = 2,297.$$

Определена аддитивная поправка:

$$\Theta = -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\partial^2 f}{\partial C_0^2} \cdot S_{C_0}^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial C_1^2} \cdot S_{C_1}^2 \right]; \Theta = -1,155 \cdot 10^{-5}.$$

Определена оценка стандартного отклонения ϵ_r :

$$S_{\epsilon} = \sqrt{\frac{(C_1 - C_p)^2 \cdot S_{C_0}^2}{(C_0 - C_p)^4} + \frac{S_{C_1}^2}{(C_0 - C_p)^4}}; S_{\epsilon} = 7,205 \cdot 10^{-3}.$$

Найден доверительный интервал для результата измерения ϵ_r моторного масла:

$$E_{\epsilon} = t \cdot S_{\epsilon}; E_{\epsilon} = 1,41 \cdot 10^{-2} \approx 1,4 \cdot 10^{-2},$$

где t – квантиль распределения Стьюдента.

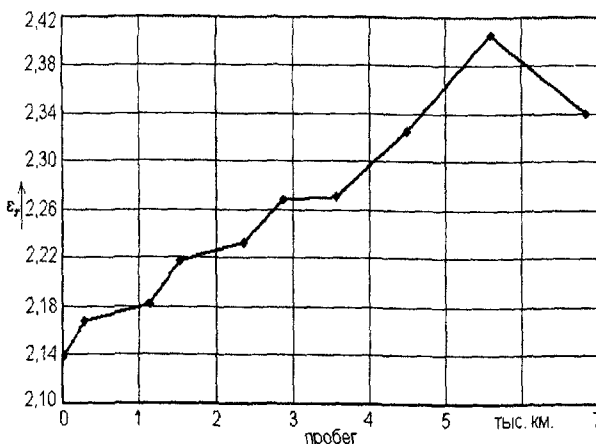


Рис. 3. Изменение ϵ_r моторного масла в зависимости от пробега автомобиля

Относительная погрешность измерения δ_{ϵ} , таким образом, не превышает значения:

$$\delta_{\epsilon} = \frac{E_{\epsilon}}{\bar{\epsilon}} \cdot 100 \% ; \delta_{\epsilon} \approx 0,65 \% .$$

Таким образом, можно сделать вывод, что результаты измерения ϵ_r моторного масла можно приводить с двумя значащими цифрами после запятой.

На рис. 3 показан график изменения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r моторного масла в процессе эксплуатации.

Анализ приведенной диаграммы показывает, что при пробеге автомобиля 5 – 6 тыс. км изменение диэлектрической проницаемости моторного масла может составлять более 10 % (в представленном на рис. 3 случае – 12%; уменьшение ϵ_r от 2,41 до 2,34 объясняется обновлением масла после 5592 км пробега).

Дополнительными характеристиками моторного масла, которые исследовались в эксперименте, являлись нормируемые параметры: вязкость, щелочное число и загрязненность.

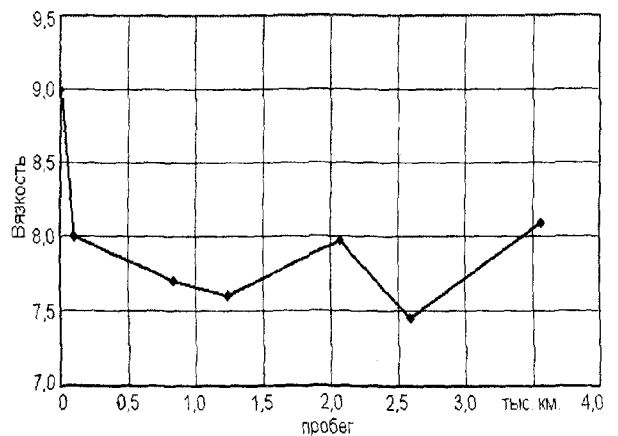


Рис. 4. Изменение вязкости масла в процессе эксплуатации автомобиля

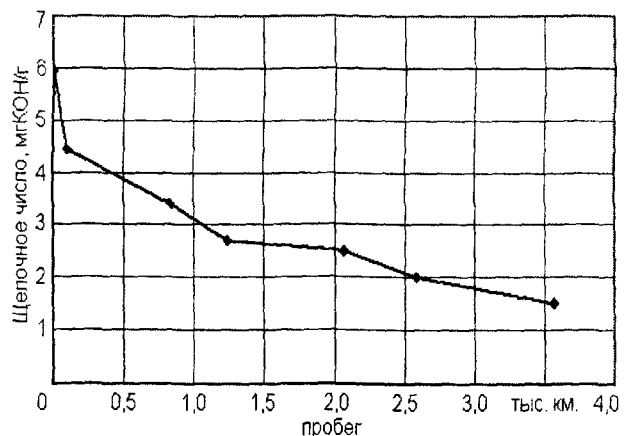


Рис. 5. Изменение щелочного числа масла в процессе эксплуатации автомобиля

Вязкость определялась на вискозиметре шариковом по ГОСТ 18241-78. Метод определения вязкости – экспрессный, без применения термостатирования вискозиметра. Для определения щелочного числа применялась лаборатория экспресс-анализа качества и состояния моторных масел и рабочих жидкостей гидросистем «ЛИА».

МА-7». Предел измерения щелочного числа от 0,5 до 12,0 мгКОН/г, погрешность измерения – 0,25 мгКОН/г. Для определения загрязненности моторного масла применялся метод, основанный на определении оптической плотности пробы масла. Оборудование: датчик загрязненности, кювета датчика, потенциометр.

Исследование указанных параметров показало, что вязкость масла в процессе эксплуатации может и уменьшаться, и увеличиваться. Загрязненность масла, оцениваемая по оптической плотности, увеличивается. Щелочное число монотонно уменьшается, и уже при пробеге 2,5 – 3 тыс. км происходит (для конкретного рассмотренного случая) отказ масла по данному нормируемому параметру. Дополнительные исследования [2] химического состава моторного масла подтверждают полученные результаты.

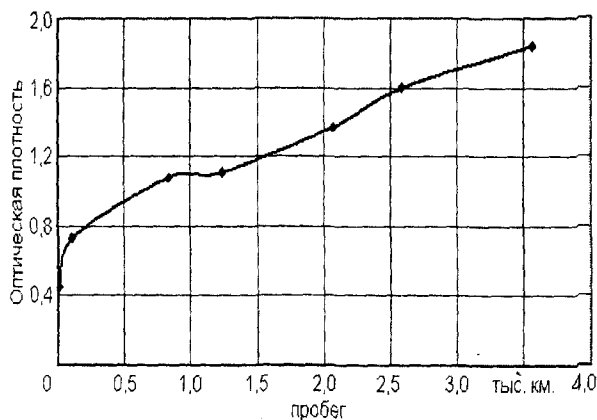


Рис. 6. Изменение оптической плотности масла в процессе эксплуатации автомобиля

Таким образом, до перехода моторного масла, как объекта диагностирования, в предельное состояние происходит изменение его ϵ_r более чем на 5%. В работе [2] представлено обоснование предельного значения относительной диэлектрической проницаемости моторного масла $\epsilon_r = 2,3$. Можно сделать вывод, что верхний предел диапазона измерения ϵ_r должен быть не менее 2,5. При этом достаточно обеспечить порог чувствительности средства измерения ϵ_r моторного масла не более 0,1.

Описание методики и средства диагностирования моторного масла по параметру ϵ_r

Опыт использования стандартизованной методики измерения относительной диэлектрической проницаемости моторного масла ϵ_r , изложенной в ГОСТ 6581-75, показал, что указанная методика имеет ряд особенностей, определяемых спецификой объекта испытания (жидких электроизоляционных материалов). Для применения рекомендаций ГОСТ 6581-75 в отношении моторных масел необходимой и целесообразной является значительная переработка отдельных положений.

Во-первых, в соответствии с известной методикой, необходимо обеспечить ряд требований к основному и вспомогательному оборудованию, вытекающих из функционального назначения трансформаторных масел (электрическая изоляция):

- в измерительной ячейке должна быть обеспечена достаточно высокая напряженность электрического поля;

- конструкции необходимых при исследованиях измерительных ячеек должны соответствовать требованиям, указанным в ГОСТ 6581-75;

- качество рабочих поверхностей измерительной ячейки должно быть высоким (зависит не только от технологии изготовления, но и от способа очистки ячейки после проведения эксперимента).

Во-вторых, недостатком известной методики является предполагаемое использование универсального измерительного оборудования. В этом случае процедуры измерения электрической емкости измерительной ячейки (пустой и заполненной), обработки результатов измерения, даже при использовании автоматизированных измерительных средств, требуют значительных затрат времени и связаны с возможностью внесения субъективных ошибок оператора.

С учетом представленного обоснования на основе метода измерения относительной диэлектрической проницаемости по ГОСТ 6581-75 разработана новая методика. Рассмотрим ее основные положения.

Методика распространяется на масла моторные, находящиеся при температуре диагностирования в жидком состоянии и устанавливает для этих материалов последовательность операций по определению возможности дальнейшей эксплуатации. Исследуемым диагностическим параметром является ϵ_r .

Метод отбора проб и подготовка к диагностированию отличаются тем, что объем пробы, необходимый для диагностирования моторных масел, ограничен: забор значительного объема масла приводит к снижению его уровня в картере автомобиля. Даны рекомендации по способам отбора проб, по использованию вспомогательного оборудования.

Раздел «Определение диэлектрической проницаемости» также отличается от базовой стандартизованной методики. В разделе даны рекомендации по использованию специализированного оборудования, использование которого обеспечивает требуемую точность измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r , а также значительно сокращает время проведения измерительной процедуры.

Еще одной особенностью методики является попытка внедрения стандартизованного представления результатов диагностирования моторного масла по значению его относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r . В качестве рекомендуемого представлено приложение к методике, являющееся, по сути, технологической картой диагностирования.

Рекомендуемая форма представления результатов содержит следующую информацию:

- характеристики объекта;
- тип моторного масла;
- пробег автомобиля с момента обновления моторного масла, км;
- наличие фактов обновления масла в процессе эксплуатации (пробег на момент долива масла, объем моторного масла);
- условия диагностирования и измерительная информация;
- тип измерительной ячейки;
- температура в помещении при диагностировании моторного масла, °С;
- электрическая емкость пустой измерительной ячейки (ячейки с воздухом) C_0 , пФ;
- электрическая емкость ячейки с маслом C_1 , пФ;
- значение паразитной электрической емкости измерительной цепи C_p , пФ;

- значение диэлектрической проницаемости ϵ_r ;
- выводы по результатам диагностирования;
- дата диагностирования.

Применение разработанной методики и предложенного оборудования представляется эффективным в следующих областях:

- сервисное обслуживание автомобильной техники (диагностирование моторного масла в процессе эксплуатации автомобиля);
- научные исследования и испытания моторных масел и присадок;
- прогнозирование остаточного ресурса масла;
- реализация диэлькометрического метода контроля и диагностирования прочих веществ (в сферах, где не распространяется действие государственного метрологического контроля);
- использование в качестве учебного лабораторного оборудования.

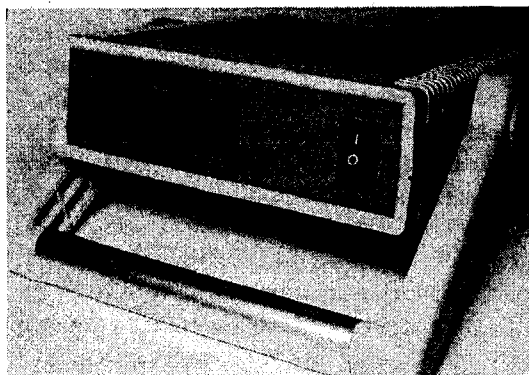


Рис.7. Внешний вид прибора

Описание средства диагностирования

Полученные результаты исследований положены в основу принципа действия предлагаемого для целей диагностики прибора, внешний вид которого показан на рис. 7.

Прибор ориентирован на работу с измерительными ячейками по ГОСТ 6581-75, а также соответствует разработанным методическим рекомендациям. Для получения результата измерения осуществляются три измерительных процедуры: измерение паразитной емкости линий связи, измерение электрической емкости пустой ячейки, измерение емкости ячейки с маслом. После трех измерений прибор автоматически индицирует значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r .

Требуемый объем пробы масла зависит от типа измерительной ячейки (от 10 до 50 мл). Основное время, требуемое для диагностирования масла, занимает отбор пробы и очистка рабочих поверхностей измерительной ячейки.

Программное обеспечение прибора предусматривает периодическую коррекцию температурной погрешности, калибровку измерительной цепи, кон-

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

– диапазон измерения электрической емкости C_x , пФ	1 ... 500
– погрешность измерения емкости, пФ, не более	(1+0,01C _x)
– паразитная емкость измерительной цепи	компенсируется
– время измерения, с, не более	3
– индикация результатов измерения	цифровая
– питание	220 В, 50 Гц;
– габаритные размеры (корпуса прибора), мм, не более	156x180x44;
– масса, кг, не более	2
– температурная компенсация	есть
– определение диэлектрической проницаемости	автоматическое

троль правильности последовательности измерения параметров. Уровень разработки – экспериментальный образец, до конца 2005 года намечен выпуск опытной партии приборов.

Литература:

- 1 Сычев С.Н. Теоретическое обоснование контроля моторных масел электрическим методом (по значению диэлектрической проницаемости) / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 12.
- 2 Волчков А.Н. Экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости моторных масел в процессе их эксплуатации / А.Н. Волчков, Е.В. Пахолкин, С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина // Известия ОрелГТУ. Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел, 2005. – № 1. – С 43-46.
- 3 Пахолкин Е.В. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований моторных масел в процессе эксплуатации / Е.В. Пахолкин, С.Н. Сычев, Н.С. Севрюгина // Сб. тр. междунар. научн.-техн. конф. «Приборостроение-2005» – Винница, Ялта, 2005. – С. 177-181.

ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

УДК 621.316.722.1:621.314.1

Годовников Е.А., канд. техн. наук Шолоник А.П.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: sholonik@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ КСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

The specific features of designing the regulators used for the investigation of the dynamics of pulse energy conversion systems are observed in the article. The variant of regulator's design for carrying out the experimental research of DC/DC converters is given. The specific feature of the regulator is the set of independent modules, which connected in the way needed for the realization of the demanded modulation algorithm and voltage regulation.

Введение

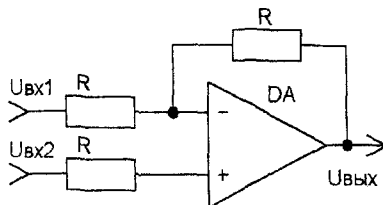
Широкое распространение в настоящее время находят импульсные системы преобразования энергии (импульсные источники электропитания, электроприводы постоянного и переменного тока). Общеизвестным является тот факт, что указанные устройства могут реализовывать нелинейные динамические режимы, являющиеся нежелательными. [1, 2]. Исключение таких режимов требует исследования динамики импульсных преобразователей, в том числе с использованием экспериментальных установок.

Авторами разработан импульсный регулятор, предназначенный для исследования динамики преобразователей постоянного напряжения. Отличительная особенность регулятора – универсальность, заключающаяся в возможности реализовывать различные структурные схемы регуляторов, алгоритмы модуляции и законы регулирования.

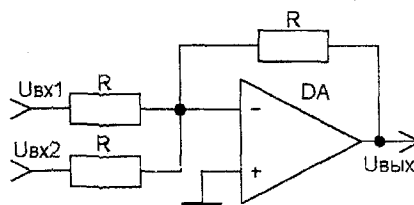
Описание регулятора

Структурная схема регулятора показана на рис. 1.

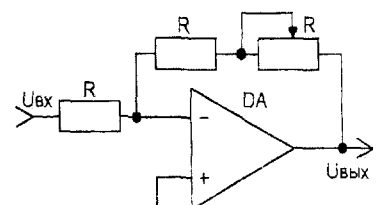
Регулятор содержит следующие блоки: два усилителя, два дифференциальных усилителя, суммирующий усилитель, два корректирующих устройства, генератор пилообразного напряжения, компаратор, триггер. Блоки независимы друг от друга, могут включаться в любой последовательности, или не использоваться совсем.



Дифференциальный усилитель



Суммирующий усилитель



Усилитель

Рис. 2. Усилители

Определяющие параметры блоков (коэффициент усиления усилителей, амплитуда пилообразного напряжения генератора, постоянные времени корректирующих устройств и др.) могут быть изменены пользователем при проведении исследований.

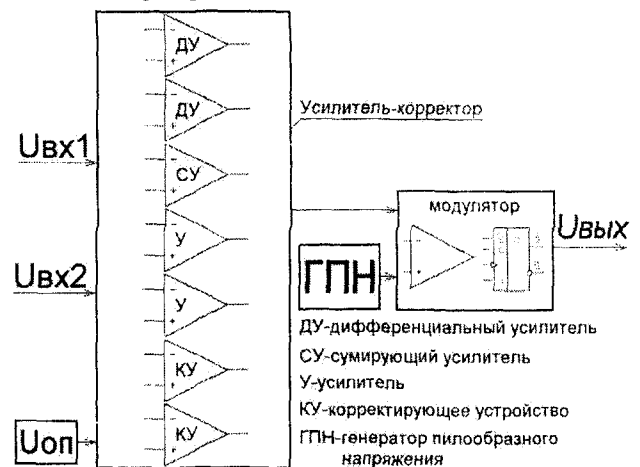


Рис. 1. Структурная схема регулятора

Рассмотрим схематическое решение отдельных функциональных блоков регулятора.

Дифференциальные усилители, суммирующий усилитель, усилители (рис. 2) построены по классической схеме на основе быстродействующих операционных усилителей (ОУ).

Усилитель может изменять свой коэффициент усиления K от 0,5 до 23 за счет изменения сопротивления в цепи обратной связи.

Дифференциальные и суммирующие усилители имеют коэффициент усиления, равный единице, поэтому напряжение на выходе равно разности и сумме напряжений на входе соответственно.

Корректирующие устройства (рис. 3) представляют собой ОУ, снабженные набором обратных связей с известными параметрами. Корректирующие устройства позволяют реализовывать П, ПИ и ПИД законы регулирования. Сопрягающие частоты могут принимать значения: для ПИ-звена 0,2-2,5 кГц; для ПИД-звена 0,2-2,5 кГц; 0,7-160 кГц; 0,8-165 кГц.

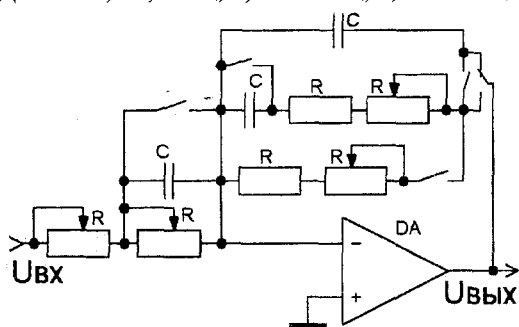


Рис. 3. Корректирующее устройство

Генератор пилообразного напряжения (ГПН) (рис. 4), выполнен на быстродействующих ОУ и полевых транзисторах (ПТ). Частота следования импульсов 0,01-120кГц. Применение ПТ с малым сопротивлением канала в открытом состоянии позволило уменьшить длительность отрицательного фронта пилообразных импульсов до 100 нс. Высокая линейность пилообразного напряжения обеспечивается стабилизатором тока, выполненным на ПТ.

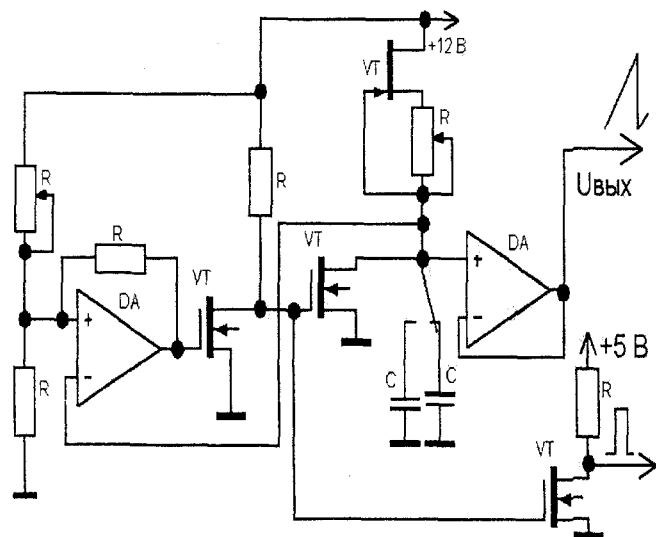


Рис. 4. Генератор пилообразного напряжения

Модулятор (рис. 5) представляет собой компаратор и D-триггер. Модулятор выполнен на компараторе с открытым коллектором, что позволило привести его выходной сигнал к ТТЛ уровням. Триггер предотвращает

многократные изменения уровня и выходного сигнала модулятора на одном периоде модуляции.

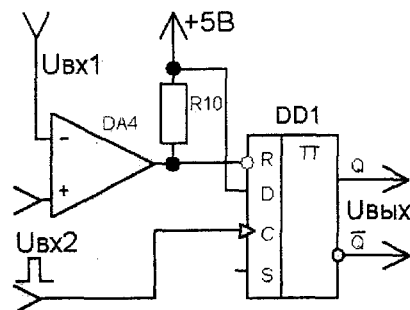


Рис. 5. Модулятор

Пример использования регулятора

Рассмотрим пример использования предлагаемого регулятора для построения ППН с ШИМ-2 и ПИД – законом регулирования [3]. Вариант коррекции для ППН иллюстрирует ЛАЧХ, представленная на рис. 6. Реализация коррекции приведена на рис. 7.

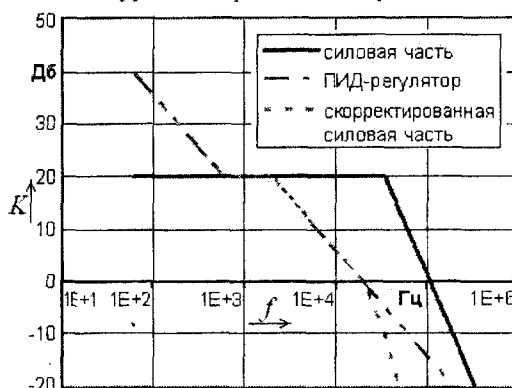


Рис. 6. ЛАЧХ регулятора

Основные параметры блоков:

- коэффициент усиления усилителя – единица, $R3 = 2,3 \text{ кОм}$;
- сопрягающие частоты корректирующего устройства - 600 Гц (нуль) и 2 кГц (полюс), при этом $R7=1 \text{ кОм}$, $R8 = 22 \text{ кОм}$; частота пилообразных импульсов 10 кГц.

Используя приведенные параметры регулятора в качестве «начального приближения», варьируя сопротивление резисторов $R3, R7, R8, R10, R14$ можно провести исследование ППН, заключающееся, например, в выявлении влияния на его динамику таких параметров регулятора, как частота модуляции и сопрягающие частоты корректирующего устройства.

Заключение

Несмотря на то, что представленный в работе регулятор ориентирован в первую очередь на исследование динамики преобразователей напряжения, блочная организация и гибкость построения связей между блоками позволяют использовать его также при исследовании других импульсных преобразователей энергии, таких, как сетевые источники питания и электроприводы постоянного тока.

