



# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.81

**А.Е. КОВЕНСКИЙ**

начальник НТЦ-27<sup>1</sup>

E-mail: aleko@kbtm.by

**В.Л. БАСИНЮК**, д-р техн. наук, проф.

начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» — заведующий лабораторией приводных систем и технологического оборудования<sup>2</sup>

E-mail: vladbas@mail.ru

**Р.Е. ВОЛКОТРУБ**

научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования<sup>2</sup>

E-mail: aug1961r@mail.ru

<sup>1</sup>ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.04.2021.

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ С АЭРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ. ЧАСТИ 2–3

*Приведены результаты исследований процессов возникновения колебаний вала прецизионного горизонтального высокоскоростного электрошпинделя с аэростатическими радиальными и осевыми опорами, используемого на ОАО «Планар» в оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы. Исследования проводились с использованием разработанных математических моделей, учитывающих конструктивные особенности этих электрошпинделей, включая консольное расположение режущего инструмента, дисбаланс алмазного диска с оправкой и отношение масс основных компонентов электрошпинделя, а также результаты их натурных испытаний. На основе анализа полученных данных показаны закономерности, связывающие амплитудные значения колебаний вала электрошпинделя с дисбалансом алмазного диска с оправкой и частотой вращения электрошпинделя, позволившие предложить инженерные зависимости для выбора допустимых величин дисбаланса и рациональной, с позиций условий резания и допустимых колебаний вала, частоты вращения электрошпинделя. Разработаны рекомендации по созданию системы мониторинга и активного управления параметрами функционирования электрошпинделя в процессе разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, позволяющие использовать резонансный режим радиальных колебаний для улучшения условий резания, исключив непосредственный контакт рабочих поверхностей аэростатических опор, их схватывание и потерю работоспособности электрошпинделя. Приведена методика выбора параметров функционирования высокоскоростного прецизионного горизонтального электрошпинделя с аэростатическими радиальными и осевыми опорами и консольным креплением алмазного режущего диска. В ее основу положен анализ результатов моделирования вынужденных колебаний вала и данные о его колебаниях в процессе функционирования электрошпинделя с различными частотами вращения и дисбалансами. Полученные результаты могут быть использованы при мониторинге колебаний вала в процессе работы электрошпинделя, при этом высокая эффективность функционирования*

которого достигается адаптивным управлением частотами вращения с учетом амплитуд этих колебаний.

**Ключевые слова:** аэростатические опоры, микроэлектроника, вынужденные колебания, резание, электрошпиндель, адаптивное управление, вибрация, мониторинг

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-25-41>

## ЧАСТЬ 2. КОЛЕБАНИЯ ВАЛА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ С АЭРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ.

**Введение.** Вынужденные механические колебания и колебания с собственными частотами в ортогональной системе валов прецизионных высокоскоростных электрошпинделей с аэростатическими опорами при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы можно отнести к одной из основных причин контактирования и схватывания их рабочих поверхностей.

Исследования и разработки в области совершенствования электрошпинделей с аэростатическими опорами в основном ведутся в следующих направлениях:

- совершенствование методов и методик расчета электрошпинделей [1–6];
- модифицирование конструкций электрошпинделей, осуществляемое, в основном, путем использования пористых вкладышей и разработки комбинированных опор, включающих аэростатические и магнитные подшипники [7–13];
- мониторинг и управление параметрами функционирования электрошпинделя [14–18];
- моделирование параметров функционирования электрошпинделей [19–22].

Анализ приведенных выше публикаций, среди которых есть значительное число диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата технических наук, показывает, что только относительно небольшое число из них посвящено исследованиям колебаний валов прецизионных высокоскоростных электрошпинделей на аэростатических опорах. Это обусловлено в основном тем, что эти электрошпиндели можно отнести к группе наиболее плавно работающих и при их использовании в обрабатывающем оборудовании машиностроения этими колебаниями в ряде случаев можно пренебречь.

Вместе с тем, при использовании рассматриваемых электрошпинделей в оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, по мере уменьшения размеров микросхем и необходимости повышения качества реза требования к динамическим качествам электрошпинделей существенно возросли, что обусловило необходимость снижения интенсивности этих колебаний [21].

К одной из основных причин возникновения колебаний вала электрошпинделя можно отнести консольное расположение режущего инструмента

и неизбежно возникающий при этом дисбаланс установленного на оправке с элементами крепления режущего алмазного круга, а также дисбаланс самого вала. Эти колебания возникают как в режиме холостого хода, оказывая влияние на условия взаимодействия полупроводниковой пластины с алмазным диском при его врезании в пластину, так и в процессе ее резания, «разбивая» прорезаемый паз. Необходимо отметить, что силы резания полупроводниковых пластин крайне невелики, поскольку мощность, потребляемая электрошпинделем в режиме холостого хода, и сила резания отличаются не более чем на 5...10 %. Поэтому влиянием силы резания на параметры колебаний вала электрошпинделя, обусловленной его дисбалансом, можно пренебречь.

*Целью исследований* являлось установление зависимостей колебаний вала прецизионного высокоскоростного электрошпинделя с аэростатическими радиальными и осевыми опорами от дисбаланса, инерционно-жесткостных параметров и режимов функционирования.

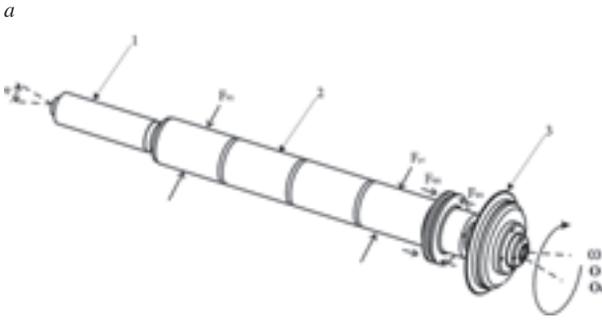
**Методика исследований.** Общий вид используемых электрошпинделей с аэростатическими опорами в изготавливаемом ОАО «Планар» оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы и схема действующих на его вал сил в режиме холостого хода показаны на рисунке 1 а. Формализованная схема механической системы «алмазный диск с оправкой — вал электрошпинделя — ротор электродвигателя», использованная для разработки математической модели радиальных колебаний, показана на рисунке 2.

Расстояние  $L_{MC}$  между центром масс узла «вал электрошпинделя — ротор электродвигателя — оправка с алмазным диском» может быть определена из зависимости:

$$L_{MC} = \frac{M_1 L_1 + M_2 L_2 + M_3 L_3}{M_C} = 124 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $M_C = M_1 + M_2 + M_3$  — суммарная масса алмазного диска с оправкой, вала электрошпинделя и ротора электродвигателя, кг.

Вследствие малости перемещений  $x$  в вертикальной плоскости изменением жесткости аэростатических и демпфирующих свойств, зависящих от величины зазора в аэростатическом подшипнике, можно пренебречь, т. е. они могут быть приняты условно постоянными. Сила  $F$ , обусловленная суммарным дисбалансом, действующим



**Рисунок 1** — Общий вид электрошпинделя с аэроэстатическими радиальными и осевыми опорами (а) и условная схема вала электрошпинделя с действующими на него силами со стороны аэроэстатических опор (б): 1 — ротор электродвигателя; 2 — вал электрошпинделя; 3 — алмазный диск с оправкой;  $F_{01}, F_{02}$  и  $F_{p1}, F_{p2}$  — силы, действующие на вал электрошпинделя со стороны осевых и радиальных аэроэстатических опор;  $O, O_R$  — оси электрошпинделя и осциллирующего вращения вала с частотой вращения  $\omega$ , смещенного под углом  $\varphi$  относительно оси электрошпинделя под действием силы, возникающей вследствие дисбаланса алмазного диска с оправкой