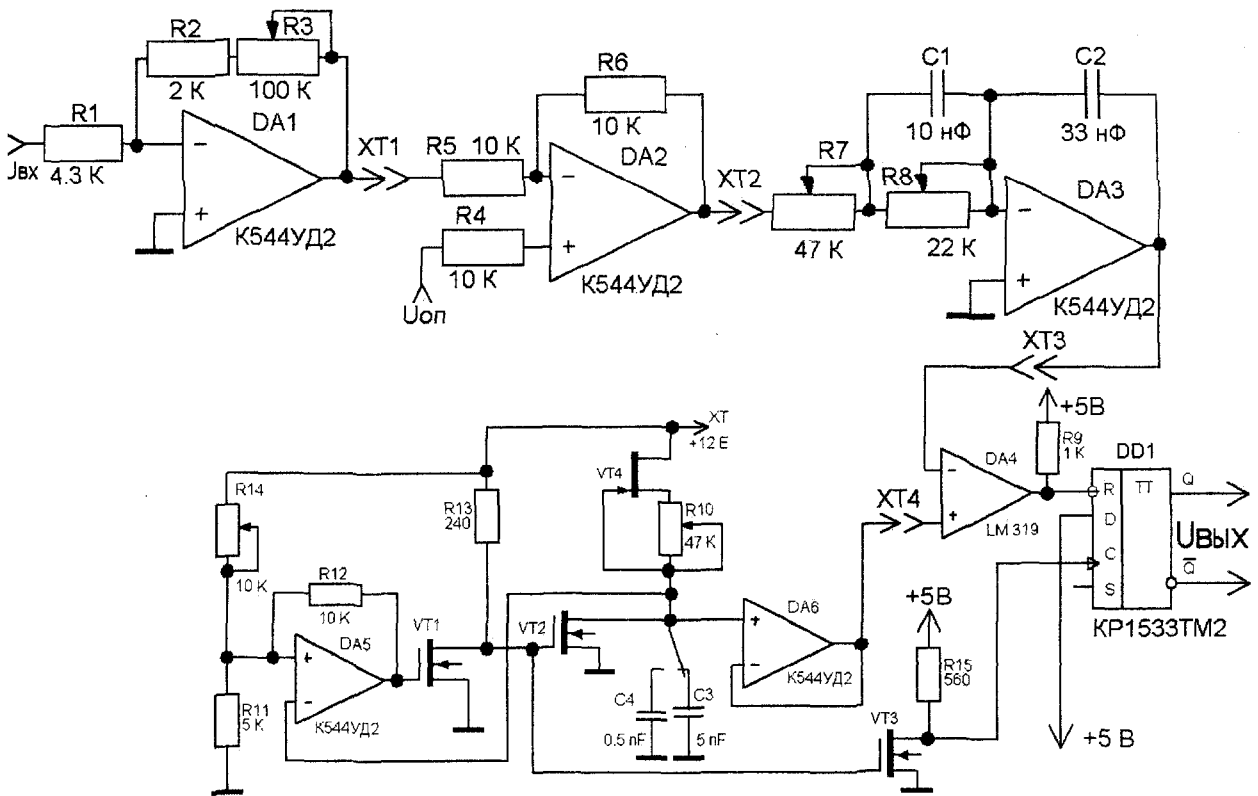


Рис. 7. Принципиальная схема регулятора

Литература:

1 Белов Г.А. Исследование колебаний в импульсном стабилизаторе напряжения вблизи границ устойчивости. – *Электричество*, 1990. – № 9.
 2 Баушев В.С. Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах/ В.С. Баушев, О.А. Алейников, А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко. – *Электричество*, 1991. – № 4.

3 Колоколов Ю.В. Динамика импульсного понижающего преобразователя напряжения в режиме прерывистых токов / Ю.В. Колоколов, С.Л. Косчинский, А.П. Шолоник. – *Электричество*, 2003. – № 9.
 4 Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
 5 Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

УДК 681.511.4

Канд. техн. наук Косчинский С.Л., асп. Ретинский С.Н.
 (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: kipra@ostu.ru

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Method of synthesis of PI-type fuzzy logic control of boost DC–DC converter is represent in this paper.

Импульсные преобразователи постоянного напряжения широко используются в различных практических приложениях. Огромное количество данных систем массово реализуется в интегральном ис-

полнении ведущими мировыми производителями. По существу, импульсные преобразователи относятся к классу нелинейных динамических систем с переменной структурой. Известно значительное количество

работ, посвященных исследованию различных аспектов импульсных преобразователей [1-4]. В работах [3, 4] установлено, что динамика импульсных преобразовательных систем в условиях изменения их параметров характеризуется высокой степенью сложности. В этой связи значительный интерес наблюдается к проблеме построения «интеллектуальных» регуляторов и, в частности, регуляторов на основе нечеткой логики для систем рассматриваемого класса [3, 4]. Применение регуляторов на основе нечеткой логики позволяет придать адаптивные свойства импульсному преобразователю, наилучшим образом соответствующие требованиям, предъявляемым к данным системам в условиях изменения их параметров. Целью данной работы является исследование динамики импульсных преобразовательных систем постоянного напряжения с нечеткими регуляторами на адекватных динамических моделях и формализация процедуры синтеза нечетких регуляторов для рассматриваемых систем. В качестве примера в работе рассматривается импульсный повышающий преобразователь постоянного напряжения.

Схема замещения импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения представлена на рис. 1.

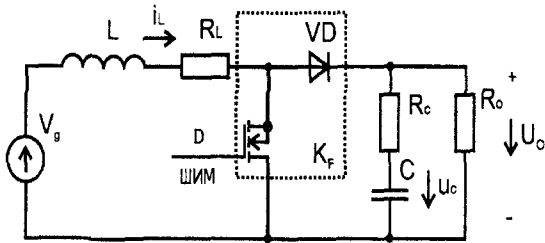


Рис. 1. Схема замещения импульсного повышающего преобразователя

Математическая модель для режима непрерывного тока дросселя L (рис. 1) преобразователя представляется в виде разрывной динамической системы с внешним периодическим воздействием [4]:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(K_F)X(t) + B, \quad (1)$$

$$A(K_F) = \begin{vmatrix} \frac{R_L}{L} & \frac{R_o \cdot R_c \cdot K_F}{(R_o + R_c) \cdot L} & -\frac{R_o \cdot K_F}{(R_o + R_c) \cdot L} \\ \frac{R_o \cdot K_F}{(R_o + R_c) \cdot C} & & -\frac{1}{(R_o + R_c) \cdot C} \end{vmatrix};$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix},$$

где K_F – импульсная функция, характеризующая состояние ключевого элемента на k -том периоде регулирования, определяемая по алгоритму:

$$K_F = \begin{cases} 1, & (k-1)T_S \leq t < t_k \\ 0, & t_k \leq t < kT_S \end{cases} \quad (2)$$

Здесь T_S – период; t_k – момент смены состояния ключевого элемента (момент коммутации) на k -том периоде регулирования, который определяется как наименьший корень уравнения коммутации:

$$\xi(t, X(t)) = U_{\text{ПИ}} - U_1 \cdot \left[\frac{t}{T_S} - E_1 \left(\frac{t}{T_S} \right) \right], \quad (3)$$

где U_1 – амплитуда пилообразного напряжения; E_1 – целая часть числа; $U_{\text{ПИ}}$ – напряжение на выходе ПИ-регулятора, определяемое на основании математической модели ПИ-регулятора (рис. 2):

$$\begin{cases} U_{\text{ПИ}} = G_{\text{СМ}} \cdot \varepsilon + U_{\text{И}} \\ \frac{dU_{\text{И}}}{dt} = G_{\text{СМ}} \cdot \omega_Z \cdot \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

где $G_{\text{СМ}} = R_2 / R_1$;

$\omega_Z = 1 / (R_2 \cdot C_1)$;

ε – ошибка регулирования, равная:

$$\varepsilon = V_{\text{ref}} - \beta \cdot \frac{R_o}{R_o - R_c} \cdot u_c, \quad (5)$$

где V_{ref} – уставка системы управления;

β – коэффициент передачи обратной связи.

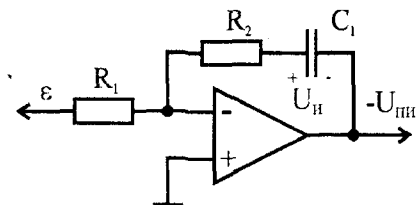


Рис. 2. Схема замещения ПИ-регулятора

Общая форма решения задачи Коши системы (1) для начальных условий $X_{k-1}(t)$ на интервале $(k-1)T_S \leq t < kT_S$ может быть представлен в виде отображения сдвига:

$$X_k = C_k(D_K) \cdot X_{k-1} + V_k(D_k); \quad (6)$$

$$C_k = C^{(0)} \cdot C^{(1)}, \quad V_k = C^{(0)} \cdot V^{(1)} + V^{(0)},$$

где $D_k = t_k / T_S - (k-1)$ – относительная длительность сигнала $K_F = 1$ на k -ом периоде ШИМ ($0 \leq D_k \leq 0,9$).

При моделировании использовались следующие численные значения параметров модели (1-6) преобразователя:

- диапазон входного напряжения $V_g = 20 \dots 60$ В;
- диапазон сопротивления нагрузки $R_o = 100 \dots 1000$ Ом;
- $R_L = 0,74$ Ом; $R_c = 0,18$ Ом;
- $L = 2,12$ мГн;
- $C = 100$ мкФ;
- $T_S = 4 \cdot 10^{-5}$ с.

Обобщенная схема нечеткого регулятора приведена на рис. 3. Она состоит из четырех элементов [2, 3]:

- блок фаззификации, который преобразует входную физическую величину ε в соответствующую лингвистическую переменную $\mu(\varepsilon)$;
- база знаний, содержащая таблицу правил для блока логического вывода;
- блок логического вывода, который преобразует входную лингвистическую переменную в выходную;
- блок дефаззификации, выполняющий преобразование выходной лингвистической переменной в физическое управляющее воздействие D .

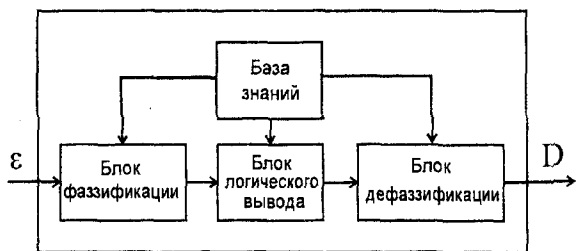


Рис. 3. Обобщенная схема нечеткого регулятора

Структурная схема нечеткого ПИ-регулятора для системы рис. 1 приведена на рис. 4 ($V_{ref} = 3; \beta = 0,04$). В качестве входной информации в анализируемом нечетком ПИ-регуляторе используется нормированная к единице ошибка регулирования ε .

Рассматриваемый нечеткий ПИ-регулятор реализован на основе двухканальной структуры, в которой пропорциональная и интегральная части выделены в отдельные блоки. При этом выходная величина (относительная длительность проводящего состояния ключа) представляет собой сумму пропорциональной d_p и интегральной d_i компонент (рис. 4).

Диапазон значений нормированных входных переменных для каждого звена регулятора разделен на пять термов (рис. 5): отрицательный большой (NB), отрицательный маленький (NS), нулевой (ZE), положительный маленький (PS), положительный большой (PB).

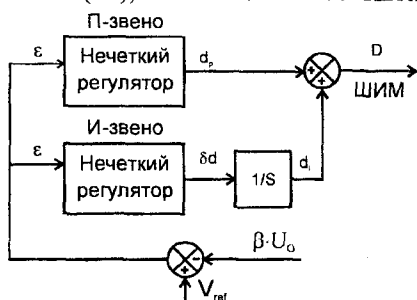


Рис. 4. Структурная схема нечеткого ПИ-регулятора

Логический вывод для нечеткого ПИ-регулятора производится на основе таблицы правил (таблица 1) для входной величины ε^* и таблицы 2 для выходных величин P, I согласно логическому выражению:

$$\text{если } \varepsilon^* \text{ есть } E_i, \text{ то } d_p \text{ есть } P_j, \delta d \text{ есть } I_j, \quad (7)$$

где ε^* – нормированная ошибка регулирования;
 E, P, I – термы нечетких переменных.

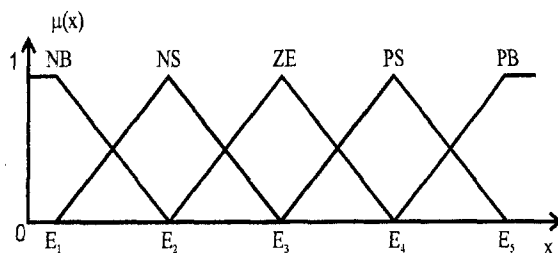


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистических переменных

Таблица 1 – Правила для входной величины ε^*

	ε^*				
	NB	NS	ZE	PS	PB
E_i	-1	-0,5	0	0,5	1

Таблица 2 – Правила для выходных величин P, I

	ε^*				
	NB	NS	ZE	PS	PB
P_i	-1	-0,5	0	0,5	1
I_j	-1	-0,5	0	0,5	1

Выходные сигналы ПИ-регулятора определяются по следующим формулам:

$$d_p = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(\varepsilon^*) \cdot P_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j(\varepsilon^*)}. \quad (8)$$

$$\delta d = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(\varepsilon^*) \cdot I_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j(\varepsilon^*)}. \quad (9)$$

Синтез нечеткого ПИ-регулятора проводился на основе модели аналогового прототипа, параметры которого были получены путем малосигнального моделирования [4]. АФЧХ объекта управления (1), ПИ-регулятора (2) и разомкнутой системы управления (3) для параметров $G_{CM} = 0,01; \omega_z = 2300 \text{ рад/с}; R_O = 350 \text{ Ом}; V_g = 45 \text{ В}$ приведены на рис. 6 и 7. При этом для всего рассматриваемого диапазона изменения R_O и V_g гарантируется апериодический переходный процесс (с точки зрения малосигнального моделирования).

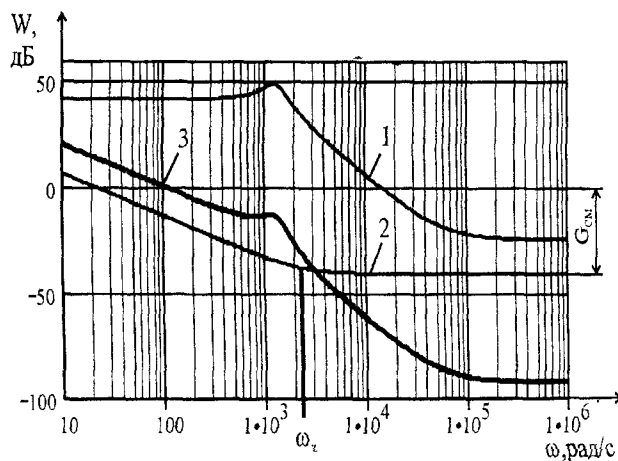


Рис. 6. АЧХ преобразователя

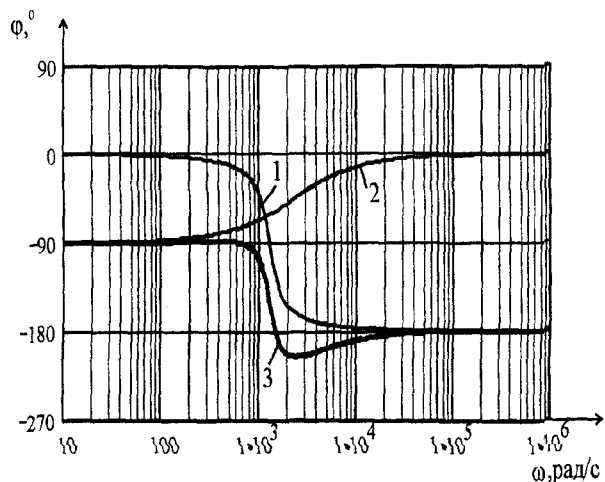


Рис. 7. ФЧХ преобразователя

Эквивалентная линеаризованная передаточная функция нечеткого ПИ-регулятора имеет вид:

$$\begin{aligned}
 D_k(\varepsilon_k) &= d_{Pk}(\varepsilon_k) + d_{Ik}(\varepsilon_k); \\
 d_{Pk}(\varepsilon_k) &= kE_P \cdot \varepsilon_k \cdot K_1 \cdot K_{OP}; \\
 d_{I(k+1)} &= d_{Ik} + T_S \cdot \delta d_{Ik}; \\
 \delta d_{Ik}(\varepsilon_k) &= kE_I \cdot \varepsilon_k \cdot K_2 \cdot K_{OI},
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где kE_P, kE_I – соответственно, весовые коэффициенты для П- и И-звеньев, нормирующие входную величину – ошибку регулирования ε к единице; K_{OP}, K_{OI} – выходные весовые коэффициенты; $K_1 = \partial(\hat{d}_P) / \partial \varepsilon, K_2 = \partial(\hat{d}_I) / \partial \varepsilon$ – коэффициенты передачи для П- и И-звена.

Переход от математической модели аналогового ПИ-регулятора к параметрам нечеткого регулятора осуществляется на основании зависимостей:

$$\frac{d_P}{\varepsilon} = G_{CM}; \quad \frac{\delta d}{\varepsilon} = G_{CM} \cdot \omega_Z.
 \tag{11}$$

На основе АФЧХ аналогового прототипа ($G_{CM} = 0,01; \omega_Z = 2300$ рад/с) были получены базовые масштабные коэффициенты для нечеткого ПИ-регулятора: $kE_P = kE_I = 0,33; K_{OP} = 0,03; K_{OI} = 70$. При этом входные масштабные коэффициенты выбирались, исходя из эвристических соображений об обеспечении необходимого диапазона регулирования для управляющей величины $V_{ref} = 3$ В.

При моделировании импульсного повышающего преобразователя постоянного тока с аналоговым ПИ-регулятором и нечетким ПИ-регулятором с базовыми параметрами были получены данные о величине перерегулирования (рис. 8) и длительности переходного процесса (рис. 9) при нулевых начальных условиях и сопротивлении нагрузки $R_o = 300$ Ом.

На данных рисунках цифрой 1 обозначены результаты для аналогового прототипа, а цифрой 2 – для нечеткого ПИ-регулятора с базовыми параметрами.

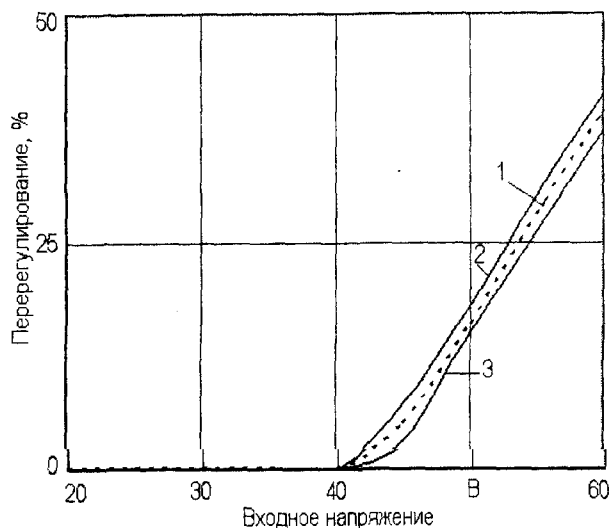


Рис. 8. Величина перерегулирования

На основании полученных результатов было установлено, что нечеткий ПИ-регулятор с базовыми параметрами имеет динамические свойства, аналогичные прототипу. В тоже время их улучшение путем увеличения полосы пропускания разомкнутой системы управления невозможно, так как установлено, что для частоты среза $\omega_z = 4600$ рад/с ($K_{OI} = 140$) и $\omega_z = 6900$ рад/с ($K_{OI} = 210$) (соответственно, линии 4 и 5 на рис. 10) в пространстве варьирования параметров напряжения питания и сопротивления нагрузки появляется область неустойчивости синхронного режима.

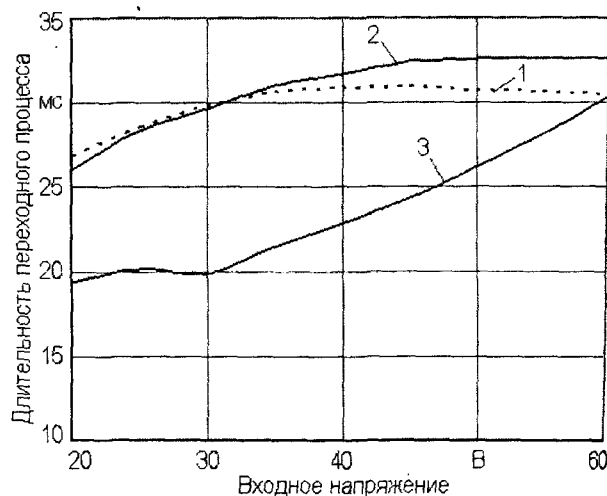


Рис. 9. Длительность переходного процесса

На основании полученных результатов было принято решение о модификации передаточной характеристики нечеткого ПИ-регулятора с целью придания ему адаптивных свойств. В результате изменения центров функций принадлежности (рис. 4) вместо линейной была получена кубическая характеристика для П- и И-звена регулятора (таблица 3). Также для улучшения динамических свойств преобразовательной системы в нечетком ПИ-регуляторе была введена вторая входная переменная – скорость изменения

ошибки регулирования $\Delta \varepsilon = \varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}$ [3]. Учет скорости изменения ошибки регулирования позволяет косвенно ввести в регулятор дифференциальную компоненту, в результате чего рассматриваемый ПИ-регулятор приобретает свойства ПИД-регулятора.

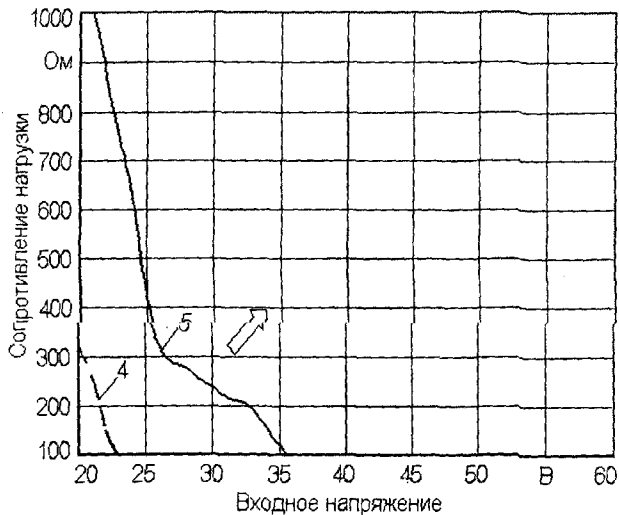


Рис.10. Область устойчивости синхронного режима (стрелкой обозначена область устойчивости)

Таблица 3 – Значения параметров кубической характеристики для П- и И-звена регулятора

	$\varepsilon, \Delta \varepsilon$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
$C_{\varepsilon j}$	-1	-0,125	0	0,125	1
$C_{\Delta \varepsilon j}$	-0,01	-0,005	0	0,005	0,01

Полученная в результате модификации таблица правил для нечеткого ПИ-регулятора приведена в таблицах 4 и 5 для П- и И-звена соответственно.

Таблица 4 – Модифицированные правила для П-звена нечеткого ПИ-регулятора

		ε				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\Delta \varepsilon$	NB	-1	-1	-0,025	0	0,025
	NS	-1	-0,025	0	0,025	1
	ZE	-1	-0,025	0	0,025	1
	PS	-1	-0,025	0	0,025	1
	PB	-0,025	0	0,025	1	1

Таблица 5 – Модифицированные правила для И-звена нечеткого ПИ-регулятора

		ε				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\Delta \varepsilon$	NB	-1	-1	-0,05	0	0,05
	NS	-1	-0,05	0	0,05	1
	ZE	-1	-0,05	0	0,05	1
	PS	-1	-0,05	0	0,05	1
	PB	-0,05	0	0,05	0,05	1

При этом для обеспечения базового наклона передаточной характеристики регулятора в области нулевых значений ошибки регулирования были изменены масштабные коэффициенты выходных сигналов ПИ-регулятора: $K_{OP} = 0,15$; $K_{OI} = 175$.

В результате вычислительного эксперимента получены данные о величине перерегулирования (линия 3 на рис. 8) и длительности переходного процесса (линия 3 на рис. 9) для адаптивного ПИ-регулятора.

На основании полученных данных было установлено, что переходный процесс для импульсного повышающего преобразователя с адаптивным нечетким ПИ-регулятором имеет лучшие показатели по сравнению с аналоговым прототипом, как по длительности переходного процесса, так и по величине перерегулирования. При этом наилучшие результаты достигаются в области низкого напряжения питания. В тоже время преобразовательная система с адаптивным ПИ-регулятором сохраняет устойчивость синхронного режима во всем диапазоне варьирования напряжения питания и сопротивления нагрузки.

Предложенная в статье процедура синтеза нечеткого регулятора по аналоговому прототипу основана на использовании результатов малосигнального моделирования при расчете базовых параметров нечеткого регулятора. При этом улучшение динамических характеристик преобразовательной системы основано на использовании адаптивных свойств нечеткого регулятора (использование кубической передаточной характеристики) и использовании второго входного сигнала – скорости изменения ошибки регулирования. На основании результатов исследования динамики преобразовательной системы было установлено, что синтезированный нечеткий ПИ-регулятор обеспечивает лучшие показатели качества переходного процесса по сравнению с аналоговым прототипом при сохранении устойчивости синхронного режима во всем диапазоне изменения входного напряжения и сопротивления нагрузки.