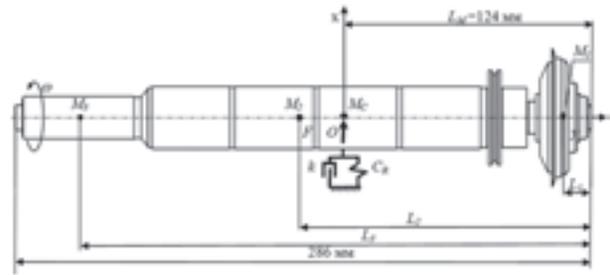
**Figure 1** — General view of the electric spindle with aerostatic radial and axial supports (a) and the conditional diagram of the electric spindle shaft with forces acting on it from the aerostatic supports (b): 1 — motor rotor; 2 — electric spindle shaft; 3 — diamond disk with mandrel;  $F_{01}, F_{02}$  and  $F_{p1}, F_{p2}$  — forces acting on the electric spindle shaft from the axial and radial aerostatic supports;  $O, O_R$  — axis of the electric spindle and the oscillating rotation of the shaft with a rotation frequency  $\omega$ , displaced at an angle  $\varphi$  relative to the axis of the electric spindle under the action of a force resulting from an imbalance of the diamond disk with the mandrel

щая на массу  $M_C$  в вертикальной плоскости, может быть представлена в виде:

$$F = F_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

где  $F$  — сила, действующая на массу  $M_C$ , Н;  $F_0$  — амплитуда силы  $F$ , определяемая величиной суммарного дисбаланса алмазного диска с оправкой, ротора электродвигателя и вала электрошпинделя, Н;  $\omega$  — угловая частота вращения вала электрошпинделя (рад/с), равная  $\omega = 2\pi n/60$ , где  $n$  — частота вращения вала электрошпинделя, мин<sup>-1</sup>;  $t$  — время, с.

Тогда уравнение равновесия сил и дифференциальное уравнение колебаний массы  $M_C$  в направлении оси  $x$  при установившемся режиме функционирования могут быть записаны в виде:



**Рисунок 2** — Формализованная схема механической системы «алмазный диск с оправкой — вал электрошпинделя — ротор электродвигателя», использованная для разработки математической модели радиальных колебаний:  $L_M, L_1, L_2, L_3$  — расстояния от торца до центров масс соответственно  $M_C, M_1, M_2$  и  $M_3$ ;  $F$  — сила, действующая вследствие дисбаланса на приведенную массу  $M_C$ ;  $k$  — коэффициент сопротивления линейным перемещениям вала электрошпинделя в вертикальной плоскости, создаваемый аэроэстатическими опорами;  $C_R$  — радиальная жесткость аэроэстатических опор

**Figure 2** — Formalized scheme of mechanical system “diamond disc with mandrel — electrospindle shaft — electric motor rotor” used to develop the mathematical model of radial oscillations the action of forces:  $L_M, L_1, L_2, L_3$  — distances from the end face to the centers of masses  $M_C, M_1, M_2$  and  $M_3$ , respectively;  $F$  — force acting due to an imbalance on the reduced mass  $M_C$ ;  $k$  — coefficient of resistance to linear movements of the electric spindle shaft in vertical plane created by the aerostatic supports;  $C_R$  — radial stiffness of the aerostatic supports

$$M_C \ddot{x} + k\dot{x} + C_R x = F_0 \cos \omega t \quad (3)$$

или

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_{OR}^2 x = (F_0/M_C) \cos \omega t, \quad (4)$$

где  $\omega_{OR}$  — частота свободных механических колебаний массы  $M_C$ , определяемая из соотношения  $\omega_{OR} = \sqrt{C_R/M_C}$ , рад/с;  $k$  — коэффициент сопротивления линейным перемещениям вала электрошпинделя, создаваемый аэроэстатическими опорами, кг/с;  $\beta$  — коэффициент затухания колебаний, с<sup>-1</sup>;  $C_R$  — суммарная радиальная жесткость аэроэстатических опор, Н/м.

Представляет интерес амплитуда  $A$ , м, смещений массы  $M_C$  при вынужденных линейных колебаниях вала электрошпинделя, поскольку при превышении амплитуды колебаний величины зазора в радиальных электростатических опорах может произойти схватывание их рабочих поверхностей и выход электрошпинделя из строя.

Амплитуда  $A$  смещений массы  $M_C$  может быть определена из зависимости [23]:

$$A = \frac{F_0}{M_C \sqrt{(\omega_{OR}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}} \quad (5)$$

или

$$A = \frac{F_0}{M_C \omega_{OR}^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2}\right)^2 + 4\frac{\omega^2\beta^2}{\omega_{OR}^4}}} \quad (6)$$

Зависимость для определения  $F_0$  имеет вид:

$$F_0 = M_1 \omega^2 e, \quad (7)$$

где  $e$  — эксцентриситет смещения массы  $M_C$  относительно статического положения оси вала электрошпинделя, м.

С учетом этого выражение (6) может быть приведено к более удобному для исследований безразмерному виду:

$$\frac{A}{e} = \frac{M_1}{M_C} \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{\beta^2}{\omega_{OR}^2}}} \quad (8)$$

или

$$\frac{A}{A_{OR}} = 2 \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{\beta}{\omega_{OR}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{\beta^2}{\omega_{OR}^2}}}, \quad (9)$$

где  $A_{OR}$  — амплитуда механических колебаний вала электрошпинделя с резонансной частотой.

При резонансных, наиболее опасных для электрошпинделя колебаниях  $\omega = \omega_{OR}$ , и величина отношения  $\frac{A_{OR}}{e}$  может быть определена из зависимости:

$$\frac{A_{OR}}{e} = 0,5 \frac{M_1}{M_C} \frac{\omega_{OR}}{\beta}. \quad (10)$$

Для анализа угловых колебаний вала электрошпинделя могут быть использованы схемы, показанные на рисунке 3.

Уравнение равновесия моментов, действующих на вал электрошпинделя в осевой плоскости, может быть записано в виде

$$T_C = \varphi \cdot \left[ C_a (l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_6^2 + l_7^2) + C_o r_0^2 \right] = \varphi \cdot C_a \cdot (\sum l_i^2 + k_c r_0^2), \quad (11)$$

где  $C_a$  — жесткость каждой из радиальных аэро-статических опор, Н/м;  $C_o$  — жесткость осевой опоры, Н/м;  $r_0$  — радиус расположения жиклеров осевой аэро-статической опоры, м;  $k_c = C_o/C_a$ .

Тогда угловая жесткость:

$$T_C/\varphi = C_a \cdot (\sum l_i^2 + k_c r_0^2). \quad (12)$$

Уравнение равновесия моментов, действующих на вал в осевой плоскости, при его угловых колебаниях:

$$J_C \ddot{\varphi} + k_\varphi \dot{\varphi} + C_a \varphi \sum l_i^2 + C_o \varphi \cdot r_0^2 = F_1 (L_M - L_1) \cos \omega t, \quad (13)$$

или

$$J_C \ddot{\varphi} + k_\varphi \dot{\varphi} + C_a \varphi \sum l_i^2 (1 + k_c \cdot k_{lr}^2) = F_1 (L_M - L_1) \cos \omega t, \quad (14)$$

где  $J_C$  — момент инерции вала при его поворотных колебаниях в вертикальной плоскости, кг·м<sup>2</sup>;

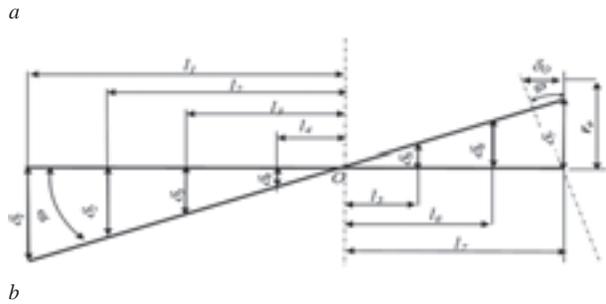
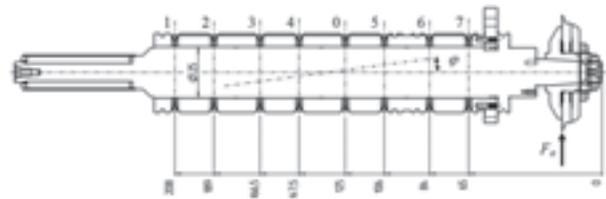


Рисунок 3 — Схема расположения жиклеров аэро-статических опор на валу (а) электрошпинделя и расчета угловой жесткости (б):  $F_a$  — сила, действующая на вал электрошпинделя вследствие дисбаланса алмазного диска с оправкой  
Figure 3 — Diagrams of the arrangement of aerostatic supports on the electrospindle shaft (a) and the calculation of the angular stiffness (b):  $F_a$  — force acting on the electrospindle shaft due to the imbalance of the diamond disk with mandrel

$\ddot{\varphi}$ ,  $\dot{\varphi}$ ,  $\varphi$  — угловые ускорение (с<sup>-2</sup>), скорость (с<sup>-1</sup>), и угол поворота вала (с) при его поворотных колебаниях в вертикальной плоскости соответственно;  $k_{lr} = r_0/\sum l_i$ ;  $k_c = C_o/C_a$ ;  $k_\varphi$  — коэффициент сопротивления угловому повороту вала электрошпинделя в вертикальной плоскости, создаваемый аэро-статическими радиальными и осевыми опорами, кг/(м<sup>2</sup>с);  $F_1$  — амплитуда силы  $F_a$ .

С учетом приведенного выше дифференциальное уравнение угловых колебаний вала электрошпинделя может быть представлено в виде

$$\ddot{\varphi} + 2\beta_\varphi \dot{\varphi} + \omega_{\varphi r}^2 \varphi = (F_1/J_C)(L_M - L_1) \cos \omega t, \quad (15)$$

где  $\omega_{\varphi r}^2 = C_a \sum l_i^2 (1 + k_c \cdot k_{lr}^2)/J_C$ .

Амплитуда угловых колебаний вала электрошпинделя может быть определена из зависимости:

$$\varphi_a = \frac{F_0 (L_M - L_1)}{J_C \sqrt{(\omega_{\varphi r}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \beta_\varphi^2}} \quad (16)$$

или

$$A_\varphi = \frac{M_1 e (L_M - L_1)}{J_C} \frac{\omega^2}{\omega_{\varphi r}^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{\varphi r}^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{\omega_{\varphi r}^2} \frac{\beta_\varphi^2}{\omega_{\varphi r}^2}}}. \quad (17)$$

При резонансе в окружном направлении:

$$A_\varphi = 0,5 \frac{M_1 e (L_M - L_1)}{J_C} \frac{\omega_{\varphi r}}{\beta_\varphi}. \quad (18)$$

Определение частоты резонансных колебаний осуществлялось на примере электрошпинделя ОАО «Планар» (см. рисунок 1) путем последо-

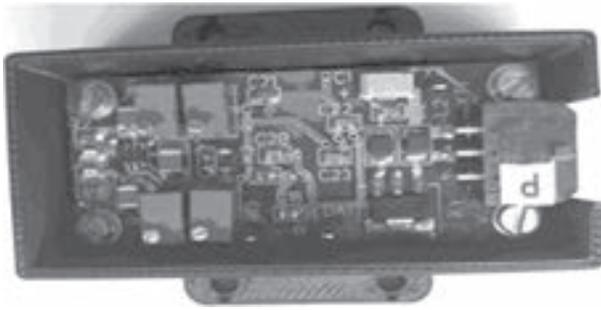


Рисунок 4 — Модуль двухкоординатного контроля параметров виброускорений  
 Figure 4 — Module for two-coordinate control of vibration acceleration parameters

вательного увеличения в диапазоне его рабочих скоростей вращения от 28 000 до 38 000 об/мин электрошпинделя с шагом 1000. При этом установленным на корпусе электрошпинделя модулем контроля (рисунок 4) регистрировались виброускорения в осевой плоскости и осевом направлении (эти колебания возникают из-за поворотных колебаний вала электрошпинделя в осевой плоскости).

Обработка результатов исследований резонансных колебаний осуществлялась следующим образом:

- из массива зарегистрированных данных выделялись резонансные частоты  $n_R$  и  $n_0$  вращения электрошпинделя, при которых возникали наибольшие по амплитуде радиальные и осевые колебания соответственно, и определялись соответствующие им среднеквадратические значения виброускорений  $a_R$  и  $a_0$ ;
- рассчитывались отношения частот вращения электрошпинделя  $n_i$  к резонансным частотам  $n_i/n_R$  и  $n_i/n_0$  и соответствующие им отношения среднеквадратических значений виброускорений  $a_{iR}/a_R$  и  $a_{i0}/a_0$ ;

- строились графики зависимостей среднеквадратических отношений виброускорений  $a_{iR}/a_R$  и  $a_{i0}/a_0$  от отношений скоростей вращения  $n_i/n_R$  и  $n_i/n_0$ .

**Полученные результаты и их обсуждение.**

Анализ зависимостей (8), (9) показывает следующее:

- расчетные величины амплитуд радиальных колебаний и углов поворота вала в вертикальной плоскости пропорциональны эксцентриситету или дисбалансу алмазного диска с оправкой и отношению их массы  $M_1$  к массе вала  $M_C$ ;
- с увеличением отношения  $\beta/\omega_{0R}$ , т. е. с возрастанием коэффициента затухания колебаний и (или) уменьшением резонансной частоты колебаний за счет снижения жесткости аэростатических опор или увеличения массы вала электрошпинделя, растут амплитуды колебаний (рисунок 5 а, б), причем в дорезонансной и зарезонансной зоне в рабочем диапазоне частот вращения это возрастание практически линейно зависит от этого отношения;
- в дорезонансной зоне, в которой в основном работают электрошпиндели оборудования ОАО «Планар» для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, влияние  $n_i/n_R$  на амплитуду колебаний чрезвычайно велико (см. рисунок 5 с) и для рассматриваемого случая может быть описано зависимостью:

$$A_i / A_{0R} = -4,2 + 8,6n_i / n_{0R}, \quad (19)$$

в зарезонансной зоне оно незначительно, но амплитуда колебаний вала электрошпинделя существенно выше, что хорошо коррелирует с результатами исследований [21].

Таким образом, смещение резонансных частот колебаний электрошпинделя в более высокую зону частот вращения способствует снижению амплитуды колебаний вала, что, с учетом положительного влияния его массы на этот параметр, может быть достигнуто путем увеличения жесткости

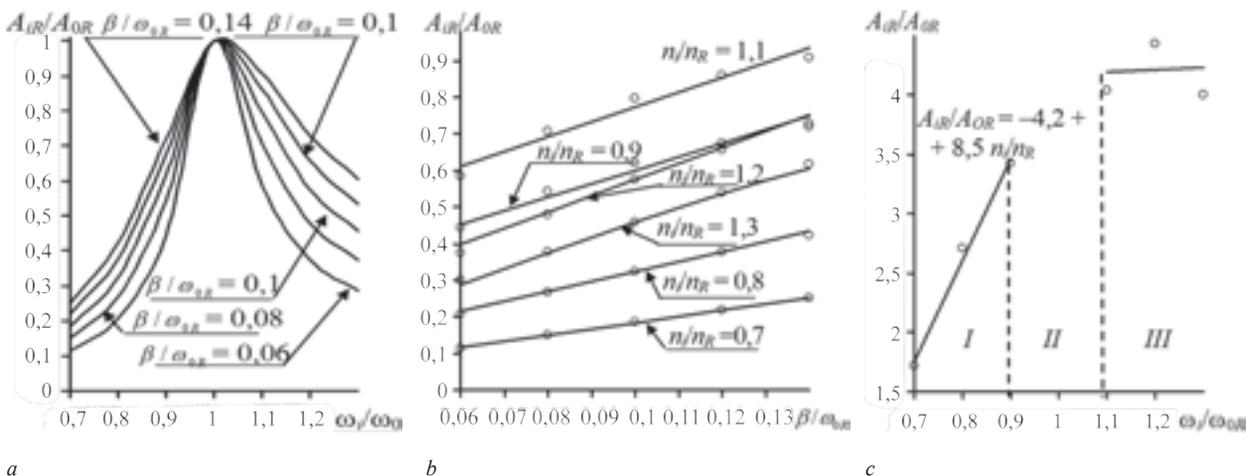


Рисунок 5 — Зависимость изменения амплитуды виброускорений от частоты вращения при различных коэффициентах затухания колебаний (а), их влияние на амплитуду колебаний при различных частотах (б) и влияние частоты вращения на градиент возрастания колебаний в до резонансной зоне (I) и его величину в зарезонансной зоне (III) (с), II — резонансная зона колебаний  
 Figure 5 — Dependence of the amplitude change of vibration accelerations on the rotation frequency at different vibration damping coefficients (a), their effect on the amplitude of vibrations at different frequencies (b) and the influence of the rotation frequency on the gradient of the increase in vibrations in the pre-resonant zone (I) and its value in the over-resonant zone (III) (c), II — resonant zone of vibrations

аэростатических опор поднятием давления сжатого воздуха или уменьшением зазоров в системе их выпуска, предотвратив схватывание рабочих поверхностей введением специальных опорных колец из антифрикционного материала.