Литература:

1 Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания: Пер. с англ. / Под ред. Л. Е. Смольникова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
 2 Интеллектуальные системы автоматического управления / Под. ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
 3 So W.-C., Tse C. K. Development of a Fuzzy Logic Controller for DC/DC Converters: Design, Computer Simulation, and Experimental Evaluation. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, January, 1996.
 4 Kolokolov Yu. V., Koschinsky S.L., Hamzaoui A. Comparative Study of the Dynamics and Overall Performance of Boost Converter with Conventional and Fuzzy Control in Application to PFC. Proceedings from IEEE «Power Electronics Specialist Conference (PESC'04)». – June 20-25, 2004. – Aachen, Germany. – PP. 2165-2171.

УДК 681.58: 697.3

Канд. техн. наук, доц. Петров С.П.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

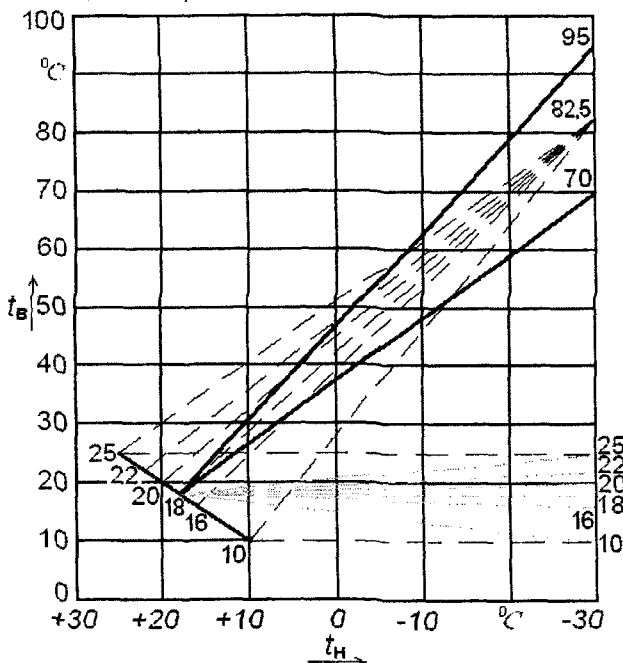
ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА АБОНЕНТСКОМ ВВОДЕ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРУГИХ АБОНЕНТСКИХ СИСТЕМ И ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

In article dependence of parameters of the heat-carrier on user's input cogeneration systems of the centralized heat supply from static characteristics of other user's systems and a thermal network is analyzed.

Центральное регулирование расхода тепловой энергии в когенерационных системах централизованного теплоснабжения решает задачу стабилизации температурного режима в зданиях с определенной расчетной температурой внутреннего воздуха.

В тех же зданиях, которые имеют иную расчетную температуру воздуха, будут иметь место нарушения температурного режима [1, 2].

Это положение наглядно иллюстрируется рис. 1, из которого видно, что системы с внутренней расчетной температурой t_b , не равной 18 °С, имеют требуемую температуру теплоносителя только в одной точке при $t_n = t_{np} = 30$ °С.



----- требуемая средняя температура теплоносителя
———— температурный график при $t_b = +18$ °С
..... температура воздуха в помещениях

Рис. 1. Температурные графики для помещений с различной расчетной внутренней температурой воздуха

Максимальное расхождение температур теплоносителя получается, естественно, в начале и в конце отопительного сезона, т. е. при $t_n = +10$ °С.

В этот же период достигает максимума отклонение температуры воздуха в помещении от расчетной величины. Так, например, в помещении с расчетной внутренней температурой $t_b = 22$ °С отклонение температуры при $t_n = +10$ °С составляет: $22 - 18,7 = 3,3$ °С.

Обеспечение требуемых условий температурного режима помещений в указанных зданиях может быть обеспечено путем изменения (по мере повышения наружной температуры) коэффициента смещения на вводе в здание с одновременным изменением расхода теплоносителя из сети.

Значение требуемого коэффициента смещения может быть определено из уравнения [1] *:

$$u_{тр} = \frac{1}{\Delta t_p} \left[\frac{T_1 - t_b}{\varphi} - (t_{1p} - t_b) \right], \quad (1)$$

где $T_1 = T_{1тр} \pm \Delta t$ – температура теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети;

φ – коэффициент отпуска тепловой энергии, соответствующий данной наружной температуре t_n и расчетной температуре воздуха в здании;

t_{1p}, t_b – расчетная температура теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети;

t_b – температура внутреннего воздуха.

* Уравнение (1) не учитывает изменения коэффициента теплопередачи отопительных приборов в зависимости от температурного напора.

Требуемое изменение расхода теплоносителя из сети определяется из уравнения:

$$\alpha_m = \frac{1 + u}{1 + u_{тр}}. \quad (2)$$

Результаты расчетов по приведенным формулам даны в таблице 1. Расчетные коэффициенты смешения приняты 1,4 и 2,2. Расчетная наружная температура $t_{np} = -30$ °С [2].

Таблица 1 – Значения коэффициентов смешения и расходов теплоносителя в абонентских вводах зданий с различными расчетными внутренними температурами при $t_n = +10^\circ\text{C}$

Расчетная внутренняя температура, $^\circ\text{C}$	+16	+18	+20	+22
Коэффициент смешения, $u_{\text{тр}}$	3,2	1,4	0,35	0
Коэффициент расхода сетевой воды, α_m	0,57	1,0	1,78	~
Коэффициент смешения, $u_{\text{тр}}$	4,2	2,2	1,0	0,2
Коэффициент расхода сетевой воды, α_m	0,62	1,0	1,6	2,67

Из таблицы 1 видно, что в абонентских вводах зданий с расчетными внутренними температурами воздуха, отличающимися от расчетной температуры, для которой построен отопительный график, требуется производить автоматическое регулирование.

Для обеспечения стабилизации температурного режима в здании диапазон регулирования должен быть весьма широким [2]. Так, например, в здании с $t_b = 20^\circ\text{C}$ необходимо в переходный период отопительного сезона (при $t_n = 10^\circ\text{C}$) уменьшить коэффициент смешения от 1,4 до 0,35, либо от 2,2 до 1,0, и увеличить расход сетевой воды соответственно на 78% и на 60%. В здании с $t_b = 22^\circ\text{C}$ при расчетном коэффициенте смешения $u_{\text{тр}} = 1,4$ в переходный период невозможно обеспечить заданное значение внутренней температуры регулированием на вводе.

Предельное значение расчетной внутренней температуры, которое может быть стабилизировано путем регулирования коэффициента смешения, определяется по формуле [1]:

$$t_{b, \text{пр}} = \frac{t_{1\text{р}} t_n - T_1 t_{\text{тр}}}{t_{1\text{р}} + t_n - T_1 - t_{\text{тр}}} \quad (3)$$

Результаты расчетов предельных значений расчетной внутренней температуры $t_{b, \text{пр}}$ по формуле (3) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Предельные значения $t_{b, \text{пр}}$

Коэффициент смешения, $u_{\text{тр}}$	0	1,4	2,2
Расчетная наружная температура, $^\circ\text{C}$	-40	18	20,3
	-30	18	20,8
	-20	18	21,6
	-10	18	22,8

В тех случаях, когда расчетная температура воздуха в здании превышает величины, указанные в таблице 2, стабилизация температурного режима путем регулирования коэффициента смешения невозможна.

Вторым фактором, обуславливающим необходимость автоматического регулирования, является несоответствие установленной поверхности нагрева отопительных приборов в здании требуемому значению.

Необходимые температуры теплоносителя в системе отопления определяются из уравнений:

$$t_{1\text{тр}} = t_b + \delta t_p \left(\frac{\varphi}{f} \right)^{1+n} + \frac{0,5}{f} t_p \left(\frac{\varphi}{f} \right), \quad (4)$$

$$t_{2\text{тр}} = t_{1\text{тр}} - \Delta t_p \left(\frac{1}{f} \right). \quad (5)$$

Требуемый коэффициент смешения:

$$u_{\text{тр}} = \frac{T_1 - t_{1\text{тр}}}{t_{\text{тр}} - t_{2\text{тр}}}. \quad (6)$$

Необходимый расход теплоносителя в системе отопления:

$$\alpha_{\text{снст}} = \frac{G_{\text{тр}}}{G_p} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_{\text{тр}}} = \bar{f}. \quad (7)$$

Необходимый расход теплоносителя из сети:

$$\alpha_m = \bar{f} = \frac{1 + u_p}{1 + u_{\text{тр}}}. \quad (8)$$

Результаты расчетов по приведенным формулам (4 – 8) даны в таблице 3. Расчетная температура теплоносителя в тепловой сети принята равной 130°C .

Приведенные данные показывают, что несоответствие между установленной в здании поверхностью нагрева отопительных приборов и требуемой поверхностью вызывает необходимость изменять коэффициенты смешения в широком диапазоне, а также изменять расход теплоносителя из сети. Так, например, для обеспечения стабилизации температурного режима в здании, где поверхность отопительных приборов завышена на 30%, необходимо установить коэффициент смешения 2,51 вместо 1,4 и уменьшать расход теплоносителя на 11% ($\alpha_m = 0,89$).

К третьей группе причин, вызывающих необходимость регулирования в абонентском вводе, относятся неодинаковые статические характеристики участка теплопровода от когенерационного источника до данного потребителя.

Если обозначить температуру теплоносителя на выходе ТЭЦ – T_1 , то у абонента 1 температура теплоносителя составит:

$$T_{11} = T_1 - \Delta t_{\text{П1}},$$

у абонента 2:

$$T_{12} = T_1 - \Delta t_{\text{П2}}, \quad (9)$$

у i -того абонента:

$$T_{1i} = T_1 - \Delta t_{\text{Пи}},$$

где $\Delta t_{\text{П1}}, \Delta t_{\text{П2}}, \dots, \Delta t_{\text{Пи}}$ – падение температуры теплоносителя (охлаждение воды в трубах) от когенерационного источника до 1,2... i -того абонента [2]:

$$\Delta t_{\text{П}i} = \sum_{n=1}^{n=i} \frac{K_{\text{тр}} (T_1 - t_{0\text{р}}) \cdot l}{G \cdot c}. \quad (10)$$

При расчетном режиме:

$$\Delta t_{\text{П}i} = \sum_{n=1}^{n=i} \frac{K_{\text{тр}} (T_{1\text{р}} - t_{0\text{р}}) \cdot l}{G_p \cdot c_p}. \quad (11)$$

Теплоемкость воды мало меняется от изменения ее температуры, поэтому можно принять допущение, что $c = c_p$. Изменение коэффициента теплопередачи K_i от теплоносителя к окружающей среде в рассматриваемом случае можно не учитывать. Температура среды, окружающей теплопровод (за исключением условий надземной прокладки), может быть принята постоянной. Отношение расхода сетевой воды при искомом режиме к расходу при расчетном режиме обозначим α . Тогда падение температуры теплоносителя при искомом режиме определится из выражения:

$$\Delta t_{\Pi} = \Delta t_{\text{при}} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_1 - t_0}{T_{1p} - t_0} \quad (12)$$

В таблице 4 приведены результаты расчетов по определению влияния охлаждения воды в трубах на режим работы абонентского отопительного ввода. Падение температуры теплоносителя при расчетном режиме от станции до i -того абонента принято 10 °С. Расчетные температуры теплоносителя: 150/95/70 °С. Регулирование – качественное.

Из таблицы 4 видно, что охлаждение теплоносителя в тепловых сетях приводит к необходимости поддерживать в абонентских вводах отапливаемых зданий уменьшенные коэффициенты смешения и увеличенные расходы сетевой воды.

В рассматриваемом случае требуемый коэффициент смешения при расчетном режиме составил 1,8 вместо 2,2, а коэффициент расхода теплоносителя из сети составил 1,14.

Коэффициент отпуска тепловой энергии φ и коэффициент изменения тепловых потерь в трубах изменяются непропорционально. Так, например, при уменьшении отпуска тепловой энергии в два раза ($\varphi = 0,5$) коэффициент $(T_1 - t_0)/T_{1p} - t_0$ составил 0,543, а при $\varphi = 0,167$, его значение равно 0,275.

В связи с этим влияние охлаждения воды в трубах на режим работы абонентского ввода оказывается неодинаковым при различных температурах наружного воздуха. С повышением наружной температуры требуется уменьшать коэффициент смешения и увеличивать расход теплоносителя из тепловой сети.

В таблице 5 приведены результаты аналогичных расчетов, выполненных для тепловой сети, эксплуатируемой по графику количественно-качественного регулирования. Из этой таблицы видно, что показатели режима работы абонентского ввода в этом случае почти не отличаются от предыдущего. Таким образом, при любом графике регулирования с повышением наружной температуры требуется уменьшать коэффициент смешения и увеличивать расход теплоносителя из тепловой сети.

Таблица 3 – Показатели режима абонентского ввода при несоответствии установленной и требуемой поверхности нагрева отопительных приборов

Отношение фактической поверхности нагрева к требуемой поверхности \bar{f}		1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
Расчетный расход воды в системе, $\alpha_{\text{сист}}$		1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
Коэффициенты смешения и расхода теплоносителя из сети	130°	2,96	2,51	2,18	1,78	1,4	1,01	0,61
	$u_{\text{тр}}$							
		0,85	0,89	0,905	0,95	1,0	1,07	1,19

Таблица 4 – Данные о влиянии охлаждения воды в трубах на режим работы абонентского ввода

$t_{\text{н}}$	φ	T_1	$(T_1 - t_0)/T_{1p} - t_0$	Δt_{Π}	T_{1i}	$u_{\text{тр}}$	$\alpha_{\text{м}}$
-30	1,0	150	1,0	10,0	140	1,8	1,14
-6	0,5	89,8	0,543	5,43	84,37	1,77	1,15
±0	0,375	73,1	0,47	4,70	68,4	1,71	1,17
+10	0,167	44,8	0,275	2,75	42,05	1,54	1,26

Таблица 5 – Данные о влиянии охлаждения теплоносителя в трубах на режим работы абонентского ввода при количественно-качественном регулировании расхода тепловой энергии

$t_{\text{н}}$	φ	α	T_1	$(T_1 - t_0)/T_{1p} - t_0$	Δt_{Π}	T_{1i}	$u_{\text{тр}}$	$\alpha_{\text{м}}$
-30	1,0	1,0	150	1,0	10,0	140	1,8	1,14
-6	0,5	0,84	96,3	0,647	6,47	89,8	1,78	1,15
±0	0,375	0,78	80,3	0,603	6,03	74,3	1,72	1,17
+10	0,167	0,64	51,2	0,43	4,3	46,9	1,53	1,26

Литература:

1 Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления. – Л.: Стройиздат, 1975. –160 с.

2 Чистович С.А., Петров С.П. Перспективы использования приборов энергосберегающей технологии в бивалентных и поливалентных системах теплоснабжения. – Обзорная информация ЦНИИТЭИ приборостроения. – Вып. № 1. – М.: 1990. – 36 с.

УДК 621.83

Канд. техн. наук, доц. ***Шалобаев Е.В., *Бочков А.Л., асс. *Моныхов Ю.С.

(* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики)

(** Научно-технологический центр «Редуктор»)

Россия, г. Санкт-Петербург, тел. (812)2335952; shalobaev47@mail.ru

СОЗДАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРЕНИЯ В ЗАЦЕПЛЕНИИ

The geometrical optimization of the friction element in the contact of the gear of wheels with use the heterogeneous materials and the possibility of creation by they basis the new construction with used the modern technologies is shown.

Современные измерительные технологии используют мехатронные системы с элементами микросистемной техники. основополагающим признаком мехатроники является синергетическое единство механики и электроники. Механика по сравнению с электроникой обладает существенным недостатком – коэффициент заполнения объема низок, а удельный вес, наоборот, высок. Отсюда требование к миниатюризации, невозможной без снижения массогабаритных характеристик, применения новых конструкций и материалов, в первую очередь – новых видов пластмасс и композитов.

Компактными передачами априори являются – планетарные, прецессирующие, волновые, соосные, шарико- и роliko-винтовые, передачи с внутренним зацеплением и т.п. Естественно, что снижение габаритов и массы идут также по линии уменьшения модулей зубчатых колес. В микросистемной технике модули применяемых колес достигли 30-40 мкм. С другой стороны, масштабный фактор привел к обострению проблемы достижения требуемой точности и обновлению документов, нормирующих ее параметры [1].

Образовалось целое направление, связанное с достаточно широким использованием в передаточных механизмах пластических масс и композиционных материалов, которое возглавил В.Е. Старжинский из института механики металлополимерных систем НАНБ (г. Гомель, Беларусь) со своими соратниками и учениками: В.А. Брагинским, Е.В. Шалобаевым, С.С. Песецким, С.В. Шилько, С.А. Осипенко, А.Т. Кудиновым, О.В. Гавриловой и др. Ученому удалось объединить в научный коллектив не только российских, белорусских, украинских, но и болгарских, немецких и американских коллег. Итогом этой масштабной работы стали фундаментальные работы в области проектирования и производства зубчатых передач из пластмасс, создания компактных конструкций [2-7].

Технологии формирования пластмассовых зубчатых колес литьем под давлением позволяют использовать при их конструировании элементы, повышающие прочность, жесткость и технологичность конструкции,

что было невозможно при использовании технологии механической обработки (например, цилиндрические колеса с дополнительными торцевыми перемычками (рис.1, а) или с зубьями, усиленными перемычками в средней по ширине венца плоскости (рис.1, б).

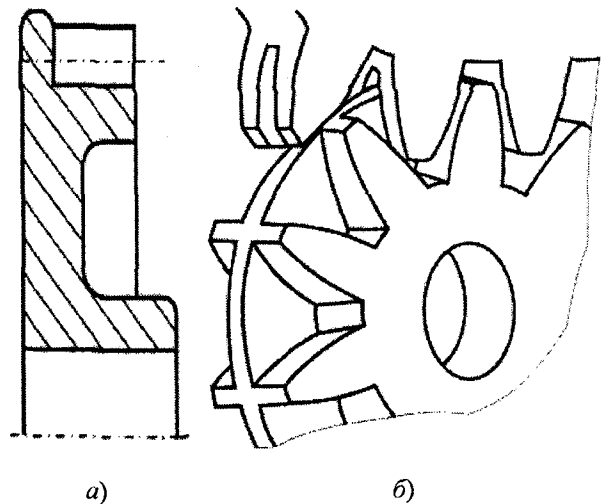


Рис. 1. Способы повышения прочности зубчатых колес: а – дополнительные торцевые перемычки; б – зубья, усиленные перемычками [2]

Сочетание конструктивных элементов и материалов с разными механическими свойствами позволяет создавать конструкции с податливым зубчатым венцом, повышать прочность и жесткость конструкции металлическими армирующими элементами (пластмассовый венец залит с металлическими втулками и ступицами; пластмассовый венец соединен с металлическим фланцем на ступице и металлическим диском крепежными деталями), вводить непосредственно в тело зуба металлические элементы в виде ленточной арматуры с различными вариантами ее закрепления (рис. 2) или использовать металлические зубчатые выступы уменьшенной толщины с полимерным покрытием (рис. 3). Среди используемых при-

мов – применение промежуточных полимерных лент, для устранения кинематического мертвого хода и улучшения эксплуатационных свойств передачи – снижения износа и уменьшения трения (рис. 4).

Указанные выше конструкции стали предпосылками для развития технологии, сформулированной В.М. Медунецким как оболочковой, когда используются армирующие элементы не только как внутренние составляющие конструкции, но и как внешние армирующие элементы в виде оболочки. Таким образом, зубчатый венец можно представить в виде внешней ленточной оболочки, наполненной, в частности, пластмассой с внутренними армирующими элементами. Особенно актуален этот конструкторско-технологический подход при изготовлении формообразующих композиционных матриц.

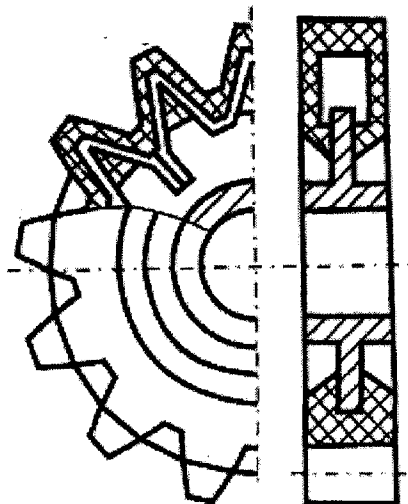


Рис. 2. Полимерное зубчатое колесо с ленточной металлической арматурой в теле зуба [2]

Применение новых конструкций, в частности с оболочковыми формами, приводит к появлению нового качества, так как изменяется направление усадки, а, следовательно, конструкция приобретает новые свойства, которые необходимо еще исследовать. За счет оболочковой технологии известные конструкции могут находить новые возможности реализации (например, конусно-клиновые передачи).

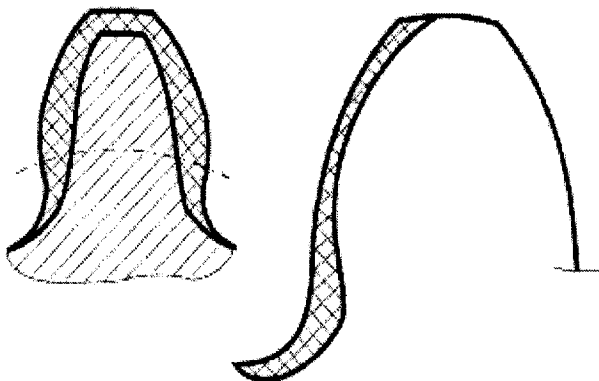


Рис. 3. Полимерное покрытие металлических зубчатых выступов уменьшенной толщины [2]

Развитие конструкций зубчатых колес шло и за счет разного вида модификаций зацеплений, необходимость использования которых была обоснована многими учеными, например, Ф.Л. Литвиным, Г.И. Шевелевой, М.Г. Сегалем. С.А. Лагутиным и др. Особенно хотелось отметить цикл работ К.И. Гуляева (как персонально, так и совместно с его учениками и последователями), как одного из фактических создателей теории приближенных (адаптивных) зацеплений.

Одно из направлений снижения массогабаритных характеристик – уменьшение модуля. Это приводит к широкому применению мелко модульных передач, в которых профили при традиционных технологиях не всегда могут быть модифицированы. Отсюда и разработка новых технологий, позволяющих отказаться от специальных инструментов и использовать погрешности, присущие изготовлению, для модификации зацепления, поскольку при определенных габаритах технологические погрешности становятся соизмеримыми с элементами зацепления.

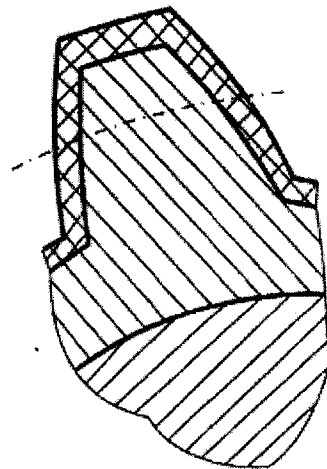


Рис. 4. Применение полимерных лент [2]

Еще одним направлением является использование компактных конструкций соосных передач с блоками колес из пластмасс, которые позволяют объединить в одном элементе функции передачи движения с опорами. Обычно зубчатые колеса обладают высоким КПД, однако, при снижении массогабаритных параметров, многие параметры изменяются, что требует проведения серьезных исследований. Известно, что обработка лазерным лучом изменяет свойства поверхности (при этом необходимо сканировать поверхность, чему содействует расширение применения новых видов сканеров).

Традиционная технология изготовления зубчатых колес базировалась на классической теории, например, теории эвольвентного зацепления Ф.Л. Литвина, а одна из современных технологий, литье под давлением, – на теории обобщенных координат Э.Б. Вулгакова. При изготовлении зубчатых передач намечался переход от геометро-кинематического подхода к геометро-энергетическому, наиболее полно разработанному В.В. Шульцем. Из него становится ясно, что необходимо также переходить к несопряженным

передачам. При этом приходит понимание о нерациональности борьбы с износом до приобретения зацеплением устойчивой формы. На рис. 5 показана стационарная форма искажения линии зацепления сопряженных профилей. Для исключения искажений и требуется модификация профилей.