Аналогичные выводы можно сделать и в части угловых колебаний вала электрошпинделя на основе анализа зависимости (17). Ее анализ показывает, что амплитуда угловых колебаний снижается при увеличении момента инерции  $J_C$  и уменьшении дисбаланса, а также при сокращении расстояния между центром масс вала электрошпинделя и центром масс алмазного режущего диска с оправкой. В части влияния отношения частоты вращения электрошпинделя к частоте собственных угловых колебаний в осевой плоскости вала и отношения коэффициента затухания к этой частоте, оно аналогично влиянию

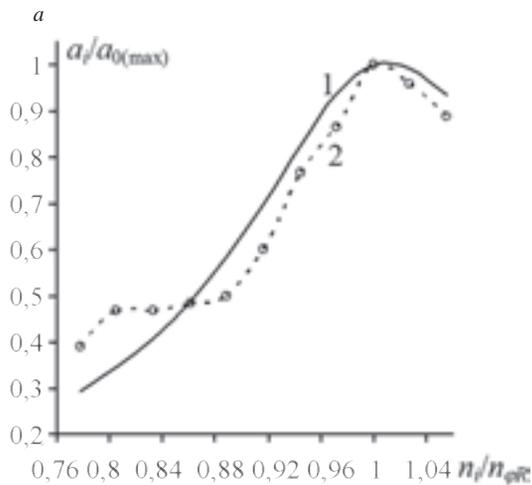
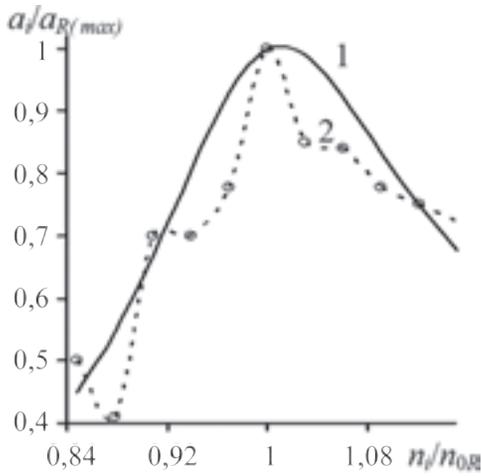


Рисунок 6 — Относительное изменение среднеквадратических значений виброускорения при увеличении частоты вращения электрошпинделя в осевой плоскости вала (а) и осевом направлении (б): 1 — расчетное изменение среднего квадратического значения виброускорения; 2 — экспериментально полученные данные

Figure 6 — Relative change in the root mean square values of vibration acceleration with an increase in the rotation frequency of the electric spindle in the axial plane of the shaft (a) and the axial direction (b): 1 — calculated change in the root mean square value of vibration acceleration; 2 — experimentally obtained data

этих параметров при колебаниях вала в осевой плоскости.

Результаты исследований среднеквадратических значений виброускорений при вертикальных и обусловленных угловыми осевых колебаний электрошпинделя приведены на рисунке 6.

Анализ экспериментальных данных и рисунка 6 показал, что для исследованного электрошпинделя резонансные колебания вала электрошпинделя в вертикальном направлении возникали при  $n_R \approx 33\,000$  об/мин, в осевом — при  $n_0 \approx 36\,000$  об/мин, т. е. резонансные угловые частоты механических колебаний соответственно равны  $\omega_{OR} \approx 3300$  рад/с и  $\omega_{\phi R} \approx 3600$  рад/с. Вследствие этого их соотношение при увеличении частоты вращения электрошпинделя изменяется, а в момент резонансных радиальных колебаний оно становится меньшим и воспринимается как снижение осевых колебаний при резонансных радиальных колебаниях, что хорошо коррелирует с реальными данными о колебаниях электрошпинделя.

Для рассматриваемого электрошпинделя величины  $M_1$  и  $M_C$  соответственно равны 0,039 и 0,986 кг и зависимость (10) может быть представлена в виде

$$A_{OR} = 0,19e. \quad (20)$$

Поскольку величина  $A_{OR}$  с учетом допустимых отклонений геометрической формы цилиндрических поверхностей аэростатических опор и дисбаланса вала с ротором электродвигателя не должна превышать  $\sim 0,6\Delta$  ( $\Delta$  — зазор в аэростатической опоре, т. е.  $[A_{OR}] = 0,6\Delta$ ), то для рассматриваемых параметров электрошпинделя с установленным на нем алмазным режущим кругом с оправкой:

$$[e] \approx 3\Delta. \quad (21)$$

С учетом (21) при предварительной балансировке алмазного круга в сборе с оправкой амплитуда регистрируемого виброускорения не должна превышать

$$a_{max} = 3\omega_b^2\Delta, \quad (22)$$

где  $\omega_b$  — угловая скорость вращения алмазного круга с оправкой при балансировке.

Возникновение приведенных выше радиальных колебаний вала электрошпинделя приводит к уменьшению зазора в аэростатических опорах, при выборке которого может произойти схватывание поверхностей аэростатического подшипника и потеря работоспособности электрошпинделя, а также изменение глубины резания на величину  $A$  и скорости  $V$  рабочей подачи на величину  $\Delta V$ , которую можно определить из соотношения:

$$\Delta V = e \cdot \omega \cdot \frac{M_1}{M_C} \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{\omega_{OR}^2} \frac{\beta^2}{\omega_{OR}^2}}}. \quad (23)$$

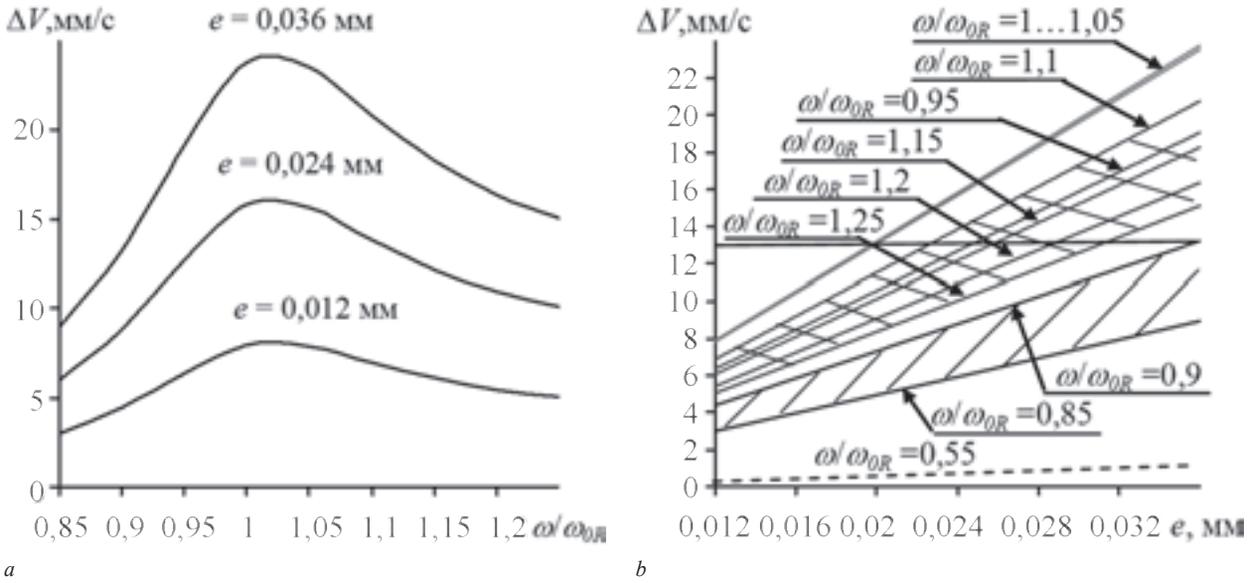


Рисунок 7 — Влияние частоты вращения электрошпинделя и дисбаланса режущего алмазного круга с оправкой на изменения скорости рабочей подачи (а) и отношение угловой скорости вращения электрошпинделя к резонансной частоте (b)  
 Figure 7 — Influence of the electric spindle rotation frequency and the imbalance of the cutting diamond wheel with the mandrel on the changes in the working feed rate (a) and the ratio of the angular rotation speed of the electric spindle to the resonant frequency (b)