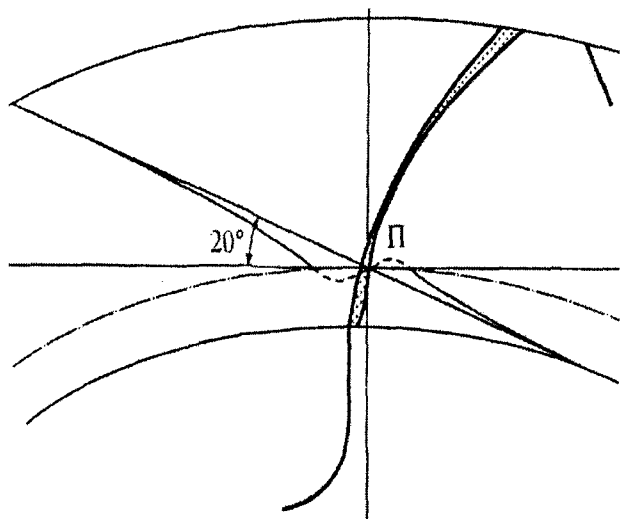


Рис. 5. Стационарная форма искаженной линии зацепления [7]

Профиль изношенной поверхности зуба зависит от исходной геометрии входящих в зацепление зубьев, режимов нагружения и условий смазки [2]. Для легконагруженной зубчатой пары, когда поверхности трения разделены сплошной смазочной пленкой, характерен сравнительно равномерный износ материала поверхности вдоль профиля зуба (рис. 6, а).

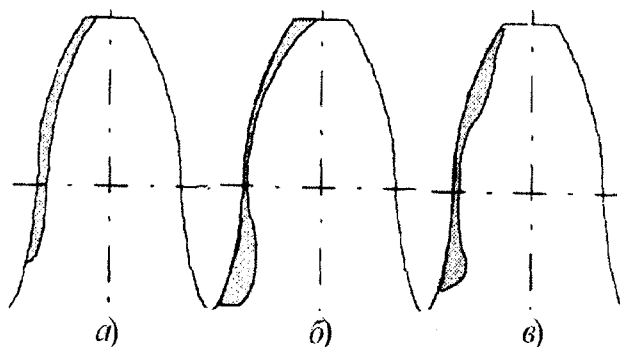


Рис. 6. Профили изношенных поверхностей зубьев при разных силовых режимах работы [8]

Для тяжело нагруженных пар характерен неравномерный износ (рис. 6, б). Начиная от полюсной части и до вершины зуба, износ монотонно увеличивается, что обусловлено ростом деформаций сдвига, смятия и интенсивности усталостного разрушения материала поверхностного слоя. Максимальный износ наблюдается также на ножке зуба в околополюсной зоне, подвергаемой интенсивному усталостному разрушению и пластическому оттеснению материала к полюсной линии. В полюсной зоне зуб изнашивается

наименее интенсивно, поскольку здесь проскальзывание минимально и реализуется преимущественно трение качения. При высоких нагрузках и малой твердости материалов сопрягаемых тел величина износа в полюсной зоне зависит от того, ведущим или ведомым является зубчатое колесо. На поверхности зуба ведущего колеса образуется канавка, а ведомого – гребешок. В первом случае сдвиг материала осуществляется от полюсной линии к периферии зуба, а во втором – наоборот.

Форма изношенной поверхности зуба может отличаться от описанных. Так, при неточном изготовлении сопрягаемых зубьев она может соответствовать профилю, представленному на рис. 6, в [3].

Математическим путем можно получить требуемый исходный контур инструмента, который будет отличаться от стандартного, то есть будет модифицированным [4]. При этом вид самого профиля будет отличаться от традиционного эвольвентного, обеспечивающего геометро-кинематический подход, и соответствовать геометро-кинематической теории зацеплений (рис. 7). Учитывая ограничения в этом случае из-за масштабного фактора (для мелко модульных зубчатых передач), имеет смысл применить принцип использования погрешностей для получения несопряженного зацепления.

Например, используя погрешность направления зуба (из-за торцевого биения заготовки), можно придавать ему бочкообразность, при изменении поверхности базирования по второй торцевой поверхности (вторичное зубонарезание). Контакт в такой передаче смещается к средней плоскости зубчатого венца, что исключает кромочный контакт и улучшает качество работы передачи. Таким образом, используется принцип замены отрицательного влияния погрешности изготовления на создание положительного эффекта при работе колеса в зацеплении.

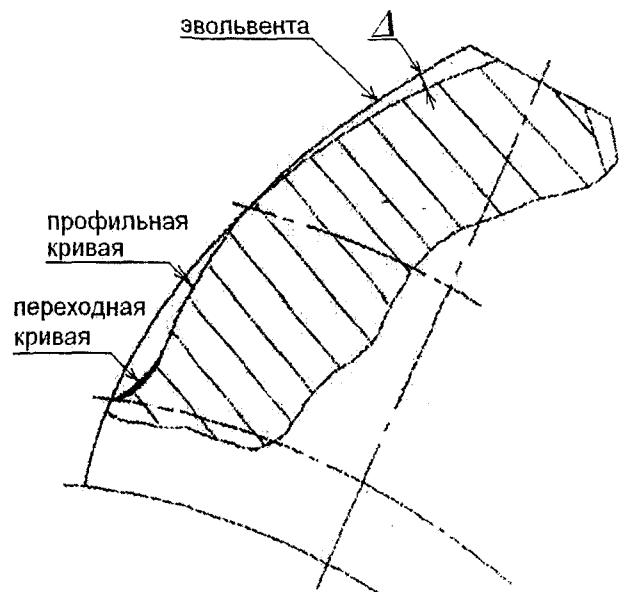


Рис. 7. Отклонение профильной кривой зуба от эвольвенты [10]

На основе использования новых материалов (в частности, пьезокерамики) появились конструкции, которые должны были решить те или иные задачи, например, повышение точности, связанное с уменьшением кинематического мертвого хода и трения в зацеплении.

В качестве примеров можно привести две конструкции составных колес с пружинными люфтовывбирателями. В первой одна часть составного зубчатого колеса получает осевое перемещение за счет наличия сферического пьезоэлемента. При этом используется эффект Жуковского по уменьшению трения в зацеплении, которое с применением пружинных люфтовывбирателей увеличивается. Во второй подобной конструкции с использованием спиральной пружины пьезоэлемент может компенсировать уменьшение жесткости пружины со временем, что уменьшает передаваемый без кинематического мертвого хода в зацеплении крутящий момент. Другие варианты конструкций люфтовывбирающих полимерных колес приведены на рис. 8.

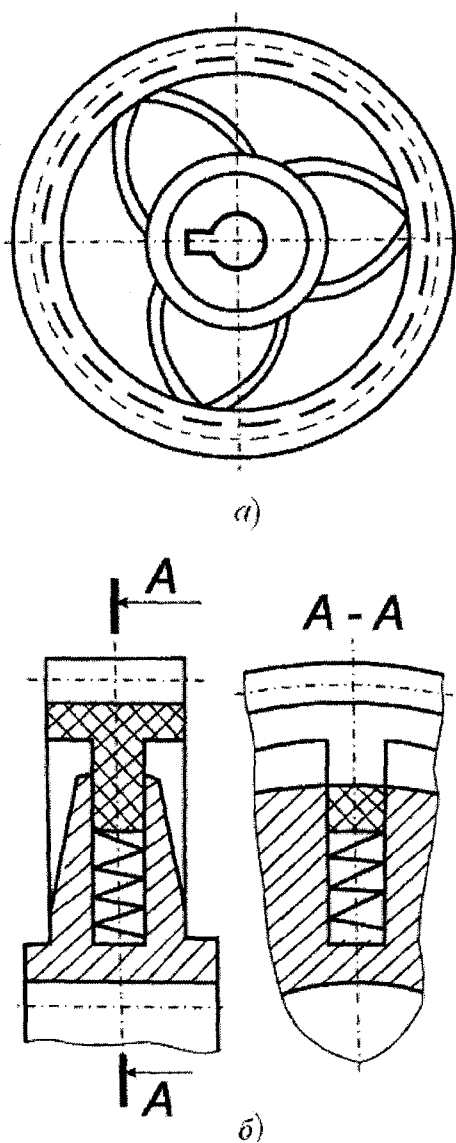


Рис. 8. Варианты конструкций люфтовывбирающих полимерных зубчатых колес [2]

Известно, что решение многих проблем лежит на границах применения различных технологий. Поэтому, комбинируя перечисленные выше технологии обработки разнородных материалов, в работе производится оптимизация трибопары в зацеплениях при создании на их основе ряда конструкций зубчатых передач (в частности, соосных с блоками пластмассовых колес на неподвижных осях или конусно-клиновые передачи, на основе оболочковой формы [9]). При определенных условиях целесообразно использование подобного зацепления. Например, такие передачи позволяют путем регулировки изменять величину бокового зазора (осевым смещением зацепляющихся звеньев).

Литература:

- 1 Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. – 2000. – №4. – С. 5-9.
- 2 Старжинский В.Е. Пластмассовые зубчатые колеса в передачах точного приборостроения / В.Е. Старжинский, В. Краузе, О.В. Гаврилова и др. – Мн.: Наука і тэхніка, 1993. – 359 с.
- 3 Точные пластмассовые детали и технологии их получения / В.Е. Старжинский, М.А. Фарберов, С.С. Плесецкий и др. – Мн.: Наука і тэхніка, 1991.
- 4 Справочник по технологии изделий из пластмасс / А.И. Школьник, В.А. Брагинский, В.Е. Старжинский и др. Под ред. Г.В. Сагалаева, В.В. Абрамова, В.Н. Кулезева, С.В. Власова. – М.: Химия, 2000. – 424 с.
- 5 Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов: Расчет и конструирование. Справочное издание / В.Е. Старжинский, Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев, А.Т. Кудинов. Под общ. ред. В.Е. Старжинского и Е.В. Шалобаева. – Санкт-Петербург – Гомель: ИММС НАНБ, 1998. – 538 с.
- 6 Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: Учебное пособие / В.Е. Антонюк, М.М. Кане, В.Е. Старжинский и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 766 с.
- 7 Шульц В.В. Точность и трение // В кн.: Фундаментальные проблемы теории точности. Под ред. В.П. Булатова и И.Г. Фридендера. – СПб.: Наука, 2001. – С. 234-267.
- 8 Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах: Учеб. для вузов. Мн.: Выш. Шк., 1999. – 374 с.
- 9 Медунецкий В.М. Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач. – СПб.: Политехника, 2002. – 160 с.
- 10 Шалобаев Е.В., Медунецкий В.М., Монахов Ю.С. Комплексный подход к профильной модификации зубчатых колес для повышения их качественных показателей / Ижевск: 2004.
- 11 Мьликин Н.К., Петроковец М.И. Трибология: принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 31 с.
- 12 Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и проблемы развития современной трибологии // Микросистемная техника. – 2003. – №9. – С.26-27.

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621-2.002.2; 621.81.002.2

Студ. Фомин Д.С., д-р техн. наук, проф. Степанов Ю.С., доц. Афанасьев Б.И.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419877; E-mail: tmsi@mail.ostu.ru

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ С УПРОЧНЕНИЕМ

One uses a combined tool with the body like a bush with disks installed upon it one of which is worked plain with the operation surface at the periphery and the rest of disks are supplied with openings located at the periphery for fastening U-shaped wire trusses and flanges for fixation of disks on the bush. The combined technique widens technological possibilities, for working due to matching of needle milling and strengthening, shortens subsidiary time, increases 2...2,5 times working productivity, improves quality and roughness of the surface to be worked.

Иглофрезерование – процесс резания металлов, при котором стружка срезается многочисленными податливыми микрорезцами – иглами, представляющими собой режущие элементы иглофрезы. Микрорезец – это отрезок высокопрочной проволоки, заземленный с одной стороны и зажатый аналогичными проволочками по всей длине с определенным усилием для получения необходимой плотности набивки. Процесс иглофрезерования имеет широкие технологические возможности: получение низкой шероховатости, создание в поверхностном слое заготовки повышенной микротвердости и сжимающих напряжений, использование как отделочно-зачистной обработки.

Предлагаемый разработанный способ [1] предназначен для чистовой обработки иглофрезерованием с одновременным поверхностным упрочнением рабочих поверхностей стальных и чугунных деталей, аналогом которого послужил известный способ обработки и инструмент для его реализации в виде цилиндрической щетки, содержащей втулку с установленными на ней дисками, каждый из которых имеет размещенные по периферии отверстия для крепления U-образных пучков проволочного ворса и фланцы для фиксации дисков на втулке [2].

Недостатками известного способа и инструмента являются неэффективное использование щетки с недостаточно плотным, ненадежным креплением проволочного ворса, и поэтому обладающей малой жесткостью, что не позволяет добиться высокой производительности и качественно удалять значительные припуски. При этом для повышения твердости поверхностного слоя обрабатываемой детали необходимо дополнительно вводить термическую операцию, что удорожает процесс изготовления.

Целью разработанного способа является расширение технологических возможностей, повышение качества упрочненного слоя и увеличения его толщины, а также повышение производительности за счет совмещения иглофрезерования и фрикционного поверхностного упрочнения.

Предлагаемый комбинированный способ иглофрезерования с упрочнением осуществляется специ-

альным иглоупрочняющим инструментом и предназначен для совместной и последовательной обработки иглофрезерованием и фрикционным поверхностным упрочнением.

Инструмент, реализующий способ, содержит корпус 1 в виде втулки с установленными на ней дисками, один из которых 2 гладкий с рабочей поверхностью на его периферии. Остальные диски 3 имеют размещенные по периферии отверстия 4 для крепления U-образных пучков 5 проволочного ворса.

Неподвижный фланец 6 принадлежит корпусу 1 и служит для фиксации дисков 2 и 3 на нем. Инструмент содержит четыре косые шайбы 7 по две штуки с каждого торца инструмента, из которых две расположены между неподвижным фланцем 6 и гладким диском 2, а две остальные вместо подвижного фланца с другого торца инструмента. Подвижный фланец в виде двух косых шайб 7 закреплен гайкой 8.

Каждый U-образный пучок 5 проволочного ворса закреплен на диске 3 так, что участок его сгиба размещен между парой отверстий 4, а его свободные концы проходят через эти отверстия и расположены радиально по отношению к оси корпуса 1. Расстояние между осями каждой пары отверстий диска 3 не превышает удвоенного диаметра d отверстия.

Диски 3 установлены со смещением один относительно другого так, что U-образные пучки ворса 5 одного из них расположены между пучками другого.

Расстояние l между осями отверстий 4 двух рядом расположенных по длине корпуса 1 дисков 3 равно половине расстояния L между осями пары отверстий 4 в диске. Для повышения жесткости на корпусе 1 установлен гладкий диск 2, дополнительный фланец 9 и гайка 10. Диски 2 и 3 установлены под острым углом к плоскости, перпендикулярной оси вращения, благодаря косым шайбам 7, расположенными между фланцем 6 и диском 2, а также между гайкой 8 и дисками 3, и позволяют плавно изменять угол наклона дисков от нуля до максимального значения. Угол между торцами косой шайбы 7 равен $0,5\alpha_{\max}$ – половине максимального угла α_{\max} наклона дисков 2 и 3.

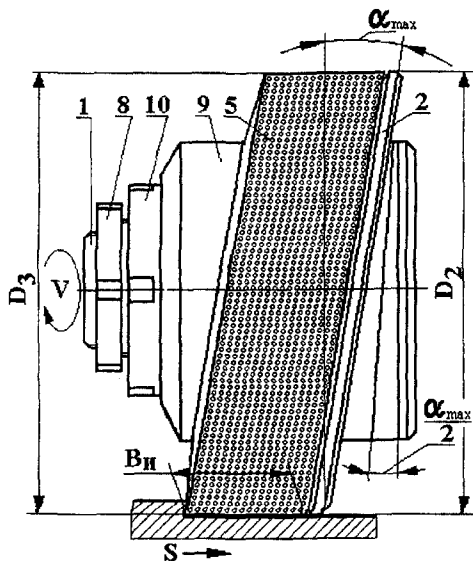


Рис. 1. Схема обработки комбинированным иглоупрочняющим инструментом, где показан общий вид инструмента с наладкой на максимальный угол наклона режущего и упрочняющего слоя

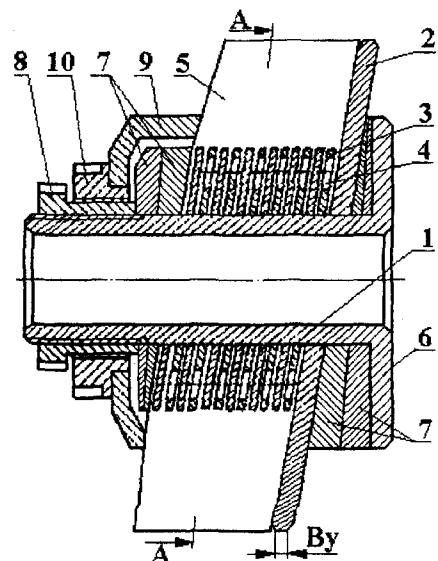


Рис. 2. Продольный разрез инструмента с наладкой на максимальный угол наклона режущего и упрочняющего слоя

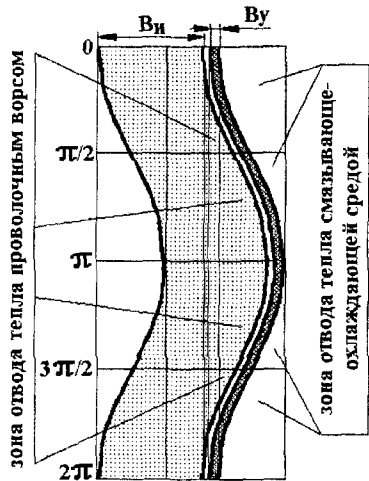


Рис. 3. Развертка следа комбинированного инструмента с максимальным углом наклона на обработанной поверхности (см. рис. 1)

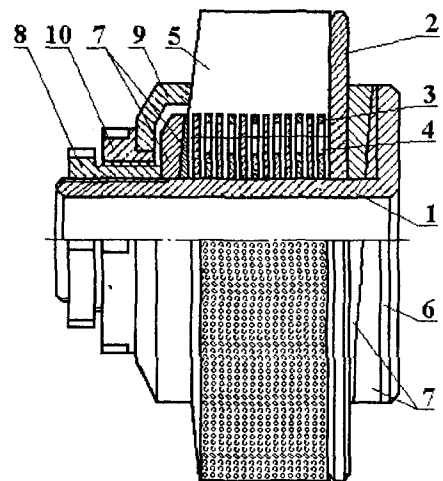


Рис. 4. Частичный продольный разрез инструмента с наладкой на нулевой угол наклона режущего и упрочняющего слоя

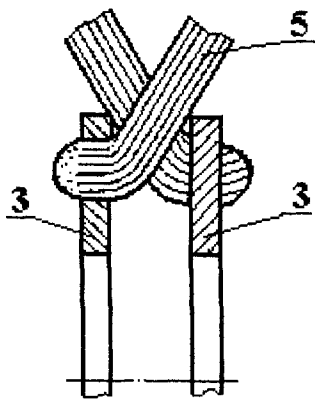
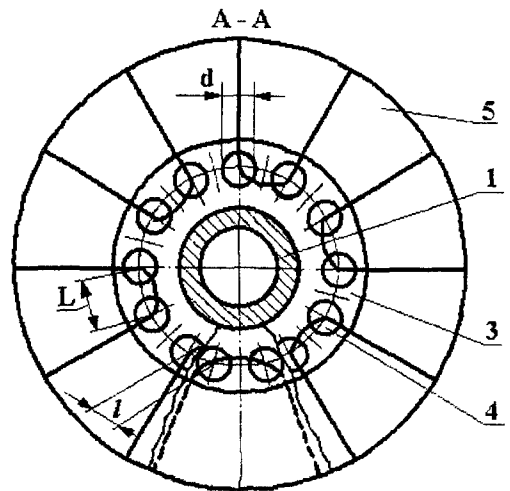


Рис. 5. Схема сборки дисков с проволочными пучками (иглофрезы)



Гладкий диск 2 выполнен как упрочняющий из материала с низким коэффициентом теплопроводности. Диаметр D_2 диска 2 берут меньше диаметра D_3 дисков 3 с ворсом на удвоенную величину натяга, с которым инструмент прижимается к детали.

Сборка предложенного инструмента осуществляется следующим образом.

Нарезается проволока из бухты, и набираются пучки диаметром, близким к диаметру отверстия 4. Пучки перегибаются и концами продеваются в соседние отверстия 4 диска 3, после чего они вторично перегибаются уже в радиальном направлении диска. Затем диски 3 надеваются на корпус 1 до упора в диск 2 и шайбы 7, предварительно установленные на корпусе, и фиксируются с противоположной стороны другими косыми шайбами с последующей затяжкой под пресом гайкой 8. Диски 3 устанавливаются на корпусе 1 таким образом, что пучки ворса на одном диске располагаются между пучками ворса на рядом стоящем диске. Косые шайбы 7, попарно установленные с торцов инструмента, для настройки инструмента на максимальный угол наклона дисков располагаются попарно максимальной толщиной в диаметрально противоположных местах (см. рис. 2). Для настройки инструмента на минимальный угол диски располагаются максимальной толщиной в диаметрально противоположных местах в каждой паре (см. рис. 4).

Упрочняющая обработка по предлагаемому способу осуществляется следующим образом.

Инструмент устанавливается на вал, которому сообщается вращение, и подводится к обрабатываемой поверхности. Концы проволочного ворса, взаимодействуя с обрабатываемой поверхностью, осуществляют микрорезание. При небольшом вылете ворса (15...20 мм) инструмент работает как иглофреза.

Вслед за обработкой поверхности иглофрезерованием ведется фрикционное поверхностное упрочнение гладким диском 2. Инструмент вращается с окружной скоростью не менее $V = 60...70$ м/с и прижимается с постоянным усилием 600...1000 Н к обрабатываемой детали, например, (применительно к круглому иглоупрочнению) вращающейся с окружной скоростью 0,02...0,08 м/с. Продольная подача инструмента относительно детали составляет $S = 0,6...1,5$ мм/об. Длина линии контакта упрочняющего диска 2 с обрабатываемой деталью составляет $B_y = 5...8$ мм. При трении диска 2 и детали в зоне их контакта происходит локальный импульсный нагрев поверхности детали до температуры 800...1000 °С. В зону обработки подают смазывающе-охлаждающую среду (СОС), например, масло минеральное И-12А, которое обеспечивает быстрое охлаждение упрочняемой поверхности. В результате упрочнения на поверхности детали возникают структуры белых слоев толщиной 100...150 мкм с повышенной микротвердостью (7...10 ГПа). В зоне фрикционного скользящего контакта образуется определенное количество теплоты, доминирующая часть которой уходит в быстро вращающийся инструмент. Поэтому в качестве материала диска 2 выбирают титановый сплав или нержавяющую сталь, обладающие низкой теплопроводностью ($\lambda = 21,9...25,5$ Вт/м · К) [3].

При сочетании большой скорости вращения инструмента и синусоидального осциллирования в продольном направлении зоны контакта упрочняющего диска 2 с обрабатываемой деталью происходит мгновенная смена упрочняемой поверхности и мгновенный отвод тепла из предыдущего участка контакта и охлаждение последнего СОС. При попадании в осциллирующую зону упрочняющего диска ворса также происходит мгновенный отвод тепла с поверхности упрочняемой детали (см. рис. 3). Это приводит к циклическому изменению температуры на поверхности детали и, соответственно, к увеличению глубины упрочненного слоя до 150...220 мкм.

Угол наклона диска 2 выбирают из соотношения

$$\alpha = \arctg(B_y/D_2), \quad (1)$$

где B_y – длина линии контакта диска 2 с обрабатываемой деталью, т.е., рабочая высота диска;
 D_2 – диаметр упрочняющего диска 2.

При значении $\alpha < \arctg(B_y/D_2)$ увеличение глубины упрочненного слоя незначительно, но отвод тепла ухудшается, а при $\alpha > \arctg(B_y/D_2)$ отвод тепла улучшается, происходит дальнейшее незначительное увеличение толщины упрочненного слоя, однако, это приводит к росту дисбаланса и ухудшению качества. При выбранных значениях $B_y = 8$ мм и $D_2 = 200$ мм угол наклона дисков составит $\alpha = 2^{\circ}18'$.