Так для используемого в оборудовании ОАО «Планар» электрошпинделя, зазор в аэростатических подшипниках которого составляет  $\Delta \approx 12$  мкм и, как это было принято выше, диапазон изменения  $e$  не должен превышать 0,036 мм, колебания скорости рабочей подачи из-за колебаний вала электрошпинделя смогут варьироваться в достаточно широком диапазоне, составляющем (рисунок 7):

- в дорезонансной зоне при  $\omega/\omega_{0R} = 0,85 \dots 0,9$  от 3 до 13 мм/с;
- в околорезонансной зоне при  $\omega/\omega_{0R} = 0,95$  и  $\omega/\omega_{0R} = 1,1 \dots 1,25$  от 5 до 20 мм/с;
- в резонансной зоне при  $\omega/\omega_{0R} = 1 \dots 1,05$  от 8 до 24 мм/с.

Необходимо отметить, что наиболее широко используемые скорости рабочих подач при разделении полупроводниковых пластин из кремния на кристаллы составляет 30...50 мм/с, а при обработке более твердых материалов типа сапфир —  $\approx 3$  мм/с. Это во многом объясняет эмпирически установленную частоту вращения электрошпинделя при разделении полупроводниковых пластин из сапфира на кристаллы  $\sim 18$  000 об/мин ( $\omega/\omega_{0R} = 0,55$ ), при которой изменения скорости рабочей подачи не превышают 1 мм/с (см. рисунок 7 б, пунктирная линия).

Также в ряде случаев, вследствие приведенных выше изменений скорости рабочей подачи и глубины резания с достаточно высокой частотой (в рассматриваемом случае  $\approx 450 \dots 600$  Гц), могут возникать эффекты, характерные для обработки прерывистой периферийной режущей поверхностью шлифовального круга, создающего более благоприятные условия для подвода смазочно-охлаждающей жидкости и отвода отходов при обра-

ботке, способствующие снижению температуры в зоне резания и повышению режущих свойств круга. Однако для реализации этих эффектов необходим выбор рационального сочетания дисбаланса, скорости рабочей подачи и определенных свойств обрабатываемого материала полупроводниковой пластины.

При угловых колебаниях вала электрошпинделя в горизонтальной и вертикальной плоскостях возникает вероятность касания рабочих поверхностей наиболее близких к торцам вала радиальных аэростатических опор, их схватывание и потеря работоспособности электрошпинделя.

Например, для рассматриваемого электрошпинделя момент инерции его вала относительно вертикальной оси равен  $J_C \approx 5954$  кг/мм<sup>2</sup>. Тогда, с учетом зависимости (19) и того, что масса  $M_1$  равна  $\sim 0,039$  кг,  $L_M - L_1 \approx 123,5$  мм, зависимость амплитуды  $\varphi_a$  угловых колебаний от максимальной величины эксцентриситета  $e$  и резонансной угловой скорости  $\omega$  вращения электрошпинделя может быть представлена в виде:

$$\varphi_a = \frac{0,039 \cdot 0,036 \cdot 123,5 \omega_{\varphi_r}}{5954 \cdot 2\beta_{\varphi}} = 0,0004 \dots 0,0012 \text{ рад.} \quad (24)$$

Осевая жесткость аэростатических опор, возрастающая при угловом повороте в горизонтальной плоскости вала относительно корпуса вследствие уменьшения в нем зазора, способствует значительному снижению  $\varphi_a$ . Однако, учитывая длину и жесткость вала, выборка зазоров в аэростатических радиальных подшипниках и схватывание их рабочих поверхностей при круговых резонансных колебаниях становится весьма вероятной.

Следует отметить, что жесткость механической системы при угловых колебаниях вала электрошпинделя выше вследствие наличия осевых аэростатических опор. Об этом свидетельствуют проведенные авторами исследования на ОАО «Планар», при которых резонансная частота круговых колебаний в этих плоскостях составила  $\sim 3600$  рад/с.

Таким образом, при работе электрошпинделя даже на резонансной частоте радиальных колебаний величина  $\varphi_a$  существенно ниже и, согласно зависимости (24), ориентировочно равна  $6,5 \cdot 10^5$  рад, что в соответствии с геометрическими размерами вала соответствует радиальному смещению в расположенных у его торцов аэростатических опорах на  $\sim 6,5$  мкм. Сочетание смещения вала в радиальном направлении при его линейных колебаниях в осевой плоскости с угловыми колебаниями при зазорах в аэростатических опорах  $\Delta \approx 12$  мкм создает реальную угрозу контактирования и схватывания рабочих поверхностей прилегающих к торцам вала радиальных аэростатических опор. Это во многом объясняет сложившуюся практику работы электрошпинделей оборудования для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы с частотами вращения  $\sim 28\ 000$  об/мин, где приведенные выше смещения вала при его колебаниях существенно ниже и не возникает опасность потери работоспособности электрошпинделя из-за контакта рабочих поверхностей аэростатических опор.

Таким образом, для реализации эффектов, характерных для прерывистой обработки, могут быть предложены следующие рекомендации:

- увеличение частоты  $\omega_{gr}$  в максимально возможную более высокую зону значений за счет повышения давления и соответственно жесткости радиальных аэростатических опор, размещенных в непосредственной близости от торца вала электрошпинделя;
- выбор с учетом приведенных выше результатов исследований более рациональных конструктивных параметров электрошпинделя;
- введение мониторинга и активного автоматизированного управления параметрами функционирования и колебаний электрошпинделя.

**Заключение.** Разработаны модели радиальных и крутильных (в перпендикулярной оси вала) колебаний вала горизонтального электрошпинделя с аэростатическими опорами и консольным размещением режущего алмазного диска, учитывающие дополнительно к инерционно-жесткостным параметрам расположение центра масс и дисбаланс режущего алмазного диска с оправкой, использование которых позволяет определить по амплитудам колебаний на стадии создания электрошпинделя наиболее рациональные конструктивные параметры его компонентов, а в эксплуатации — частоты вращения, исключаящие

контакт и схватывание рабочих поверхностей аэростатических опор и потерю работоспособности электрошпинделя.

Установлены закономерности, связывающие инерционно-жесткостные характеристики вала электрошпинделя с установленным на нем алмазным режущим диском с оправкой с его дисбалансом и частотами вращения электрошпинделя, позволившие установить величину предельно допустимого дисбаланса вала в сборе с учетом прогнозируемых частот вращения при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы.

### ЧАСТЬ 3. МЕТОДИКА ВЫБОРА И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОШПИДЕЛЯ.

**Введение.** Колебания вала электрошпинделя с аэростатическими опорами можно отнести к одной из основных причин возникновения непосредственного контакта рабочих поверхностей аэростатических подшипников, их схватывания и потери работоспособности электрошпинделя. Работы в этой области, включая научные исследования, выполняемые в рамках подготовки кандидатских и докторских диссертаций [2, 3, 5, 10, 12, 14, 24, 25], ведутся в основном в направлении совершенствования аэростатических опор путем модифицирования их рабочих поверхностей, использования в качестве рабочих элементов пористых материалов, введения дополнительных магнитных опор к аэростатическим и управления давлением сжатого воздуха.

Для материалов микроэлектроники, в частности полупроводников типа кремний, сапфир и т. п., характерно сочетание высокой, а в ряде случаев и сверхвысокой твердости обрабатываемых материалов с их хрупкостью. Более того, при разделении на кристаллы пластин из этих материалов алмазным кругом, доступ охлаждающей жидкости в обрабатываемый паз и удаление из него обрабатываемого материала, при определенных сочетаниях глубины и ширины паза, весьма затруднено. Как следствие, в отдельных случаях необходима повышенная плавность работы, в других — возникают определенные проблемы с охлаждением зоны резания и созданием в ней приемлемых, с позиций стойкости алмазного круга, условий обработки. Приведенные выше научные результаты и технические решения не затрагивают и не могут затрагивать эти вопросы, поскольку ориентированы на создание электрошпинделей с улучшенным комплексом служебных свойств без учета особенностей их применения.

Одним из перспективных направлений комплексного решения задач улучшения условий резания узких глубоких пазов алмазным кругом хрупких твердых материалов микроэлектроники может быть создание режима обработки, близкого к прерывистому резанию. Для этого возможно

использование в допустимых пределах дисбаланса алмазного круга с оправкой и элементами крепления при их консольной установке на вал электрошпинделя и околорезонансной или, при возможности, резонансной зоны частот вращения электрошпинделя. К ним может быть добавлена система мониторинга колебаний в радиальном и осевом направлении и автоматизированная система адаптивного управления частотой вращения электрошпинделя, при которой амплитуды колебаний его вала с учетом рассеивания, не превышают зазоры в аэростатических подшипниках.

*Целью исследований* являлась разработка методики выбора и управления параметрами функционирования высокоскоростного прецизионного горизонтального электрошпинделя с аэростатическими опорами (далее — электрошпинделя), позволяющая использовать дисбаланс алмазного круга с оправкой и элементами крепления при их консольной установке на его вал при работе в околорезонансной или, при возможности, резонансной (в радиальном направлении) зоне частоты вращения, а также формирование методических подходов к созданию системы мониторинга колебаний вала электрошпинделя в радиальном и осевом направлении и на ее основе автоматизированной системы адаптивного управления частотой вращения, при которой амплитуда колебаний не превышает зазоры в аэростатических подшипниках.

**Методика исследований.** При разработке методики выбора и управления параметрами функционирования горизонтального электрошпинделя с аэростатическими опорами учитывались:

- предварительно устанавливаемые зависимости между регистрируемыми на корпусе электрошпинделя виброускорениями и колебаниями его вала в радиальном и осевом направлениях, позволяющие сопоставить амплитуды колебаний и зазоры в радиальных и осевых аэростатических опорах;
- закономерности, связывающие параметры колебаний вала электрошпинделя с дисбалансом, создаваемым алмазным кругом с оправкой и ее установочными элементами;
- взаимосвязь частоты вращения электрошпинделя с амплитудой колебаний его вала в радиальном и осевом направлениях в околорезонансной и резонансной зонах;
- прогнозируемая скорость подачи стола.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Методика выбора и управления параметрами функционирования горизонтального скоростного прецизионного электрошпинделя с аэростатическими опорами ориентирована на использование в прецизионном оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы — наиболее ответственной финишной операции их изготовления, дефекты которой могут нанести

максимально возможный экономический урон процессу изготовления микросхем.

Ниже рассмотрена последовательность организации и проведения процесса выбора и управления параметрами функционирования оборудования.

**Общие положения.** Основной целью выбора и управления параметрами функционирования горизонтального скоростного прецизионного электрошпинделя с аэростатическими опорами является достижение максимально возможной производительности процесса разделения полупроводниковых пластин на кристаллы при обеспечении требуемого качества обработки и исключении схватывания рабочих поверхностей аэростатических опор с потерей работоспособности электрошпинделя.

Исходными данными для выбора и управления параметрами функционирования электрошпинделя являются зазоры в аэростатических подшипниках, регламентированная техническим процессом скорость вращения электрошпинделя и рабочая подача стола.

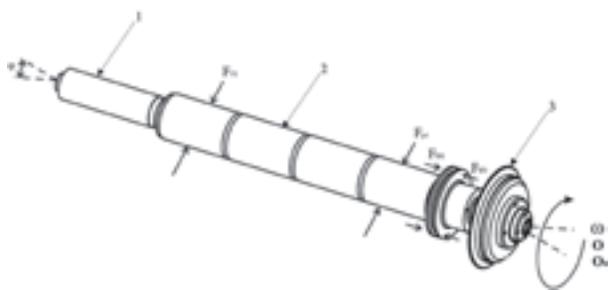
В процессе выбора параметров функционирования системы приводов (привода вращения электрошпинделя и привода подачи) определяется значение наиболее рациональной, с позиций производительности процесса разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, подачи стола и частоты вращения электрошпинделя, конкретизированные величины которых могут автоматизированно устанавливаться в процессе обработки посредством алгоритмов, учитывающих действительное сопротивление обрабатываемого материала при его резании, параметры возникающих при этом колебаний и резонансные частоты вращения электрошпинделя в радиальном и осевом направлениях.

Управление параметрами функционирования осуществляется с использованием данных о вибрации корпуса электрошпинделя в радиальном и осевом направлениях. С учетом стохастического характера колебаний методика предусматривает использование методов статистической обработки данных об амплитудах колебаний и параметрах виброускорения.

**Типовая конструкция вала горизонтально-прецизионного электрошпинделя с аэростатическими опорами.** Типовая конструкция вала в сборе горизонтального прецизионного электрошпинделя с аэростатическими опорами, на использование которого ориентирована настоящая методика, показана на рисунке 8.

В состав электрошпинделя входят:

- собственно вал электрошпинделя, на котором выполнены рабочие поверхности с жиклерами радиальных аэростатических опор и осевых аэростатических подшипников;
- ротор электродвигателя, расположенный со стороны вала, противоположной алмазному режущему



**Рисунок 8** — Общий вид и конструктивные особенности расположения основных компонентов типового вала электрошпинделя с аэростатическими опорами:

1 — вал электрошпинделя; 2 — ротор электродвигателя; 3 — алмазный диск с оправкой и элементами крепления на валу; 4 — цилиндрические рабочие поверхности радиальных аэростатических опор; 5 — торцевые поверхности рабочих поверхностей осевых аэростатических опор; 6 — хвостовик вала

**Figure 8** — General view and design features of the main components layout of a conventional electric spindle shaft with aerostatic supports: 1 — electric spindle shaft; 2 — electric motor rotor; 3 — diamond disc with mandrel and mounting elements on the shaft; 4 — cylindrical working surfaces of radial aerostatic supports; 5 — end surfaces of working surfaces of axial aerostatic supports; 6 — shaft end portion

му диску, и состоящий из размещенных равномерно по окружности постоянных магнитов; - алмазный диск с оправкой и элементами крепления на валу.

**Оснастка и средства контроля.** В состав оснастки для реализации методики входят:

- прецизионная оправка с кольцевым постоянным магнитом, крепящаяся (с базированием по конусному отверстию) в резьбовом отверстии хвостовика вала, расположенного на его торце, противоположном алмазному кругу (рисунок 9 а);

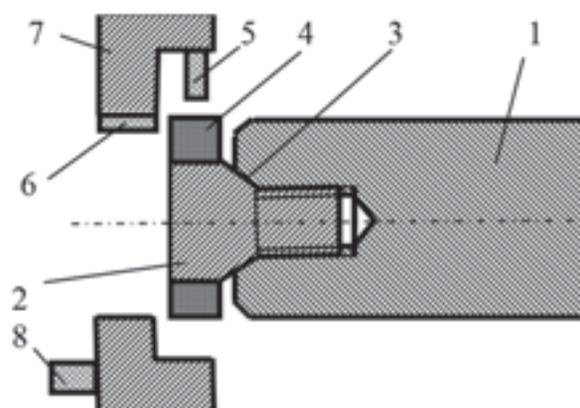
- датчики Холла для контроля осевых и радиальных колебаний хвостовика вала, закрепленные на фланце, расположенном на корпусе электрошпинделя и обеспечивающем величину зазора между ними и кольцевым магнитом в диапазоне 1,5...2,5 мм;

- модуль контроля вибрации электрошпинделя в радиальном и осевом направлениях;

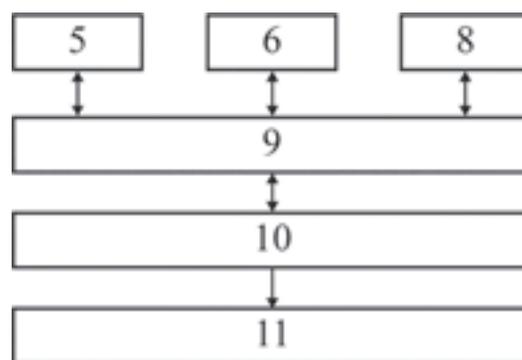
- контроллер для съема, предварительной обработки и передачи на вычислительное средство поступающей с первичных преобразователей диагностической информации;

- вычислительное средство, обеспечивающее постоянную обработку поступающей с датчиков Холла и модуля контроля вибрации через контроллер диагностической информации, ее анализ, формирование, при необходимости, корректирующей частоты вращения электрошпинделя и величины рабочего хода команд и передачу их на ЧПУ станка для последующей их реализации системой адаптивного управления.