Использование предлагаемого комбинированного способа позволяет повысить эффективность использования комбинированного иглоупрочняющего инструмента в целом, и, в частности, иглофрезы с надежным креплением проволочного ворса за счет повышения набивки ворса и жесткости иглофрезы. Надежность крепления ворса позволяет высокопроизводительно и качественно удалять значительные припуски, т.е. работать в тяжелых условиях. Что касается фрикционной упрочняющей части инструмента, то она проста по конструкции и надежна в эксплуатации. Получаемые на поверхности упрочняемой детали структуры белых слоев обладают повышенной твердостью, а, следовательно, износостойкостью и сопротивлением усталостному разрушению. Комбинированный способ расширяет технологические возможности обработки, благодаря совмещению иглофрезерования и упрочнения, сокращает вспомогательное время, повышает в 2...2,5 раза производительность обработки, улучшает качество и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Литература

- 1 Патент РФ 2243877, МПК⁷ В 24, В 39/04, 39/06. Комбинированный способ иглофрезерования с упрочнением / Ю.С. Степанов, Д.С. Фомин, Б.И. Афанасьев и др. – Оpubл. 10.01.2005, Бюл. № 1.
- 2 Патент США № 2983940, Кл. 15-181. 1961.
- 3 А.С. 1712135, МКИ В 24, В 39/04. Инструмент для фрикционного поверхностного упрочнения / В. И. Кырылев, Т. Н. Каличук. – Оpubл. 15.02.92, Бюл. № 6.

УДК 621.9

Канд. техн. наук Катунин А.В., асп. Жирков А.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орёл, тел. (4862)419877; E-mail: tmsi@mail.ostu.ru

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ

In this article offered way of the reduction vibration, appearing in process of the intermittent cutting, by means of additional operated power influence on instrument.

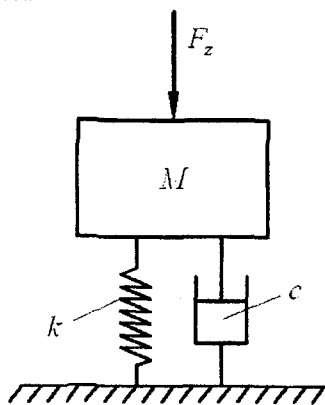
При прерывистом резании основной причиной выхода из строя режущей части инструмента, по мнению многих исследователей [1, 2, 3], является цикличность и колебательный характер механических нагрузок.

Самым простым способом снижения вибраций при прерывистом резании, является уменьшение скорости резания. Однако, такой подход, приводит к значительным потерям производительности и, в отдельных случаях, ставит под вопрос целесообразность применения твердосплавного и металллокерамического режущего инструмента.

Другие способы борьбы с вибрациями, основаны на эффекте поглощения энергии колебаний консольной части инструмента материалами с высокой демпфирующей способностью [4, 5].

В настоящей статье предлагается способ снижения вибраций, обусловленных периодическим врезанием стержневого инструмента в заготовку, посредством дополнительного управляемого силового воздействия на инструмент.

Для пояснения сути предложенного способа необходимо выполнить анализ поведения динамической модели консольной части режущего инструмента (рис. 1) под действием импульсов, имитирующих тангенсальную составляющую силы в процессе прерывистого резания.



k – коэффициент жесткости; c – коэффициент сопротивления; M – приведенная масса; F_z – внешняя сила

Рис. 1. Динамическая модель консольной части инструмента

Условие равновесия модели выполняется при равенстве суммы внутренних и внешних сил.

$$F_i + F_d + F_j = F_z, \quad (1)$$

где: F_i, F_d, F_z, F_j – соответственно, сила инерции, диссипативная и внешняя силы, сила упругости.

Силы F_i, F_d, F_j пропорциональны, соответственно, ускорению a , скорости v и перемещению Z , то есть:

$$M \cdot a + c \cdot v + k \cdot Z = F_z. \quad (2)$$

Компоненты уравнения (2) v и a являются, соответственно, первой и второй производными перемещения Z по времени t . Запишем уравнение (2) в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial^2 Z(t)}{\partial t^2} + c \cdot \frac{\partial Z(t)}{\partial t} + k \cdot Z(t) = F_z(t). \quad (3)$$

Для моделирования силовых импульсов внешнего воздействия $F_z(t)$ нами предложено следующее уравнение, обеспечивающее их максимальное приближение к реально действующим импульсам:

$$F_z(t) = F_s \cdot \left[1 - \cos^{K_F} \left(\frac{1}{T_{ps}} \cdot \pi \cdot t \right) \right], \quad (4)$$

где: $F_s = k \cdot Z_s$ – сила при установившемся режиме; Z_s – уровень деформации инструмента при установившемся режиме; $K_F = 2, 4, 6 \dots$ – коэффициент интенсивности нарастания нагрузки; T_{ps} – длительность импульса, с; t – текущее время.

В процессе моделирования K_F вычисляется методом итераций. Итерационный процесс завершается при выполнении равенства фактической $\partial F_z(t)/\partial t$ и заданной V_{Fz} скоростей нарастания внешней силы.

Вычисление кинетической $T(t)$, потенциальной $\Pi(t)$ и полной энергии $E(t)$ производят по формулам:

$$T(t) = 0,5 \cdot M \cdot \left[\frac{\partial Z(t)}{\partial t} \right]^2, \quad (5)$$

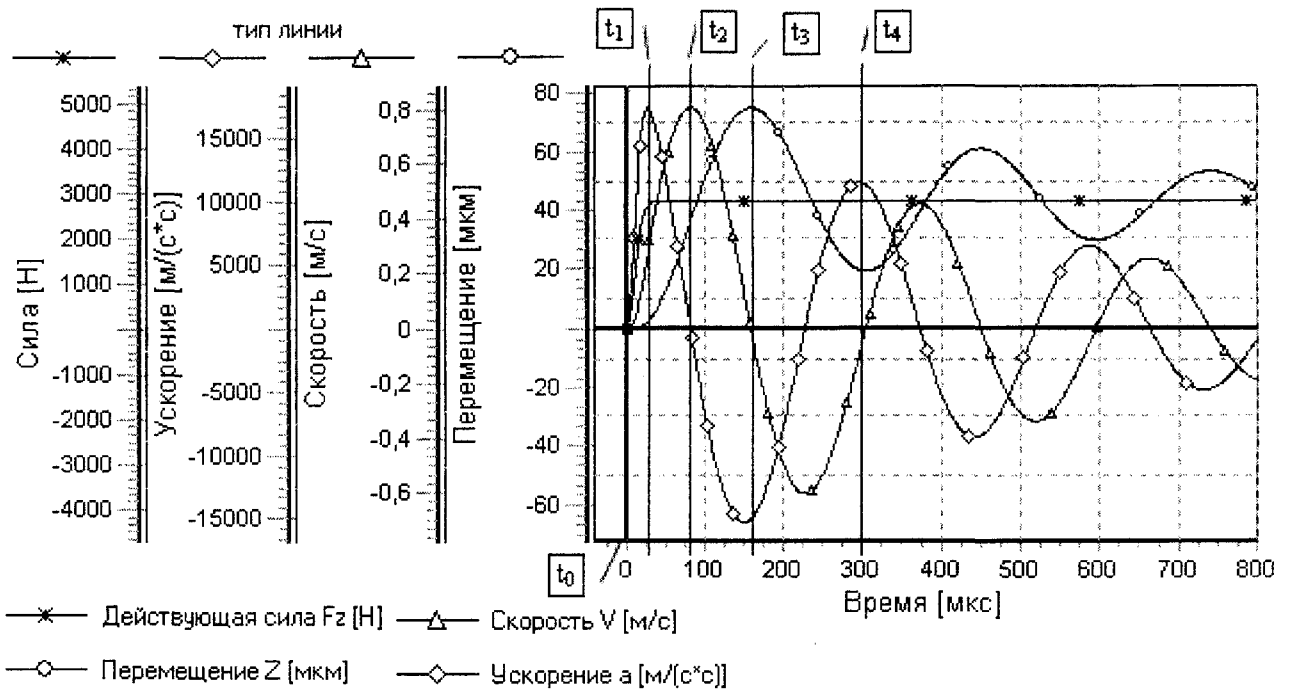
$$\Pi(t) = 0,5 \cdot k \cdot Z(t)^2, \quad (6)$$

$$E(t) = T(t) + \Pi(t). \quad (7)$$

Рассмотрим поведение модели при условии, что, на момент начала действия внешней силы $F_z(t)$, инструмент находится в покое, то есть:

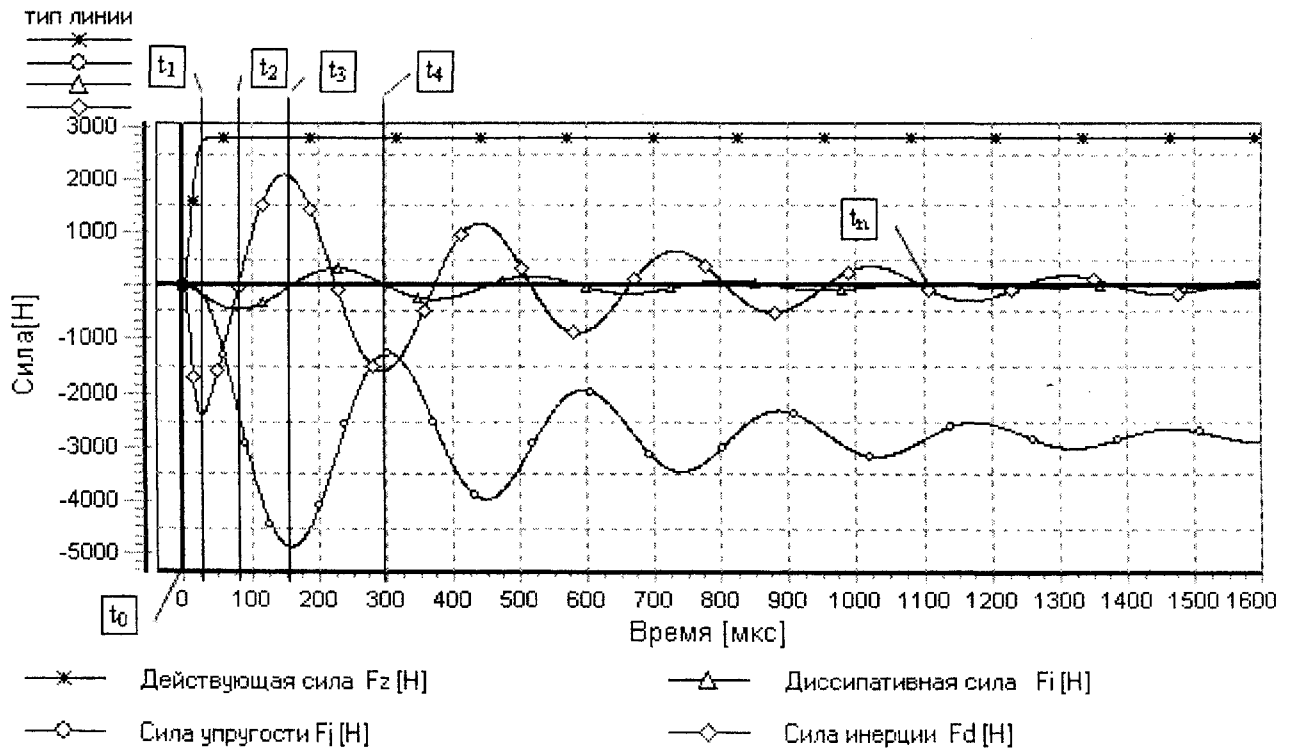
$$Z(0) = 0, \quad \frac{\partial Z(t)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial^2 Z(t)}{\partial t^2} = 0.$$

На рис. 2, 3 и 4 представлены временные диаграммы характеристик модели инструмента. В начальный период нагружения (интервал времени t_0-t_1) наблюдается резкое нарастание инерционных составляющих (ускорения и силы инерции рис. 2, 3).



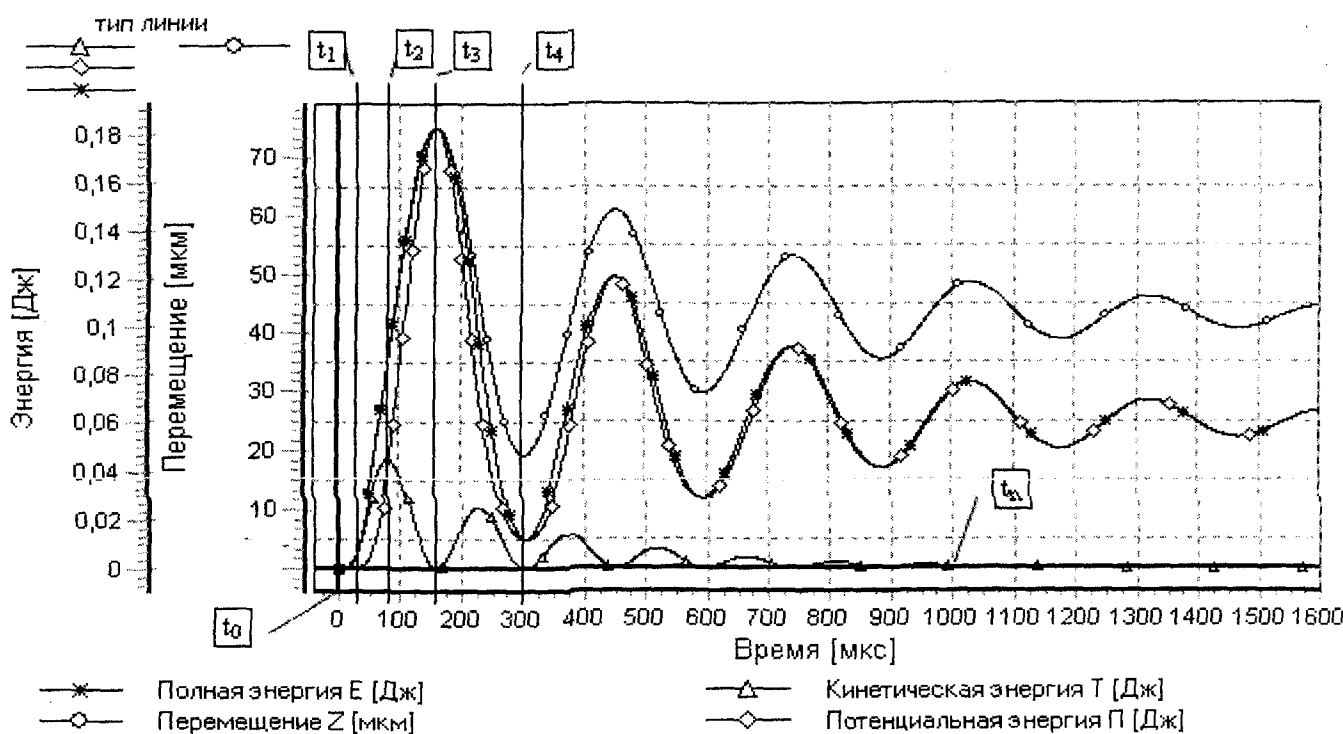
Параметры силового импульса: $F_S = 2800$ Н; $V_{Fz} = 160 \cdot 10^6$ Н/с; $T_{ps} = 5000$ мкс

Рис. 2. Временная диаграмма перемещений, скоростей и ускорений



Параметры силового импульса: $F_S = 2800$ Н; $V_{Fz} = 160 \cdot 10^6$ Н/с; $T_{ps} = 5000$ мкс

Рис. 3. Временная диаграмма сил



Параметры силового импульса: $F_S = 2800$ Н; $V_{Fz} = 160 \cdot 10^6$ Н/с; $T_{ps} = 5000$ мкс

Рис. 4. Временная диаграмма изменения энергии

До момента достижения своего первого экстремума (момент времени t_1 на рис. 3) сила инерции равна по значению и противоположна по знаку действующей внешней силе, а смещение (перемещение) и скорость смещения вершины инструмента несущественны (рис. 2). Таким образом, при начальном взаимодействии динамическая система короткой промежуток времени (t_0-t_1) практически остается без движения, поэтому ее кинетическая энергия близка к нулю. При этом равновесие в системе сохраняется в результате противодействия двух сил: внутренней – силы инерции и внешней – действующей силы.

После момента времени t_1 происходит увеличение скорости и деформации динамической системы, вследствие чего наблюдается уменьшение величины инерционных составляющих (ускорения и силы инерции), которые к моменту времени t_2 снижаются до нулевого уровня. Сила упругости достигает величины соответствующей статическому равновесию системы (момент времени t_2 на рис. 3, $F_f = F_S$). Так как в рассматриваемый момент времени скорость максимальна, то кинетическая энергия системы также принимает максимальные значения (момент времени t_2 на рис. 4). Поэтому инструмент, после достижения уровня статического равновесия Z_s , продолжает деформироваться (рис. 2), из-за чего возрастает сила инерции (рис. 3).

К моменту времени t_3 накопленная кинетическая энергия системы полностью расходуется на деформацию инструмента (рис. 4). Так как положение его вершины превышает уровень статического равновесия, то инструмент обладает потенциальной энергией. Поэтому после времени t_3 инструмент начинает деформироваться в противоположном направлении.

По мере приближения вершины инструмента к положению статического равновесия происходит увеличение скорости (рис. 2), а, следовательно, и увеличение кинетической энергии (рис. 4). Поэтому инструмент вновь проходит положение статического равновесия и продолжает деформироваться до тех пор, пока накопленная кинетическая энергия полностью не израсходуется на совершаемое перемещение (до момента времени t_4 , на рис. 4).

После момента времени t_4 описанный цикл повторяется несколько раз, и к времени t_m в результате действия диссипативной силы, колебания инструмента затухают (рис. 2), а динамическая система переходит в установившийся режим. В этом режиме действующая сила и сила упругости равны по значению и противоположны по знаку, а значения силы инерции и диссипативной силы близки к нулю (рис. 3). Т.е., в рассматриваемый период времени система сохраняет равновесие при противодействии двух сил: внутренней – силы упругости и внешней – действующей силы.

На основе проведенного анализа можно заключить:

1) первопричиной возникновения вибраций является наличие кинетической энергии в момент достижения инструментом уровня статического равновесия Z_s в период его начального смещения от нулевого уровня (момент времени t_2 , рис. 2 и 4);

2) установлено, что при начальном взаимодействии инструмента и заготовки увеличение кинетической энергии не происходит, при этом реакция динамической системы появляется лишь в нарастании силы инерции до значения внешней силы (период времени t_0-t_1 , рис. 3 и 4).

Согласно заключениям, если на момент начала цикла резания обеспечить такое состояние динамической системы, при котором:

1) деформация инструмента соответствует уровню статического смещения при установившемся резании – $Z(t) \approx Z_s$;

2) сила инерции близка к величине действующей силы при установившемся режиме – $F_z(t) \approx F_S$;

3) значение кинетической энергии системы близко к нулю – $T(t) \approx 0$,

то, в результате нарастания действующей силы, произойдет снижение силы инерции до нулевого уровня. Равновесие в динамической системе в оставшееся время цикла резания будет сохраняться за счет противодействия силы упругости и внешней силы $F_z(t)$. Таким образом, динамическая система без вибраций перейдет в установившийся режим. Причем, чем точнее будут соблюдаться указанные условия, тем выше степень снижения вибраций.

Приведенные условия лежат в основе предлагаемого способа.

Требуемое состояние динамической системы обеспечивается посредством дополнительного силового воздействия $F_z^{don}(t)$, производимого до начала цикла резания, т.е., до основного силового воздействия $F_z(t)$. Дополнительная сила $F_z^{don}(t)$ изменяется в соответствии с уравнением:

$$F_z^{don}(t) = \sin\left(\frac{\pi}{T_{ps}^{don}} \cdot t\right), \quad (8)$$

где: T_{ps}^{don} – длительность импульса дополнительного силового воздействия.

Суммарная действующая сила $F_z(t)$ с учетом дополнительной $F_z^{don}(t)$ будет выражаться уравнением:

$$F_z(t) = F_z^{och} + F_z^{don}, \quad (9)$$

где: F_z^{och} – основная внешняя сила, обусловленная взаимодействием инструмента и заготовки.

Составим уравнение равновесия динамической системы с учетом дополнительного силового воздействия:

$$\frac{\partial^2 Z(t)}{\partial t^2} + c \cdot \frac{\partial Z(t)}{\partial t} + k \cdot Z(t) = F_z^{och}(t + t_{os}) + F_z^{don}(t), \quad (9)$$

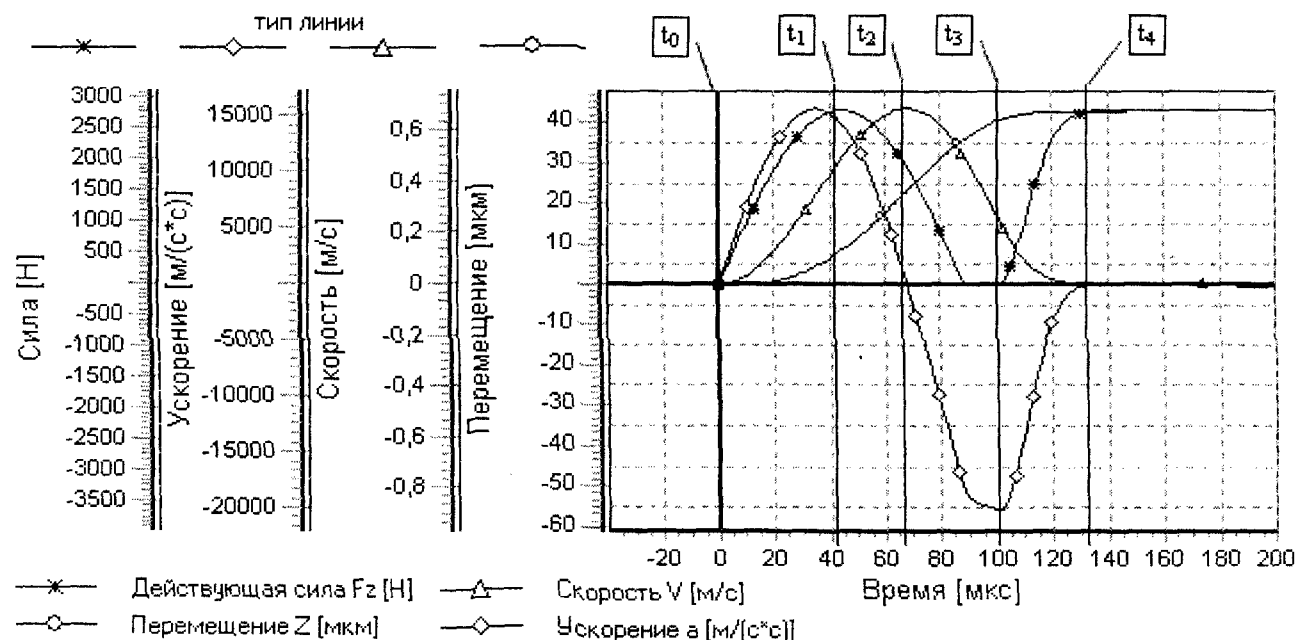
где: t_{os} – время смещения дополнительного силового воздействия относительно начала цикла резания.

В соответствии с приведенными условиями, снижение вибраций будет в том случае если:

$$t_{os} = t, \text{ при } \begin{cases} Z(t) \approx Z_s, \\ F_z(t) \approx F_S, \\ T(t) \approx 0. \end{cases} \quad (10)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6, и 7. Поведение модели при нарастании внешней силы $F_z(t)$ в период дополнительного силового воздействия (t_0-t_1) не отличается от поведения в уже рассмотренном случае (соответствует заключению 1).

По окончании времени t_1 , вследствие уменьшения внешней силы $F_z(t)$, происходит снижение силы инерции до нулевого уровня (момент времени t_2 на рис. 6). В этот момент скорость (рис. 5) и кинетическая энергия (рис. 7) принимают максимальные значения. Поэтому деформация инструмента (рис. 5) в оставшийся период времени до начала цикла резания обусловлена, в основном, наличием кинетической энергии в момент времени t_2 (рис. 7).