С учетом результатов ранее проведенных исследований частота дискретизации при съеме диагностической информации контроллером с датчиков Холла должна быть не менее 3000 Гц, с модуля контроля параметров вибрации — не менее 1200 Гц.



a



b

**Рисунок 9** — Оснастка, компоненты и средства контроля для реализации методики выбора и управления параметрами функционирования горизонтального скоростного прецизионного электрошпинделя с аэростатическими опорами (а) и схема коммутации их измерительных, вычислительных и управляющих компонентов (b): 1 — вал электрошпинделя; 2 — прецизионная оправка; 3 — конусное отверстие; 4 — кольцевой магнит; 5 — датчик Холла для контроля радиальных колебаний вала 1 относительно корпуса электрошпинделя (не показан); 6 — датчик Холла для контроля осевых колебаний вала 1 относительно корпуса электрошпинделя; 7 — фланец для крепления датчиков Холла 5, 6 на корпусе электрошпинделя; 8 — модуль контроля вибрации электрошпинделя в радиальном и осевом направлениях; 9 — контроллер; 10 — вычислительное средство; 11 — ЧПУ станка

**Figure 9** — Equipment, components and controls for the implementation of the method for selecting and controlling the operation parameters of a horizontal high-speed precision electric spindle with aerostatic supports (a) and the switching scheme of their measuring, computing and control components (b):

1 — electric spindle shaft; 2 — precision mandrel; 3 — cone hole; 4 — ring magnet; 5 — Hall sensor for monitoring the radial vibrations of the shaft 1 relative to the electric spindle body (not shown); 6 — Hall sensor for monitoring the axial vibrations of the shaft 1 relative to the electric spindle body; 7 — flange for mounting Hall sensors 5, 6 on the electric spindle body; 8 — module for controlling the vibration of the electric spindle in the radial and axial directions; 9 — controller; 10 — computing tool; 11 — CNC machine

**Выбор параметров функционирования электрошпинделя осуществляется в следующей последовательности:**

- проведение тарировки датчиков Холла и установка предельно допустимых амплитуд колебаний, исключающих непосредственный контакт, схватывание рабочих поверхностей аэростатических подшипников и потерю работоспособности электрошпинделя:

• осуществляют вертикальное перемещение хвостовика вала с шагом 4 мкм на величину  $\Delta_{\text{н}}$ ,

например, установленного с использованием специальной крепежной оснастки на станине микрометра типа F50 с ценой деления 1 мкм, от контакта вала с нижней до его контакта с верхней рабочими поверхностями радиального аэростатического подшипника, при этом одновременно фиксируют микрометром F50 перемещения  $\Delta_{ri}$  и вольтметром типа MS2008 (с использованием его шкалы контроля напряжения постоянного тока 0...4 В с разрешающей способностью 0,001 В) напряжения  $U_{ri}$  с датчика Холла 5, соответствующие перемещениям хвостовика вала  $\Delta_{ri}$  (см. рисунок 9 а). Цикл перемещений выполняют три раза и обработку полученных данных осуществляют методом наименьших квадратов с определением коэффициента пропорциональности  $k_r$  (мкм/В) между напряжением  $U_{ri}$  с датчика Холла и соответствующим перемещением  $\Delta_r$  хвостовика вала, а также среднее квадратическое отклонение перемещений  $S_{\Delta_r}$  (мкм):

$$k_r = \frac{n_r \sum U_{ri} \Delta_{ri} - \sum U_{ri} \sum \Delta_{ri}}{n_r \sum U_{ri}^2 - (\sum U_{ri})^2}; \quad (25)$$

$$S_{\Delta_r} = \sqrt{\frac{(\Delta_{ri} - k_r U_{ri})^2}{n_r - 1}}, \quad (26)$$

где  $n_r$  — общее число измерений, проведенных в вертикальном направлении;

- с шагом 4 мкм осуществляют горизонтальное перемещение вала в осевом направлении на величину  $\Delta_{oi}$  от его контакта с рабочей поверхностью на корпусе одной из осевых аэростатических опор до контакта вала с рабочей поверхностью на корпусе другой аэростатической опоры, при этом одновременно фиксируют, например индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм, перемещения  $\Delta_{oi}$  и вольтметром типа MS2008 напряжения  $U_{oi}$  с датчика Холла 6 (см. рисунок 9 а). Цикл перемещений выполняют три раза и обработку полученных данных осуществляют методом наименьших квадратов с определением коэффициента пропорциональности  $k_o$  (мкм/В) между этим напряжением  $U_o$  и перемещением  $\Delta_o$  хвостовика вала, а также среднее квадратическое рассеивание перемещений  $S_{\Delta_o}$ , мкм:

$$k_o = \frac{n_o \sum U_{oi} \Delta_{oi} - \sum U_{oi} \sum \Delta_{oi}}{n_o \sum U_{oi}^2 - (\sum U_{oi})^2}; \quad (27)$$

$$S_{\Delta_o} = \sqrt{\frac{(\Delta_{oi} - k_o U_{oi})^2}{n_o - 1}}, \quad (28)$$

где  $n_o$  — общее число измерений, проведенных в осевом направлении;

- полученные значения  $k_r$ ,  $S_{\Delta_r}$  и  $k_o$ ,  $S_{\Delta_o}$  вводят в вычислительный модуль с идентификацией их значений с конкретизированным электрошпинделем;

- с учетом средних квадратических отклонений перемещений определяют предельно допустимые амплитуды колебаний вала в радиальном  $[\Delta_r]$ , мкм, и осевом  $[\Delta_o]$ , мкм, направлениях:

$$[\Delta_r] = 0,6 \Delta_{rp} - 3S_{\Delta_r}; \quad (29)$$

$$[\Delta_o] = 0,6 \Delta_{op} - 3S_{\Delta_o}, \quad (30)$$

где  $\Delta_{rp}$ ,  $\Delta_{op}$  — средний зазор между рабочими поверхностями радиальных и осевых аэростатических опор соответственно, мкм;

- определение (уточнение паспортных данных) о резонансных частотах вращения вала:

- до установки оправки с алмазным режущим кругом на вал осуществляют ступенчатое увеличение с шагом 1000 об/мин частоты вращения электрошпинделя от 28 000 об/мин до 38 000 об/мин с одновременной регистрацией вибрации электрошпинделя в радиальном и осевом направлениях модулем контроля;

- выделяют частоты вращения электрошпинделя, имеющие максимальные средние квадратические значения виброускорения в радиальном  $n_{RR}$  и осевом  $n_{OR}$  направлениях, соответствующие радиальным и осевым резонансным частотам вращения электрошпинделя;

- определение корреляционной связи между радиальными колебаниями вала, обусловленными его дисбалансом, в околорезонансной (дорезонансной) зоне  $n_{Ri} = (n_{RR} - 4000) \dots (n_{RR} - 1000)$  об/мин:

- выделяют амплитуды  $A_{RR}$  (максимальные значения) при резонансных частотах вращения электрошпинделя в течение 10...12 периодов оборотных частот этих колебаний, каждый из которых равен  $T_{RR} = n_{RR}/60$  с, и рассчитывают среднее значение этих амплитуд  $A_{RRS}$ ;

- выделяют амплитуды  $A_{Ri}$  (максимальные значения) при частотах вращения электрошпинделя  $(n_{RR} - 4000)$ ,  $(n_{RR} - 3000)$ ,  $(n_{RR} - 2000)$  и  $(n_{RR} - 1000)$  об/мин в течение 10...12 периодов этих колебаний, каждый из которых равен  $T_{R1} = (n_{RR} - 4000)/60$ ,  $T_{R2} = (n_{RR} - 3000)/60$ ,  $T_{R3} = (n_{RR} - 2000)/60$  и  $T_{R4} = (n_{RR} - 1000)/60$  с соответственно, и рассчитывают среднее значение этих амплитуд;