Параметры силового импульса: $F_S = 2800$ Н; $V_{Fz} = 160 \cdot 10^6$ Н/с; $T_{ps} = 5000$ мкс

Рис. 5. Временная диаграмма перемещений, скоростей и ускорений

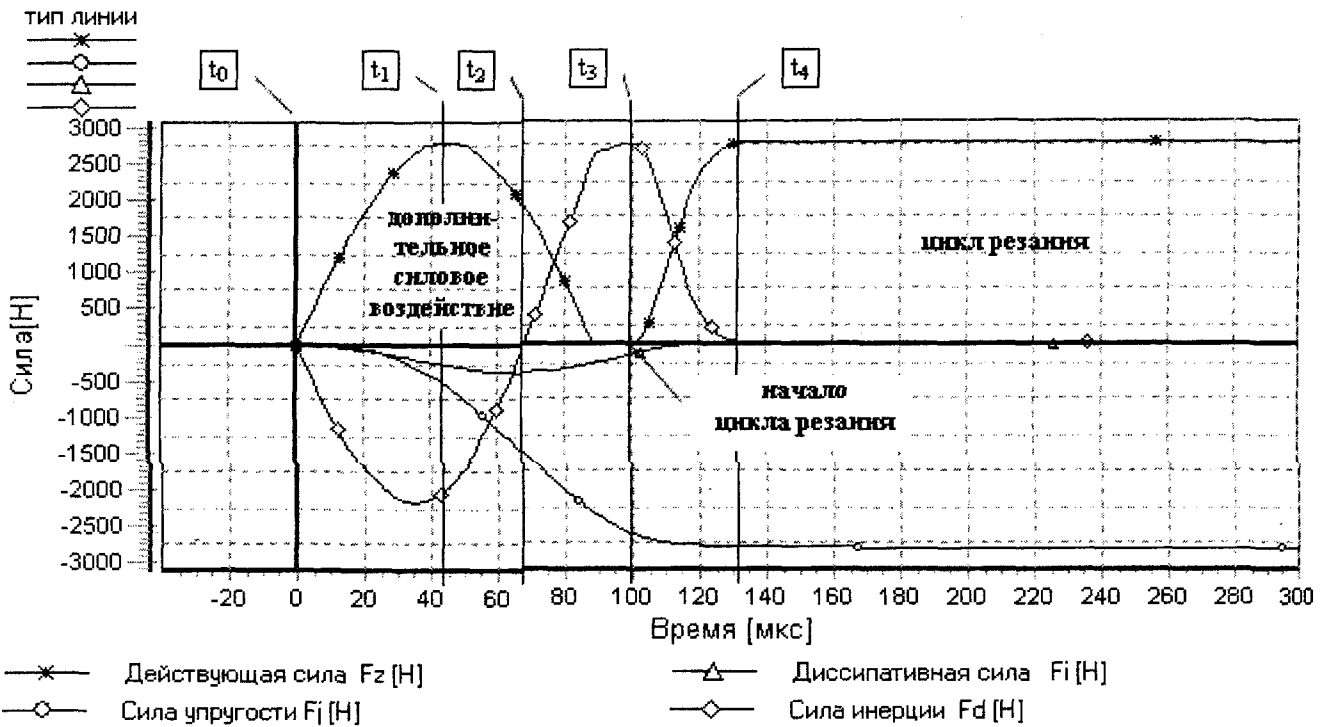


Рис. 6. Временная диаграмма сил

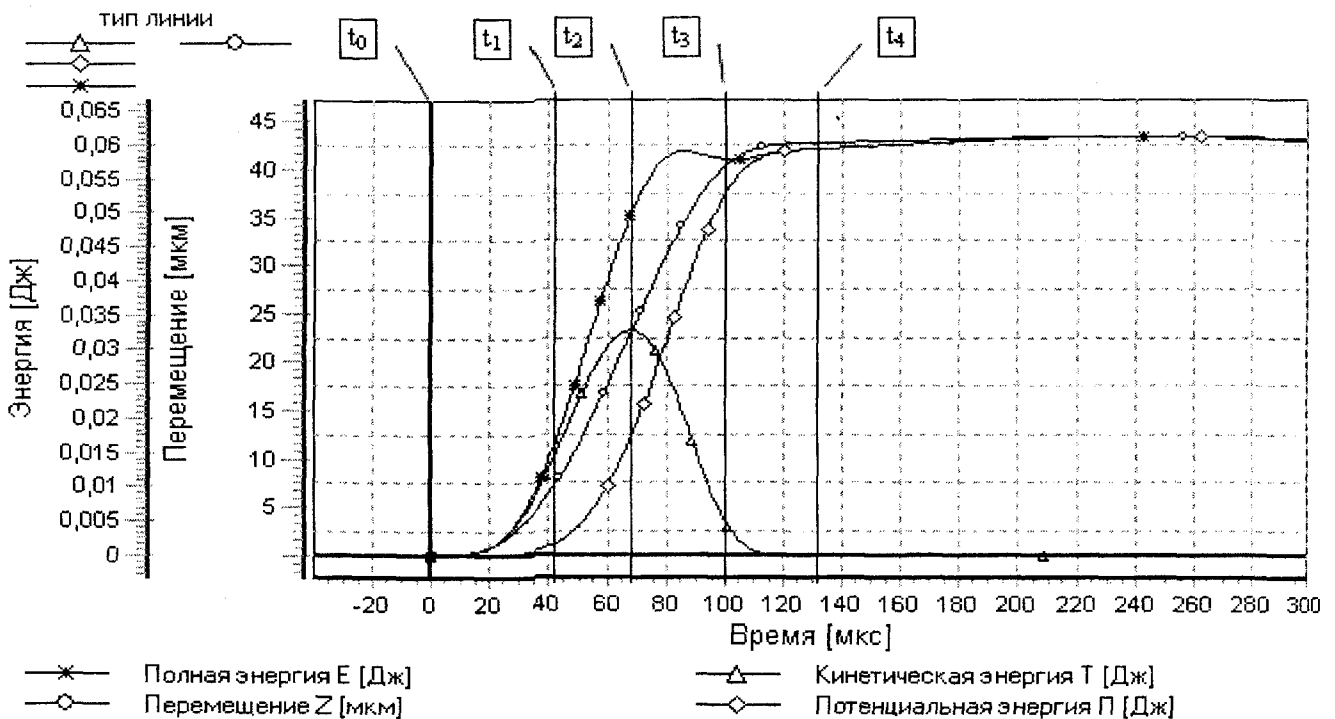


Рис. 7. Временная диаграмма энергии

К моменту времени t_3 значение кинетической энергии близко к нулю, деформация приближается к уровню статического равновесия Z_s (рис. 5), а сила инерции соответствует значению внешней силы при установившемся режиме F_s (рис. 6). Таким образом, к

началу цикла резания состояние системы соответствует приведенным условиям.

Начиная с момента времени t_3 , происходит резкое нарастание действующей силы, в результате чего, сила инерции стремительно идет на спад и, к моменту

времени t_4 , принимает значения, близкие к нулю, а действующая сила и сила упругости достигают значений, соответствующих установившемуся режиму F_4 .

В момент времени t_4 , динамическая система вновь находится в равновесии при противодействии двух сил – действующей силы и силы упругости. При этом кинетическая энергия близка к нулю (рис. 7). Такое состояние свидетельствует о том, что динамическая система пребывает в установившемся режиме.

Как видно из представленных в работе диаграмм, динамическая система при воздействии силой, обусловленной началом цикла резания, без вибраций, перешла в установившийся режим.

Описанный способ может найти широкое применение в процессах прерывистого резания, для повышения стойкости инструмента, оснащенного твердыми сплавами, металло- и минерало-керамикой.

Литература:

1 Зорев Н.Н. Высокопроизводительная обработка стали твердосплавными резцами при прерывистом резании / Н.Н. Зорев, Г.С. Креймер. – М.: Машиз, 1961. – 79 с.
 2 Икава Н. Износ инструмента при прерывистом резании / Н. Икава, Я. Иннами // Сеймицу кикай. – 1973. – Т. 39 – №11. – С.1151-1157.
 3 Куклин Л.Г. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента / Л.Г. Куклин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1968. – 140 с.
 4 Васин Л.А. Виброгасящие режущие инструменты и демпферы. – Тула: ТулГУ, 1994. – 119 с.
 6 Васин Л.А. Конструкции инструмента с бетонными корпусами / Л.А. Васин, С.А. Васин, С.А. Эккерт // Исследование в области инструментального производства и обработки металлов резанием. – Тула: ТулПИ, 1988. – С. 103-108.

УДК 519.652

Д-р техн. наук, проф. Степанов Ю.С., *канд. техн. наук* Барсуков Г.В., *канд. техн. наук* Белкин Е.А., Николаев В.В. (Орловский государственный технический университет)
 Россия, г. Орел, тел. (4862)419818; E-mail: upk@ostu.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

For creation of the automized system engineering surface engineering plants by authors the new method of superficial modelling is developed on the basis of parabolic interpolation surface of the complicated form. Classification modules spatially - complicated surfaces and the tool is put in a basis of a method for their handling on a tensor of Riemann - Christoffel as universal and generalized parameter surface, invariant to a modification of a frame.

Сущность учения об инженерии поверхности заключается в разработке теории научно обоснованного определения формы рабочих поверхностей, их геометрических параметров (макроотклонения, волнистости, шероховатости) и физико-химических свойств, обеспечивающих экономически целесообразную долговечность и безотказность деталей машин и их соединений, также технологического создания таких поверхностей, их контроля, наследования и изменения при работе.

Уникальное сочетание реальных потребностей, стимулов, современных научно-технических средств и достижений инициировали широкомасштабное международное сотрудничество и привлекли в сферу инженерии поверхности большое количество научно-технической интеллигенции. Достаточно сказать, что в за последние годы страны Северной Америки, Западной Европы и Япония инвестировали в исследования и разработки в сфере инженерии поверхности 40 млрд. долл. США, а только в Германии появилось около 1000 новых компаний в сфере инженерии поверхности. В США исследования и разработки в сфере инженерии поверхности относят к *высоким*

технологиям, многие из которых финансируются за счет государственных программ, например, Программа «Методы инженерии поверхности».

Как известно, причина низкого ресурса деталей и других элементов конструкций связана преимущественно с износом трущихся поверхностных слоев. Целенаправленное использование топографии контактирующих поверхностей при конструировании находится в начальной стадии развития, однако это уже используется при создании канавок, где могут безвредно собираться частицы износа, удаляемые с зоны контакта трущихся поверхностей, и создавать структуру для облегчения рабочего хода в цилиндрах ДВС. Ожидается более интенсивное использование конструирования топографии поверхностей по мере развития технологии.

Перспективный путь в решении сложной проблемы оценки влияния геометрических характеристик поверхностного слоя на такие эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений, как контактная жесткость, износостойкость, герметичность, прочность посадок – *создание программного обеспе-*

чения автоматизированной системы инженерии поверхности технических объектов.

Эффективность применения программных комплексов в значительной степени зависит от математических моделей, описывающих как сами поверхностные слои, так и процессы их получения, так как вид обработки влияет на характер штрихов, геометрию и расположения единичных микронеровностей и чистоту поверхности.

Современные системы поверхностного моделирования используют для моделирования кривые и поверхности Безье и NURBS. Как известно, поверхности Безье точно проходят через набор контрольных (управляющих) точек. На этом их достоинства заканчиваются. Эти поверхности не могут точно описывать тела «правильной формы» – например, конус или шар. При изменении геометрии в некоторой локальной области изменяется и глобальная геометрия. Как следствие, возникают изломы и даже разрывы на границе с соседними поверхностями.

В отличие от этого, NURBS-математика позволяет описывать тела «правильной формы». Кроме того, возможны локальные изменения геометрии. Однако это преимущество не дается даром: все контрольные точки NURBS, кроме угловых (в случае непериодических поверхностей), находятся вне поверхности, поэтому их влияние на форму оценить труднее.

Более новая математика использует так называемые *Subdivision surfaces* с различными схемами: *Loop*, *Catmull Clarc*, *Butterfly*, *Dao-Sabin* и др. При этом обеспечивается любая степень гладкости, но поверхности вообще не проходят через полигон контрольных точек! Подобная математика используется в модуле *Imagine&Shape* системы *CATIA V5 R14*, в пакетах *Alias WaveFront* и *Maya*.

Файлы перечисленных коммерческих систем моделирования поверхности имеют внушительные размеры, так как сохраняются в виде огромного количества параметрической и служебной информации о каждом дискретном участке поверхности.

Исходя из специфики решаемой задачи (большой набор динамически изменяемых узловых точек поверхности), выделено следующие основные требования к математической модели: использование простой *малопараметрической модели*, в которой степень поверхностей не выше второй. Более высокая степень дает дополнительную гладкость поверхности, но вместе с тем увеличивает область изменения поверхности при коррекции только одной контрольной точки. Тем самым теряется свойство локальности модификации поверхности, существенно увеличивается время на вычисление и появляется необходимость введение дополнительных контрольных точек.

Для создания автоматизированной системы инженерии поверхности технических объектов авторами разработан новый метод поверхностного моделирования на основе *параболической интерполяции поверхности сложной формы*. В основу метода положена классификация модулей пространственно-сложных поверхностей и инструмента для их обработки по тензору Римана-Кристоффеля как универсального и обобщенного параметра поверхности, инвариантного к

изменению системы координат. Касательная плоскость воспроизводит форму поверхности в окрестности точки касания в первом приближении. Рассчитываемый соприкасающийся параболоид воспроизводит форму поверхности во втором приближении.

Зная кривизну поверхности в точке, нетрудно аналитически рассчитать параметры модуля – соприкасающегося параболоида и аппроксимировать им локальный участок поверхности.

Для определения типа модуля – соприкасающегося параболоида геометрической модели топографии поверхности – используется пять точек. Поверхности модулей пересекаются друг с другом по кривым, т.е. модули не имеют гладкой сшивки. Кривизна соприкасающегося параболоида в данной точке аппроксимируемого рельефа выражается тензором Римана-Кристоффеля (тензором кривизны).

Одним из ключевых моментов расчета является определение коэффициентов наклона касательных к окружностям, проходящих через расчетную точку. Это дает возможность, используя каноническое уравнение главной нормали, определить углы между нормалью и главной нормалью. Далее на основе теоремы Менье рассчитываются параметры соприкасающегося параболоида – главные кривизны параболы в сечении.

При необходимости обеспечения непрерывности первой производной на границах между параболоидами разработан алгоритм сглаживания, использующий модификацию аналитического метода параболы интерполяции. Алгоритм использует построение вспомогательной параболы между вершинами соседних параболоидов и средней точкой на границе и ее линейную комбинацию с соответствующими сечениями параболоидов. Гладкая сшивка параболоидов проводится по осям X и Y , что обеспечивает требуемую непрерывность первых производных.

Локальная интерполяция заданного набора точек параболы кривыми, параметры которых имеют ясный геометрический смысл, позволяет дополнить существующие методы. Численная модель, использующая кривые второго порядка для построения модульной геометрической модели детали на основе поверхностей, образованных поступательно-вращательным движением образующих, снижает требования к возможностям станков с ЧПУ.

Алгоритм численного расчета поверхности микрорельефа представлен на рис. 1.

Разработанный метод поверхностного моделирования на основе параболы интерполяции поверхности сложной формы оперирует всего лишь четырьмя параметрами: параметрами модуля параболы поверхности, координатами начала локальной системы координат параболы и углом поворота осей. Это позволяет в сотни раз уменьшить размеры геометрических файлов, что способствует ускорению процесса моделирования и уменьшает загрузку локальных компьютерных сетей.

Разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющие визуально реализовать полученный алгоритм построения топографии поверхности после резания гидроабразивной струей (рис. 2).

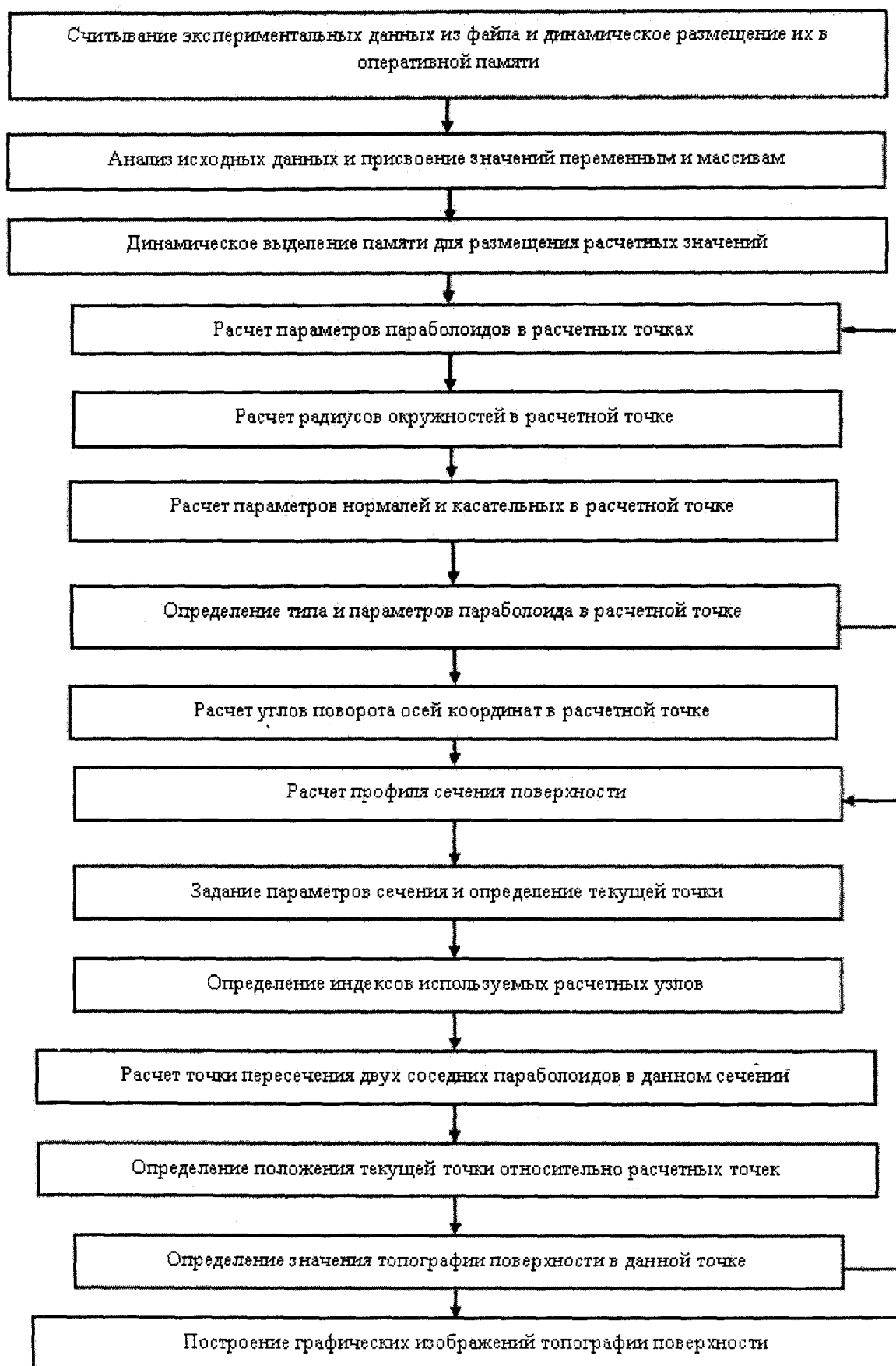


Рис. 1. Алгоритм построения топографии поверхности

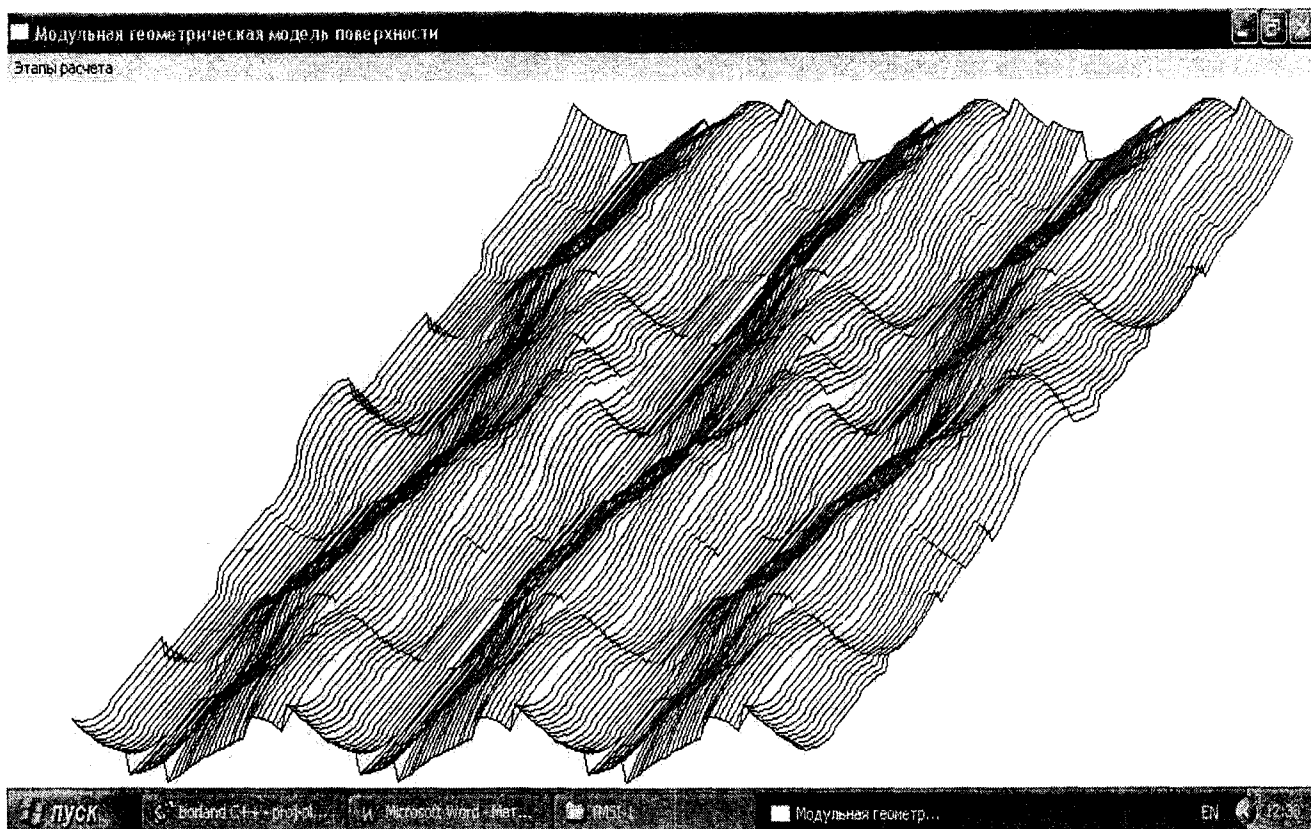


Рис. 2. Компьютерное моделирование топографии микрорельефа

Исследование возможностей программного комплекса, реализующего разработанную численную модель построения поверхностей сложной формы, проводилось для различных видов дискретно заданных поверхностей. Исходная сетка высот рельефа размером $N_x \times N_y$, задавалась числами в вещественном формате, сохраненными в текстовом файле формата TXT. Использование данного способа хранения данных дает возможность непосредственной корректировки задаваемых значений пользователем, а также позволяет решить проблему совместимости форматов представления данных при передаче информации между программами, созданными разными разработчиками. Знаки пробелов, табуляции, конца и перевода строки являются разделителями между числами.

Поскольку при считывании файла программа производит распознавание целых и вещественных чисел, выделяя цифры и знак десятичной точки, допустимы текстовые комментарии.

Количество считанных данных должно соответствовать заданным значениям, в противном случае программа выводит сообщение об ошибке при вводе исходных данных.

Анализ результатов моделирования для различных наборов тестовых данных показал возможность применения разработанной численной модели в производстве для прогнозирования параметров шероховатости поверхности.

Структурно-функциональная схема разработанного вычислительного комплекса, использующего предложенные численные методы параболической

интерполяции дискретно заданных поверхностей и алгоритмы на их основе, представлена на рис. 3.

Развитие новых технологий точной обработки поверхностей технических объектов определяет метод математического моделирования на основе аналитического представления обрабатываемой поверхности.

Математическая модель должна охватывать широкую область обрабатываемых технологических поверхностей. Такую возможность дает применение разработанного метода моделирования. Получение математической модели поверхности сложной формы дает дополнительные возможности для применения вероятностных подходов к описанию процесса формирования поверхности микрорельефа при абразивной обработке. Модель микрорельефа позволяет учесть влияние особенностей применяемого метода обработки на структурные геометрические характеристики поверхностного слоя.

Как логическое продолжение проведенной авторами работы, поставлена и решена задача создания библиотек программ для автоматизированной системы инженерии поверхности технических объектов, способной прогнозировать влияния поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин.

Наличие математической модели микрорельефа позволяет построить профилограмму в любом интересующем сечении и определить параметры шероховатости. Это имеет особое значение для поверхностей с наклонным или перекрещивающимся микрорельефом обработанной поверхности без явно выраженного направления микронеровностей.

Для различных видов микрорельефа можно считать изменение площади опорной поверхности, объема стыкового зазора и срезаемого материала от расстояния между поверхностями. Графическое представление трехмерной модели контакта позволит выявить наличие и форму возникающих масляных карманов.

Работа выполняется в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы по мероприятию 1.9 «Проведение молодыми учеными научных исследований» 2005-РИ-19.0/002/086.

Литература:

1 Степанов Ю.С. Моделирование топографии микрорельефа в пространстве Римана при диагностике поверхностного слоя конструкционных материалов / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.А. Белкин // Контроль. Диагностика, 2001. – № 4. – С. 12-16.

2 Степанов Ю.С. Разработка численного аппарата для оценки шероховатости поверхностного слоя деталей машин / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.А. Белкин, В.В. Николаев // Справочник. Инженерный журнал, 2003. – №9. – С. 61-64.

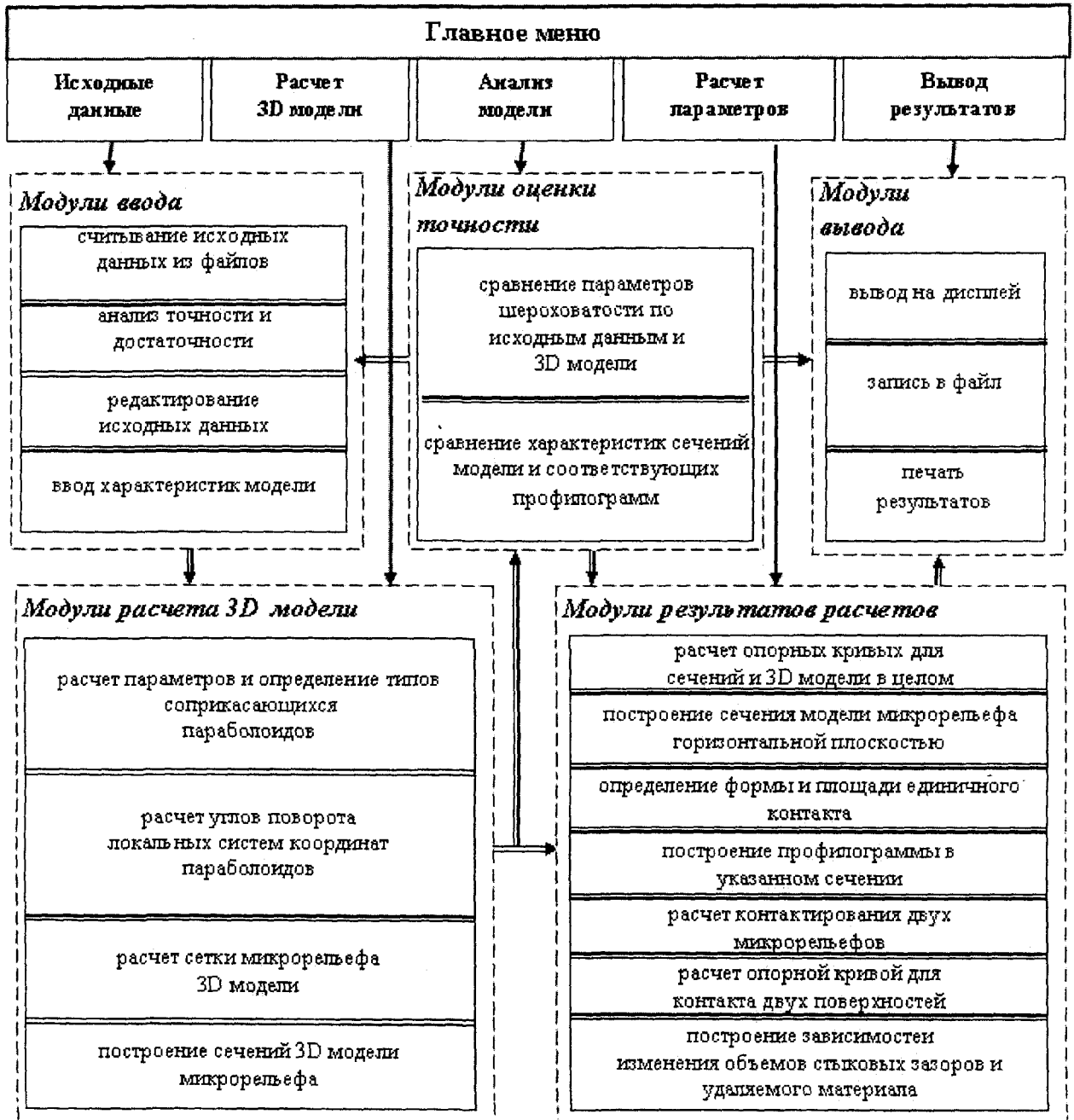


Рис. 3. Структурно-функциональная схема автоматизированной системы инженерии поверхности технических объектов

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. Киричек А.В., ст. преп. Звягина Е.А.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419877; E-mail: tmsi@mail.ostu.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ НАНЕСЕНИЯ ЭПИЛАМОВ

The article is containing the description of perspective and the completely not learning method of rise the firmness the cutting instruments. The search of effective this method by the different regime of processing materials is show.

Стойкость режущего инструмента – один из факторов, определяющих экономические показатели механической обработки, поэтому повышение работоспособности режущего инструмента (периода стойкости, надежности, производительности) является важной задачей, стоящей перед современным машиностроением. Одним из перспективных путей повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента является нанесение на его рабочую поверхность фторсодержащих поверхностно-активных веществ – эпиламов.

В ходе экспериментальных исследований эксплуатационных свойств режущего инструмента с тонкопленочным полимерным покрытием (резцы, сверла, метчики, концевые фрезы, ножовочные полотна и др.), контактных характеристик процесса резания было установлено, что эпиламирование способствует снижению составляющих усилий резания на 5-20%, температуры в зоне контакта до 70-80 °С, интенсивности развития очагов износа передней и задней поверхностей инструмента, затормаживает диффузионные процессы на участке пластического контакта и т.д., что в целом позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5 и более раз [1-4]. Несмотря на положительные результаты испытаний, метод не находит должного применения в производстве в связи с отсутствием в технической литературе рекомендаций по эксплуатации и обслуживанию эпиламированного инструмента с учетом особенностей свойств и поведения эпиламов в процессе работы.

Исследования эксплуатационных свойств эпилама и работоспособности эпиламированного режущего инструмента показывают, что оптимальные параметры эксплуатации тонкопленочных полимерных покрытий находятся в достаточно ограниченной области значений скорости скольжения и температуры поверхностей трения и ограничиваются температурой термостойкости эпилама и температурой, обеспечивающей требуемый уровень процессов поверхностного массопереноса молекул полимерного покрытия; изнашивание пленок практически линейно

возрастает при увеличении пути трения и зависит от температуры T в зоне контакта; на служебные характеристики эпиламированных поверхностей оказывают влияние температурно-временные режимы нанесения и фиксации покрытий [2, 4-6].

Задачей настоящей работы является установление оптимальных режимов эксплуатации быстрорежущих сверл с тонкопленочным полимерным покрытием и выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность пленок эпилама в процессе сверления.

При разработке многофакторной модели процесса резания эпиламированным инструментом выбор числа факторов осуществлялся по значимости их влияния на период стойкости осевого инструмента и эксплуатационных свойств эпиламосодержащих покрытий. Для получения функциональной зависимости стойкости быстрорежущих сверл с покрытием от режимов резания варьировались подача s (фактор X_1) и частота вращения шпинделя n (скорость резания v) (фактор X_2), с учетом свойств эпиламов – глубина (длина) сверления h (фактор X_3). Выбраны следующие уровни изменения факторов: $X_1 = 0,56$ мм/об – на верхнем уровне и $X_1 = 0,28$ об/мин – на нижнем; $X_2 = 1000$ и $X_2 = 500$ об/мин; $X_3 = 10$ и $X_3 = 50$ мм соответственно.

Линейная модель стойкости эпиламированного инструмента имеет вид:

$$Y(T) = b_0 \cdot X_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3, \quad (1)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты уравнения регрессии.

Экспериментальные результаты были получены при сверлении отверстий $\varnothing 8,5$ мм в заготовках из серого чугуна СЧ 20 ГОСТ 1412-80 эпиламированными спиральными сверлами ГОСТ 10902-77 из быстрорежущей стали Р6М5. Эпиламирование инструмента осуществлялось с применением эпилама марки 6СФК – 180 – 05 (СК) в следующей последовательности:

– очистка поверхностей инструмента в обезжиривающих веществах для удаления парафина, смазочных материалов с периодической сушкой в сушиль-

ном шкафу для полного удаления с поверхностей обезжиривающих веществ и следов влаги;

– холодное эпиламирование (18-25°C) методом окунания;

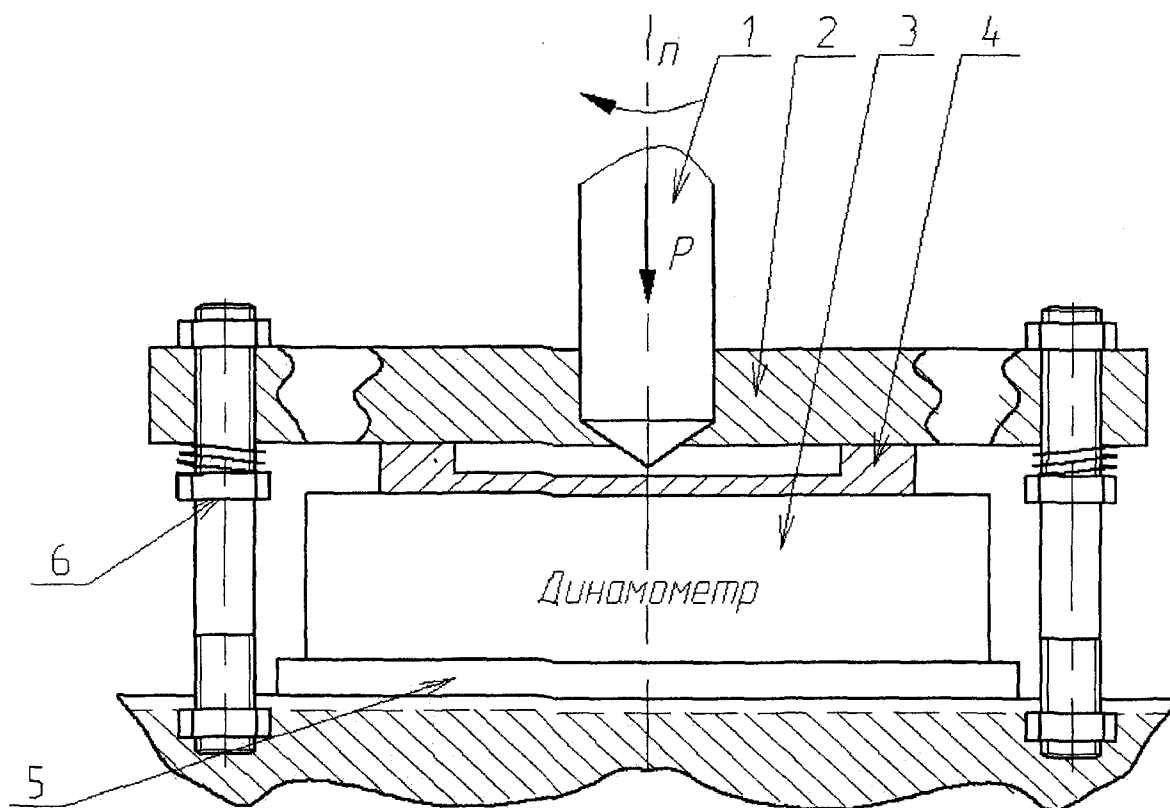
– сушка в шкафу для фиксации покрытия.

Стойкостные испытания сверл с покрытием выполнялись на вертикально-сверлильном станке модели 2Н125. Критерием затупления сверл при обработке чугуна принят износ по углам h_z , равный 0,8 мм.

Расчеты по определению периода стойкости эпиламированных сверл и сверл без покрытия, работающих в таких же условиях, показывают увеличение периода стойкости инструмента 1,5-1,8 раза.

С целью сокращения количества дорогостоящих экспериментальных исследований для установления

зависимости износа эпиламированных рабочих поверхностей сверл от скорости резания v при обработке различных материалов, глубины обрабатываемого отверстия h и технологии нанесения эпиламосодержащих покрытий разработана методика трибологических испытаний эпиламированных образцов с использованием установки (рис. 1), которая максимально приближает условия экспериментальных исследований к процессу сверления. Монтаж установки на вертикально-сверлильном станке позволит получить картину состояния тонкопленочных полимерных покрытий на образцах из быстрорежущей стали при разной частоте вращения шпинделя, глубине отверстия и отработать оптимальную технологию нанесения покрытий.



1 – образец для испытаний; 2 – заготовка; 3 – динамометр; 4 – стакан; 5 – плита; 6 – шпилька

Рис. 1. Схема установки для трибологических испытаний эпиламированных образцов

Литература:

1 Потеха В.Л. Эпиламирование режущего инструмента / В.Л. Потеха, И.С. Напрев [и др.] // Электрическая и тепловая тяга, 1990, – №10 – С. 31.

2 Табаков В.П. Повышение работоспособности инструмента из быстрорежущей стали / В.П. Табаков, Ю.Н. Николаев, С.А. Журавский // Физикохимия процесса резания металлов. Межвузовский сб. науч. тр. – Чебоксары: ЧГУ, 1986. – С. 51-55.

3 Гулянский Л.Г. Применение эпиламирования для повышения износостойкости изделий / Трение и износ, 1992. – Т. 13. – №4. – С. 695-701.

4 Потеха В.Л. Теоретико-экспериментальная оценка оптимальных условий эксплуатации эпиламированных трибосопряжений машин / В.Л. Потеха, А.В. Рогачев, И.С. Напрев // Трение и износ, 1996. – Т. 17. – №6. – С. 764-768.

5 Напрев И.С. Управление трибологическими характеристиками подшипниковых узлов методом эпиламирования. – Автореферат дисс... канд. техн. наук. М.: 1999.

6 Харченко М.И. Повышение послеремонтного ресурса деталей автомобильных двигателей (на примере 3МЗ – 53) эпиламированием и ФАБО-эпиламированием. – Дисс... канд. техн. наук: М.: 2002, 180 с.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ
И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 681.5.08; 681.5.001.4; 004/681.2.08

Д-р техн. наук, проф. Радченко С.Ю., *асп.* Александров Д.В., *асп.* Иоэль А.Б.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ДЛЯ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ

In this article are consider the influence of system the control of quality on the minimization the defects in the persistent the chains of industry without the intermediate operation works.

В многопереходном цикле производства скорости обработки таковы, что возникновение брака на промежуточных операциях вызывает большие экономические потери. В связи с этим необходимо применять средства автоматизации контроля качества продукции. Экономический эффект достигается за счет минимизации брака и получения дополнительных комплектов сборников, составленных из продукции различных партий с известными отклонениями в геометрических параметрах, путем учета этих отклонений в базе данных [1, 2].

В задачи построения подобных систем входят:

- разработка структуры системы и ее программного обеспечения;
- построение базы данных (БД);
- формирование алгоритмов функционирования системы;
- обеспечение связи между БД и пользовательской средой с возможностью администрирования БД.

На рис. 1 изображена схема линии по производству металлокорда, состоящая из нескольких участков:

- 1) участок грубого волочения;
- 2) участок среднего волочения;
- 3) участок латунирования;
- 4) участок тонкого волочения;
- 5) канатный участок;
- 6) участок линии инспекции.

Вся информация с участков стекается в БД системы контроля качества, затем производится автоматический анализ информации и выработка решений.

Данная схема содержит недостатки, т.к. она не позволяет определить брак на промежуточных участках. Возможность возникновения брака велика, и некоторый брак может быть исправлен на более ранних участках, а не в конце производственного цикла, как показано на рис. 1 (линия инспекции). Брак, выявленный на промежуточных стадиях производственного цикла, может быть устранимым и неустранимым. Устранимый брак может быть вызван выходом из строя оборудования (например, волокна), следовательно, бракованное изделие может быть возвращено на более раннюю стадию производства, а значит, брак будет исправлен (рис. 2). Такой подход к контролю качества также повышает долговечность оборудования, т.к.

бракованное изделие на следующей стадии обработки может привести к аварии (если вышла из строя волока на грубом волочении, то на среднее волочение проволока придет с диаметром, большим допустимого).

Автоматическая система контроля качества, включает в себя также часть функций автоматизации документооборота и управления производственными линиями. В случае обнаружении брака на производственном участке система вырабатывает соответствующие команды для исправления неполадок, а также отражает документально это событие. Система также ведет учет продукции и материалов, собирает информацию о параметрах процессов и изделий на всех участках производства [1].

Основной целью работы является разработка системы контроля качества для многопереходных производственных циклов. Преимуществами такой системы являются:

- 1) учет материала;
- 2) обеспечение качества продукции;
- 3) повышение культуры производства и трудовой дисциплины;
- 4) преимущества новых технологий при разработке систем позволят с легкостью наращивать функциональность и добавлять новые модули;
- 5) сортировка брака.

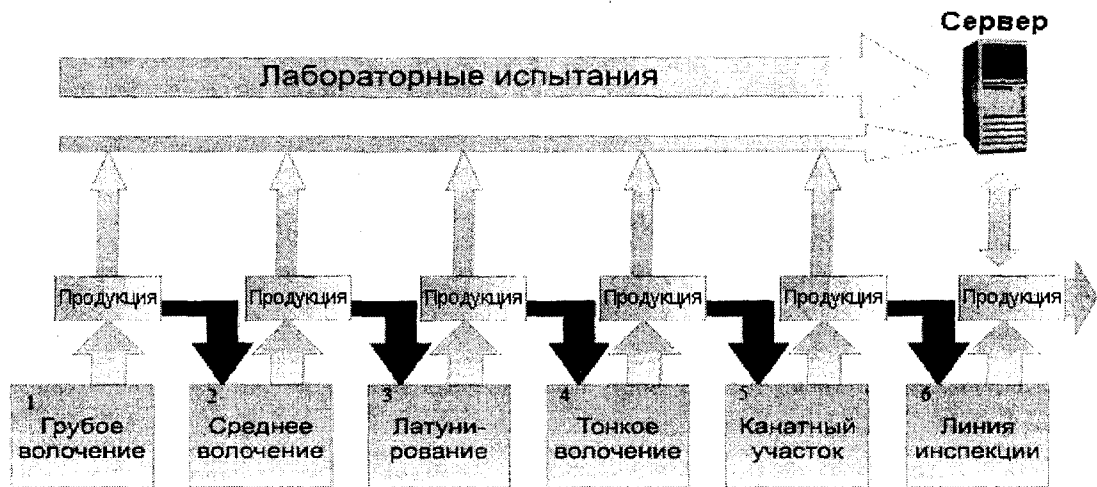
Для системы контроля качества необходимо разработать соответствующее программное обеспечение, включающего в себя БД и графическую оболочку, разделяющую операторов, контролеров и администраторов. Основной задачей является создание системы управления БД, т.к. все выполняемые функции системы связаны со сбором и обработкой информации, поступающей с производственных участков. На основании анализа полученной информации происходит выработка действий, направленных на поддержание штатного режима производства, а также аварийное отключение оборудования, вызванного его неправильным функционированием (например, выход значений параметров выпускаемой продукции за допускаемые пределы) [2, 3].

Следующей задачей является разработка графической оболочки системы. Графическая оболочка служит для упрощения ввода в систему необходимой

информации и удобного доступа к интересующей нас в данный момент информации, а также для формирования экранных форм и бланков. Графическая обо-

лочка является интерфейсом пользователя, доступ которого ограничен в зависимости от того, какими правами он обладает.

Потоки информации в структуре контроля качества



1 – участок грубого волочения; 2 – участок среднего волочения; 3 – участок латунирования; 4 – участок тонкого волочения; 5 – канатный участок; 6 – участок линии инспекции

Рис. 1. Схема линии производства металлокорда

Структура производства

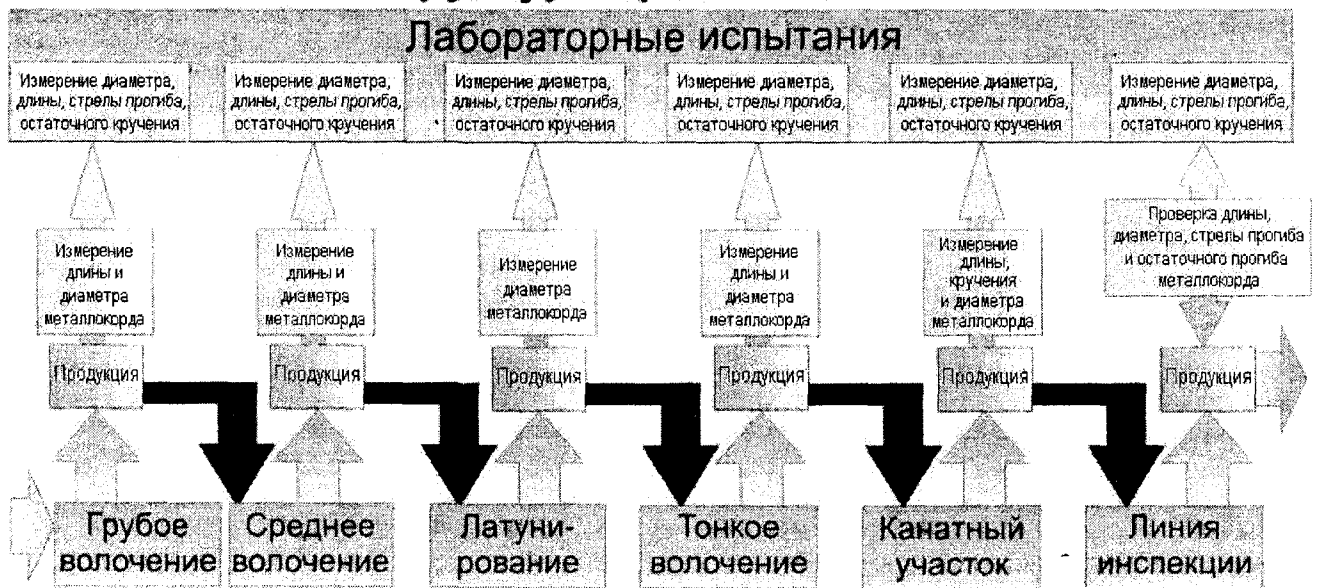


Рис. 2. Предлагаемая схема линии производства металлокорда

Вывод: предложенная в работе система контроля качества позволяет существенно повысить эффективность производства и позволяет добиться:

- повышения процента выхода годной продукции, за счет контроля параметров полуфабриката на всех участках в режиме реального времени и сигнализации о выходе этих параметров за указанные пределы;
- эффективного и всеобъемлющего учета продукции и материалов, за счет внесения в базу данных системы информации обо всех используемых материалах, их характеристиках, а также параметрах обрабатываемых деталей на всех производственных участках;

- повышения комфорта и безопасности работы персонала за счет снижения времени его пребывания вблизи технологического оборудования.

Литература:

- 1 Фейгенбаум А. Контроль качества продукции. – М.: Мир, 1994.
- 2 Мхитарян В.С. Статистические методы в управлении качеством продукции. – М.: Финансы и статистика, 1982.
- 3 Гличев А.В. Управление качеством продукции / А.В. Гличев, М.И. Круглов. – М.: Экономика, 1979.

УДК 378.141.4:62

Канд. техн. наук, проф. Козлова Л. Д.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

О РОЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ В ФОРМИРОВАНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ ИНЖЕНЕРА

Technological provision of product creation is an obligatory condition in designing and production of competitive goods. Tasks of forming of specialists' competence formulated in the sphere of modern technologies of production.

В общей характеристике направления подготовки дипломированного специалиста «Приборостроение» определены виды его профессиональной деятельности: проектно-конструкторская, производственно-технологическая, научно-исследовательская, организационно-управленческая.

Для выпускников, которые будут заняты производственно-технологической деятельностью (специальность 191000 – «Технология приборостроения») необходимость основательной углубленной технологической подготовки очевидна. Возникает вопрос, оправдано ли уменьшение дисциплин технологического цикла и их объема в образовательных программах подготовки специалистов, которые будут работать в проектно-конструкторских организациях, в системах управления качеством, в службах надежности, испытательных центрах и других организациях, не имеющих своей прямой задачей технологическое проектирование или сопровождение производства изделий. Ответ на этот вопрос можно найти, внимательно изучив государственные стандарты, регламентирующие технологическое обеспечение создания продукции.

Важнейшим условием успеха разработчиков новой продукции является ее конкурентоспособность, которая характеризуется ценой потребления и степенью соответствия нового изделия конкретным потребностям. Основные потребительские свойства изделия: технический и эстетико-эргономический уровни, надежность и безопасность оцениваются потребителем и всегда находятся в поле зрения разработчиков новой продукции. Что касается цены потребления, то она формируется не только на стадии проектирования, но и в процессе производства. Именно здесь проявляются свойства изделия, которые не оцениваются потребителем, но определяют цену потребления. К ним относится, прежде всего, такое комплексное свойство нового изделия, как технологичность и ее грани: технологическая рациональность, конструктивно-технологическая преемственность, материал- и энергоемкость.

Целью технологического обеспечения создания продукции (ТО) является формирование организационно-методической основы технологического обес-

печения разработки, подготовки и освоение продукции требуемого уровня качества, надежности и оптимальной стоимости в условиях повышения сложности и быстрой сменяемости новых поколений техники (ГОСТ Р 50995.01-96). В основу системы ТО положены следующие принципы: конструкторские, технологические и производственные характеристики продукции рассматриваются как равнозначные составляющие при формировании решения по разработке и производству продукции. Конструкторская и технологическая части проектных конструкторских документов на всех этапах проектирования нового изделия рассматриваются как равнозначные.

Разработка продукции предполагает алгоритм, при котором для каждого варианта конструкции по критериям затрат, качества и надежности определяют вариант технологии и на этой основе формируют альтернативные конструкторско-технологические варианты. Из этих вариантов выбирают тот, который обеспечивает заданный уровень качества при оптимальных затратах.

Технологическое обеспечение создания продукции – технологическая часть работ по созданию новых изделий, которые выполняются предприятием разработчиком и изготовителем совместно на всех стадиях разработки и постановки продукции на производство. На стадии маркетинговых исследований определяется прогноз развития не только конструкции изделия, но и технологии его производства. При этом выявляются, группируются и ранжируются конструкторские и технологические проблемы, связанные с созданием нового конкурентоспособного изделия. Разработчиком изучаются перспективные конструкторско-технологические решения, которые могут являться научно-техническим заделом для разработки новой продукции.

Результаты прогнозирования и оценки технологической реализуемости нового изделия используются для формирования определяющих технологических и организационных решений по технологическому перевооружению производственной и технологической баз, а также для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на решение выявленных конструкторско-технологических

проблем, связанных с конструированием и технологией изготовления нового изделия.

На стадии проектирования и разработки конкурентоспособной продукции основными задачами ТО являются:

- обеспечение проектирования технологичной продукции;
- сокращение сроков и материальных затрат на ее разработку и постановку на производство;
- обеспечение своевременной технологической готовности производства к изготовлению продукции в соответствии с требованиями конкретного заказчика (потребителя) или рынка данного вида продукции; этот этап ТО представляет собой технологическую подготовку производства (ТПП).

На стадии ТПП разработчик новой продукции должен принимать участие в оценке определяющих технологических решений наряду с привлекаемыми специализированными технологическими организациями. Кроме того, разработчик должен принимать участие в оценке технологической готовности производства к изготовлению изделий для приемочных испытаний и в передаче отработанной по результатам результата испытаний конструкторской и технологической документации изготовителю серийных изделий [ГОСТ Р 50995.3.1-96].

В общем случае технологическая проработка на этапах проектирования предусматривает, прежде всего, оценку сформированных при проектировании конструкторско-технологических решений с точки зрения их технологичности, реализуемости в производстве и конкурентоспособности, возможности вторичного использования, утилизации или уничтожения изделий и отходов его производства, а также соответствия требованиям ресурсосбережения, экологии и охраны труда. Кроме того, на этапе проектирования задачами технологического обеспечения являются:

- укрупненная оценка контроле-пригодности изделия и процессов его изготовления, параметров и методов диагностирования;
- укрупненная оценка материалоемкости, трудоемкости, себестоимости разрабатываемого изделия;
- выявление требований к организационно-техническому уровню производства у изготовителя.

Именно разработчик на основе результатов технологической проработки проектной конструкторской документации и выполнения научно-исследовательских и опытно-технологических работ должен формировать и уточнять определяющие технологические и организационные решения по производству нового изделия, в частности:

- предложения по использованию изобретений и патентов в области технологии и материалов;
- перечень определяющих технологических процессов, средств технологического оснащения и технологических материалов;

– предложения по обеспечению стабильности технологических процессов;

– предложения по сертификации производства, по обеспечению требований ресурсосбережения, экологии и охраны труда;

– предложения по обеспечению контроле-пригодности изделия, а также контроле-пригодности и управляемости технологических процессов.

Исходя из этих положений государственного стандарта, можно утверждать, что на всех этапах создания новых изделий необходимо взаимодействие разработчиков и изготовителей продукции с привлечением специалистов: технологов, материаловедов, экологов, организаторов производства, экономистов. Это идеальная схема взаимодействия различных структур в силу объективных и субъективных причин реализуется далеко не полностью. Новые изделия, как известно, могут разрабатываться по третьей модели организации работ (ГОСТ 15.201-2000). Это так называемая, инициативная разработка без конкретного заказчика при коммерческом риске разработчика и зачастую с неопределенным еще изготовителем. Кроме того, в организациях-разработчиках в настоящее время, как правило, отсутствуют технологические подразделения с квалифицированными специалистами, обладающими достаточным опытом для выполнения задач технологического обеспечения разработки новых изделий, и опыт привлечения специализированных технологических организаций к решению указанных задач.

Следовательно, значительную часть работ, связанных с технологическим обеспечением создания продукции на стадии ее проектирования и постановки на производство, должны выполнять сами разработчики. Справиться с решением этих задач могут только хорошо подготовленные в области технологии и организации производства инженеры-конструкторы, инженеры-исследователи, инженеры-менеджеры и инженеры по качеству.

Отсюда можно сделать вывод, что профессиональная компетентность выпускников, обучающихся по направлению 653700 «Приборостроение», может быть сформирована в процессе реализации образовательных программ, содержащих полный цикл технологических дисциплин. Технологические дисциплины должны быть представлены в достаточном объеме в блоках общепрофессиональных и специальных дисциплин и таким образом, чтобы в сочетании с производственной практикой их изучение обеспечивало бы качественную и непрерывную технологическую подготовку на протяжении всех лет обучения в вузе. Технологический раздел в структуре итоговой аттестационной работы должен занимать важное место и подтверждать компетенцию выпускника в области технологии производства изделий, а, значит, и требуемый уровень его общей профессиональной культуры.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

УДК 338.1

Канд. экон. наук Степанова Е.Ю.
(Орловский государственный технический университет)
Россия, г. Орел, тел. (4862)416684, E-mail: upk@ostu.ru

ЭКОНОМИКА РОССИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ
РАЗВИТИЯ

In this paper there are considered main trends of the world economy development and the economic system of Russia: globalism, regionalism, integration and international cooperation, a steadily imminent demographic problem, an international competition in the realm of science and fight for talents, a transition to the model of the sustainable development of the civilization, a transition to the innovative economy – economy of knowledge.

Мировое экономическое пространство, все мировое хозяйство находится под влиянием объективных общественных процессов, среди которых определяющими являются глобализация, регионализация, интеграционное и международное сотрудничество, международная конкуренция, переход к инновационной экономике [1, 2].

Технологическая и информационная революция способствовали развитию процессов глобализации. Они ускорили темпы развития мирового сообщества, сделали доступными многие мировые информационные ресурсы, одновременно ужесточая конкуренцию в каждой, отдельно взятой стране, между государствами и целыми регионами.

Под влиянием этих процессов происходят изменения в экономике и в социуме планеты, которые охватывают все: человеческое общество, континенты, страны и регионы, транснациональные корпорации и малые предприятия, оказывая сильное влияние как на отдельную производственную структуру в целом, так и на каждого ее работника.

Унифицируются образовательное и экономическое пространство, в мировом сообществе формируются новые образы жизни и поведения, мотивации и устремления, происходят изменения техники и технологий, образования и культуры, ценностных установок и многих других факторов развития.

Формируется новая среда конкуренции, для которой нет границ, таможи, государственных надстроек, где доминирует культура транснациональных супер- или мегакорпораций [3].

Всемирная «паутина» и новые виды телекоммуникаций определяют переход к принципиально новой парадигме экономического развития, возникновению человека, получающего основную информацию из Интернета, становление новой экономики, вырастающей на новой информационной основе. Буквально на глазах возникают целые отрасли, обслуживающие новые запросы потребителей и при-

влекающие астрономические финансовые ресурсы. Но этот новый вид потребителей осуществляют выбор товара и услуг посредством сверхмощных поисковых систем, принося большую неопределенность для производителя товара или услуги.

Электронные платежи, продажи, биржи, банкоматы и т.д. становятся рядовой, обыденной операцией, а понятия «информационная экономика», «информационная индустрия», «информационные ресурсы», «ресурсные центры», «электронная экономика», «электронный бизнес» и другие, подобные им понятия, в настоящее время доступны практически любому молодому человеку.

Параллельно с этими процессами развивается криминал в области высоких и информационных технологий, неизвестный совсем недавно нигде на планете; создаются управления по борьбе с криминалом, например, управления «К», новые технологии, методы и способы и т.д.

Известно [4], что в промышленной революции ведущую роль играли инженерно-технические работники, так называемые «синие воротнички», затем ведущую роль стали играть менеджеры и офисные работники – «белые воротнички», а в новом веке на первые роли все более определенно выходят специалисты в сферах высокоинтеллектуального творческого инновационного труда: информатики, менеджмента, изобретательства – «золотые воротнички». Мы уже сейчас наблюдаем «бум» на высококвалифицированных программистов, системотехников во всем мире, в том числе и у нас в стране.

Глобализация обуславливает рост взаимосвязей и взаимозависимости национальных экономических систем друг от друга. Вероятность глобальных финансовых, социальных и техногенных кризисов становится все более и более вероятной. Например, взрывы на химических заводах в Китае могут привести к страшным экологическим последствиям в России, что наблюдается в настоящее время на Даль-

нем Востоке. Невозможно предсказать полностью дальние последствия таких катаклизмов.

Поэтому, приспособляясь к условиям эпохи глобализации, экономика не только должна, но и вынуждена вырабатывать новые стратегии своего функционирования.

Еще одной характерной чертой современного мирового развития является переход ведущих стран к новому этапу формирования инновационного общества – построению экономики, базирующейся преимущественно на генерации, использовании и распространении знаний. Уникальные навыки и способности, умение адаптировать их к постоянно меняющимся условиям деятельности, высокая квалификация становятся ведущим производственным ресурсом и основным источником экономического роста. Инвестиции в интеллектуальный, человеческий капитал становятся наиболее эффективным вложением средств. Нематериальные активы занимают все большую долю в средствах фирм и корпораций.

Уже сейчас экономический рост государств обеспечивается ведущей ролью научно-технического прогресса и интеллектуализацией основных составляющих производства во всех сферах экономики. На долю новых идей, новых знаний, воплощенных в усовершенствованные технологии, продукцию, оборудование в промышленно развитых странах приходится от 70 до 85% и более прироста валового внутреннего продукта (ВВП). Все эти страны широко используют инновационный путь развития как эффективное средство преодоления кризисных явлений, реструктуризации производства, приоритетной поддержки конкурентоспособной продукции, формирования рынка высоких технологий, овладения механизмом их реализации.

Образование превращается в одну из самых высокоэффективных сфер, которая определяет перспективы экономического и культурного развития любой страны, а интенсивность инновационной деятельности сегодня во многом отражается на уровне экономического развития. В глобальной экономической конкуренции выигрывают только те страны, которые обеспечивают благоприятные условия для инновационной деятельности. Подтверждение этому дает анализ мировой экономики, который показывает устойчивую тенденцию опережающего роста наукоемкой, высокотехнологичной продукции. На мировом рынке ежегодно продается высокотехнологичной продукции на сумму 2,3 триллиона долларов [5]. Причем доля подобной продукции США составляет – 39 % от этой суммы, Японии – 30 %, Германии – 16 %, России – 1 %, что объясняется отставанием в инновационной сфере. Эти цифры говорят сами за себя и показывают, в каком направлении нам надо работать.

По мнению аналитиков, уровень интеллектуального развития определяет границы между странами-лидерами и странами – аутсайдерами. Поэтому последние решения президента страны по поддержке науки и образования чрезвычайно важны и актуальны.

Резкое кардинальное реформирование социально-экономической системы России, обусловленное переходом к рыночным отношениям, поставило перед нашим обществом множество сложнейших, болезненных и противоречивых проблем. Российская экономика непрерывно изменяется, характеризуется динамической неустойчивостью и неоднородностью условий развития. Она уже стала частью глобального мирового рынка, хотя еще и не в полной мере.

Жесткая, а очень часто и жестокая конкуренция на внутреннем рынке, постоянно изменяющаяся его конъюнктура, уплотнение участников рынка, серьезное увеличивающееся давление со стороны зарубежных компаний, вытесняющих отечественного производителя из-за низкой конкурентоспособности товаров, требуют совершенно иного подхода к оптимизации организационных структур управления. В обостряющейся конкурентной борьбе даже крупные, финансово мощные компании вынуждены проводить качественные изменения в методах и моделях управления, чтобы успеть адаптироваться к постоянно меняющимся условиям внешней среды.

В настоящее время среди конкурентоспособности продукции цена уже не доминирует. Потребительские свойства продукции (функциональность и дизайн, надежность и долговечность, экономичность и безопасность) и уровень сервиса выходят на лидирующие позиции. Чтобы их обеспечить, требуется внедрение новых технологий, что позволяет делать машины и оборудование более производительными, простыми в управлении и безопасными. Они становятся более мощными, компактными, легкими, более удобными в работе. Передовые фирмы внимательно отслеживают все самые последние и значимые новинки на мировых рынках, тратят миллиарды долларов на создание инноваций. Глобальная конкуренция движет окружающий мир, не давая ему стоять на месте. Российские компании должны учитывать ускорение протекания экономических процессов. Запоздалая реакция на изменение внешней среды может привести их к гибели.

Наблюдается устойчивая мировая тенденция перехода капитала на новый качественный уровень. Его господствующей формой становится корпоративный капитал, который развивается на основе интеллектуального капитала. Формирование и усиление корпоративных структур является одной из доминирующих тенденций развития экономики. Корпорации становятся фундаментом экономической системы. Влияние корпоративной формы организации бизнес-процессов на развитие мировой экономической системы сложно переоценить. На долю корпораций, например, в США [6] приходится, по разным оценкам, от 55 до 60 % ВВП, в них занято 45 % рабочей силы и направляется до 60 % ежегодного объема инвестиций. Более 25 % международного производства контролируется 600 компаниями.

Повсеместно активизируются интеграционные процессы, дающие синергетические эффекты за счет

координации усилий государства и бизнеса, науки и промышленности, науки и образования [5].

В России также отмечается тенденция к укрупнению и глобализации производств. Причем в ближайшие годы прогнозируется дальнейший рост концентрации промышленного производства в крупных корпорациях, формирование транснациональных суперкорпораций, появление всевозможных объединений и возникновение новых организационных структур управления на основе альянсов компаний.

Перед российской экономикой сегодня стоит задача в самые короткие сроки воссоздать технологически взаимосвязанные цепочки производства, разрушенные в процессе социально-экономических преобразований в стране, объединенные единой системой управления. Опыт развитых стран показывает, что концентрация капитала и производственных мощностей, их интеграция по вертикальному технологическому принципу является практически единственным путем, который может привести к становлению конкурентоспособных промышленных структур. Россия не стала в этом ряду исключением.

Ныне стремление современного российского бизнеса к вертикальной интеграции является ярко выраженной тенденцией в его развитии. Такая интеграция повышает эффективность производства за счет снижения транзакционных издержек, уменьшения косвенного налогообложения промежуточных продуктов производства. Высокая ликвидность продукции, значительные основные фонды и конкурентоспособность производства служат гарантиями того, что иностранные инвесторы рассматривают вертикально интегрированные структуры как надежного партнера, проекты которого можно уверенно финансировать. В свою очередь, вертикально интегрированные структуры способны обеспечить этим инвестициям должную отдачу.

Под контролем финансово-промышленных групп (ФПГ), вертикально-интегрированных корпораций и естественных монополий сейчас в нашей стране находится до 70-80 % всех финансовых и товарных потоков страны, ими обеспечивается значительная часть налоговых и иных поступлений в бюджет и, по нашему мнению, выживание, сохранение отечественной технологической среды, а, в перспективе, развитие промышленно-технологического потенциала страны. Поэтому уйти сегодня от иерархических структур в России объективно нельзя. Вертикальная интеграция – это единственный ныне путь для российской промышленности.

Конечно, вертикально интегрированные промышленные структуры не лишены недостатков. Но этот вопрос не рассматривается в этой работе. Отметим, что на данном этапе развития экономики России преимущества вертикальной интеграции намного перекрывают ее недостатки.

Вместе с тем, интеграционные процессы наблюдаются и в мегамишасштабах.

Поэтому не случайно сегодня в ряде регионов мира для более эффективного использования национальных ресурсов и в какой-то степени противостояния высокоиндустриальным, экономически развитым странам создаются мощные корпоративные объединения, интегрирующие активы и силы многих предприятий, в том числе и разных стран, обеспечивающих конкурентоспособность выпускаемой продукции и проникновение на мировые рынки.

В региональной интеграции видят путь к развитию своей экономики и укреплению международных позиций не только малые страны, но и крупные державы. Сейчас в мире насчитываются уже более десятка крупных объединений суверенных государств и 85 региональных соглашений. Среди них исторически первым, создающимся на протяжении последних 45 лет, является Евросоюз. Набирает силу и постепенно меняет вектор притяжения азиатско-тихоокеанский регион, где проживает большая часть населения планеты.

Интересной тенденцией мирового развития экономики является все больший поворот к качеству жизни, личности, человеку, гармонизации его экономических и социальных интересов. Такое явление начинает острее проявляться в связи обостряющимися во многих развитых странах Европы и Америки демографическими проблемами. Поиск талантов, война за таланты, а в ближайшее время и просто за специалистов высокого уровня разгорается не на шутку.

В этих условиях менеджмент компаний должен тщательно отслеживать тенденции развития мировой экономики и непрерывно совершенствовать корпоративное управление с целью обеспечения конкурентоспособности своего производства, гибко адаптируясь к изменениям внешней и внутренней среды функционирования.

Литература:

- 1 Андронов В.В. *Корпоративный менеджмент в современных экономических отношениях* / В.В. Андронов; науч. ред. В.С. Балабанов; Рос. акад. предпринимательства. – М.: ЗАО «Изд-во «Экономика», 2003. – 479 с.
- 2 *Наука в России: современное состояние и стратегия возрождения.* – М.: «Логос», 2004. – 384 с.
- 3 Драчева Е.Л. *Проблемы определения и классификации интегрированных корпоративных структур* / Е.Л. Драчева, А.М. Либман // *Менеджмент в России и за рубежом.* – 2001. - № 4. – <http://www.dis.ru>.
- 4 Маленков Ю.А. *Новый российский менеджмент корпоративных структур как стратегический фактор развития интеграционных процессов и экономического роста РФ* // *Образование и бизнес.* – № 25 (49). – 2000.
- 5 Ливанов Д.В. *Об интеграции науки и образовательной деятельности.* – <http://www.mon.gov.ru>.
- 6 Топычканов Д.Е. *Особенности корпоративного управления собственностью в зарубежных государствах постиндустриального типа* // *Собственность и рынок.* – 2004. – № 3. – С. 7-10.



ИЗВЕСТИЯ

ОРЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА СЕРИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Журнал публикует статьи по широкому спектру проблем в следующих областях: технология машиностроения и приборостроения; упрочняющая, абразивная, лезвийная физико-техническая обработка материалов и изделий; диагностика и контроль качества продукции; информационно-измерительная техника; приборы и системы автоматического управления; информатика и компьютерные технологии в инженерном деле.

Журнал открыт для рекламы, *оплата* – на договорной основе (в соответствии с приказом ректора ОрелГТУ).

Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста, напечатанного на листах формата А4. Объем, как правило, не должен превышать: для статьи – семь страниц; для краткого сообщения – двух страниц; для рекламного объявления – одной страницы.

Материал принимается в файловом виде по электронной почте или на дискетах 3,5 дюйма, выполненный в любой версии текстового редактора Microsoft Word без форматирования, с приложением распечатки.

Материалы принимаются в течение всего года и публикуются в текущих номерах

Адрес серии «Машиностроение. Приборостроение»: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ОрелГТУ, кафедра «ПМиС»; тел: (4862) 41-98-76; E-mail: pms35@ostu.ru

ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Размер шрифта 10 пт. (пунктов); *междустрочный интервал* одинарный, *поля* сверху и снизу – по 25 мм, слева – 30 мм, справа – 15 мм.

Рисунки представляются в черно-белом виде, в форматах .bmp, .jpg, .gif, .wmf.

Формулы выполняются в редакторе Microsoft Equation; *размеры*: обычный – 10 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 14 пт, мелкий символ – 10 пт; *стиль* всех символов наклонный.

В редакцию представляются текст публикации (шрифт Times New Roman); реферат (8-12 строк) на русском и английском языках; название статьи, фамилии и инициалы авторов – на русском и английском языках; экспертное заключение о возможности опубликования; рецензия; сведения об авторах.

К обязательным элементам оформления статьи относятся: индекс УДК; инициалы и фамилии авторов; полное название высшего учебного заведения (организации); название статьи; аннотация (5-7 строк).

В тексте все сокращения, за исключением общепринятых, расшифровываются. Физический смысл символов в формулах объясняется. Значения физических величин приводятся в единицах СИ или внесистемных единицах, разрешенных к употреблению наравне с ними. Буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Список использованных источников оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003. «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». *Нумерация позиций* – согласно очередности ссылок в тексте.

Реферат оформляется в соответствии с правилами ВИНТИ.

Сведения об авторах должны содержать: фамилию, имя, отчество, должность, название кафедры и вуза (подразделения и организации), ученую степень и ученое звание, номера служебного и домашнего телефонов, а при возможности – E-mail. Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

УДК ????.???.???

Пробел 12 пт

Д-р техн. наук., проф. Иванов А.А., канд. техн. наук Петров В.В.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

Пробел 12 пт

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ 16 ПТ, ПОЛУЖИРНЫЙ, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЦЕНТРУ

Пробел 10 пт

Реферат на английском языке 5-7 строк шрифт Times New Roman (курсив), 10 пт, выравнивание по ширине, отступ красной строки 0,5 мм (никаких других отступов не допускается).

Пробел 10 пт

Статья до 7 страниц шрифт Times New Roman, 10 пт, выравнивание по ширине, отступ красной строки 0,5 мм (никаких других отступов не допускается).

Рисунок, выравнивание по центру, положение перед текстом

Рис. 1. Название рисунка (10 пт, курсив, полужирный, форматирование по центру)



Ответственные за выпуск:

Степанов Ю.С., Подмастерьев К.В., Киричек А.В.

Известия ОрелГТУ.

Серия Машиностроение. Приборостроение.

2005. – № 2. – 80 с.

Редактор К.В. Подмастерьев

Технический редактор В.В. Марков

Лицензия « ИД00670 от 05.01.2000

Подписано в печать:

Формат 69x90/8.

Бумага офсетная.

Печать ризография.

Гарнитура «Таймс»

Усл. печ. л. 7.

Тираж 500 экз.

Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии ОрелГТУ,

302030, г. Орел, ул. Московская, 65.