- рассчитывают отношения  $A_{RiS}/A_{RRS}$  и методом наименьших квадратов определяют коэффициент регрессии, связывающий частоту вращения электрошпинделя с соответствующей амплитудой радиальных колебаний:

$$k_R = \frac{4 \sum (A_{Ri}/A_{RR}) \cdot n_i - \sum (A_{Ri}/A_{RR}) \sum n_i}{4 \sum n_i^2 - (\sum n_i)^2}; \quad (31)$$

- определение корреляционной связи между осевыми колебаниями вала, обусловленными его дисбалансом в околорезонансной (дорезонансной) зоне в соответствии с алгоритмом, приведенным выше для радиальных колебаний;

- определение корреляционной связи между угловым положением оправки с алмазным режущим диском относительно оси вала электрошпинделя и амплитудами колебаний вала в радиальном и осевом направлениях:

- оправку с режущим алмазным диском фиксируют на валу электрошпинделя, устанавливают частоту его вращения, равную ( $n_{RR} - 4000$ ) об/мин, и при 10...12 оборотах вала определяют средние значения амплитуд угловых  $A_{\varphi r1}$  и осевых  $A_{\varphi o1}$  колебаний в радиальном и осевом направлениях соответственно;

- осуществляют расфиксацию оправки с алмазным диском на валу электрошпинделя и ее поворот в окружном направлении на  $45^\circ$ , после чего устанавливают частоту вращения электрошпинделя, равную ( $n_{RR} - 4000$ ) об/мин, и при 10...12 оборотах вала определяют средние значения амплитуд колебаний  $A_{\varphi r2}$  и  $A_{\varphi o2}$  в радиальном и осевом направлениях соответственно;

- после этого повторяют приведенную выше операцию с поворотом на  $45^\circ$  до достижения угла поворота  $315^\circ$ , полученные данные через контроллер регистрируют в вычислительном средстве, где выделяют максимальные величины амплитуд  $A_{\varphi r(\max)}$  и  $A_{\varphi o(\max)}$ , рассчитывают отношения  $A_{\varphi r1}/A_{\varphi r(\max)}$  и  $A_{\varphi o1}/A_{\varphi o(\max)}$  и определяют корреляционную связь между угловым положением оправки с алмазным режущим диском и амплитудами угловых колебаний в осевой плоскости и осевых колебаний;

- *выбор параметров функционирования:*

- оправку с алмазным диском фиксируют в положении, соответствующем максимальным радиальному среднему квадратическому ускорению и (или) амплитуде радиальных смещений при радиальных колебаниях вала;

- устанавливают частоту вращения электрошпинделя  $0,9n_{RR}$  и, осуществляя постоянный контроль амплитуд смещений радиальных и осевых колебаний, плавно увеличивают частоту вращения до  $n_{RR}$  либо до частоты  $n_{RD}$ , при которой амплитуда колебаний в одном из направлений достигнет предельно допустимой величины  $[\Delta_r]$  и (или)  $[\Delta_o]$ ;

- в случае достижения при  $n_{RD}$  предельно допустимых величин  $[\Delta_r]$  и (или)  $[\Delta_o]$  с использованием корреляционной зависимости между угловым положением оправки с режущим алмазным диском и амплитудами смещений при колебаниях вала определяют угловое положение оправки, при котором на частоте вращения  $n_{RR}$  не достигаются предельно допустимые величины  $[\Delta_r]$  и (или)  $[\Delta_o]$  и фиксируют оправку с режущим алмазным диском в этом положении;

- осуществляют плавное увеличение частоты вращения электрошпинделя до величины  $n_{RR}$  с постоянным контролем амплитуд смещений радиальных и осевых колебаний и при отсутствии их превышения оставляют оправку с режущим алмазным диском в этом положении с регистрацией через контроллер в вычислительном средстве амплитуды радиальных колебаний  $\Delta_{rv}$ . В случае достижения критических значений амплитуд смещений радиальных и осевых колебаний осуществляют дальнейший относительный поворот оправки в направлении уменьшения ее совместного дисбаланса с валом с аналогичным приведенной выше фиксации полученного значения  $\Delta_{rv}$ ;

- с учетом амплитуды колебаний  $\Delta_{rv}$  и частоты вращения  $n_{RR}$  определяют величину скорректированной скорости подачи  $V_k$  (мм/с):

$$V_k = \frac{\Delta_{rv} n_{RR}}{30}; \quad (32)$$

- при величине  $V_k \geq V_T$ , где  $V_T$  — регламентированная технологическим процессом скорость подачи, разделение полупроводниковой пластины на кристаллы осуществляют с подачей  $V_T$ ; при  $V_k < V_T$  разделение полупроводниковой пластины на кристаллы осуществляют с подачей  $V_k$ , причем некоторое снижение производительности в этом случае компенсируется уменьшением времени, затрачиваемого на замену алмазного диска (что связано с повышением его стойкости) и наладочные работы;

- в процессе разделения полупроводниковой пластины на кристаллы управление частотой вращения электрошпинделя осуществляется на основе посто-

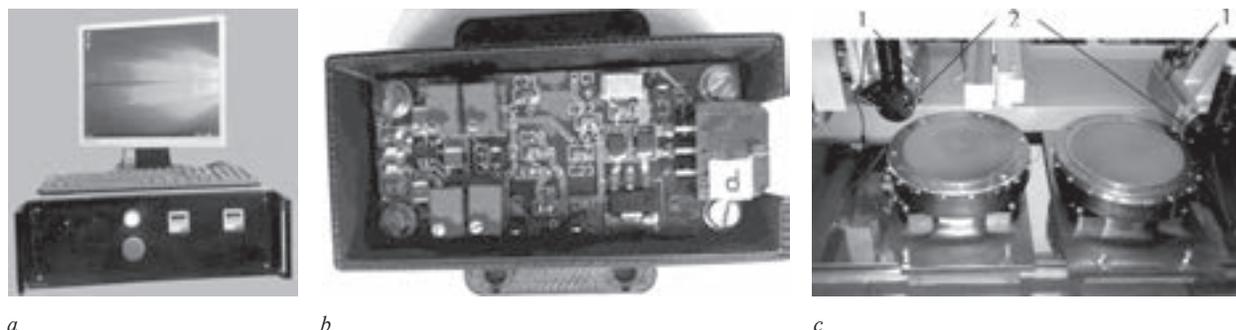


Рисунок 10 — Аппаратно-программный комплекс «КОМПАС» (а), модуль двухкоординатного прецизионного контроля виброускорений со снятой верхней крышкой (б) и зона разделения полупроводниковых пластин на кристаллы (с); 1 — горизонтальные электрошпиндели с аэроэстатическими опорами; 2 — консольно установленные режущие алмазные диски в оправках  
 Figure 10 — Hardware and software complex “COMPAS” (a), a module for two-coordinate precision control of vibration accelerations with the upper cover removed (b) and a zone for separating semiconductor plates into crystals (c): 1 — horizontal electric spindles with aerostatic supports; 2 — cantilevered diamond cutting discs in mandrels

янного контроля вибрации и амплитуд колебаний, при достижении опасных значений которых осуществляется уменьшение частоты вращения электрошпинделя до достижения ими допустимых значений.

**Пример выбора и управления параметрами функционирования электрошпинделя.** При реализации приведенной выше методики были использованы:

- аппаратно-программный комплекс «КОМПАС» (рисунок 10 *a*), созданный Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси совместно с ОАО «Планар» для регистрации аналоговых и цифровых данных с первичных преобразователей, включая датчики Холла, в качестве которых были использованы серийно выпускаемые два датчика Холла SS495A, и модуль двухкоординатного прецизионного контроля виброускорений (см. рисунок 10 *b*), ориентированный на использование в оборудовании ОАО «Планар»;
- установка ОАО «Планар» для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы ЭМ-2165 с горизонтальным электрошпинделем с аэростатическими опорами и консольным креплением режущего алмазного диска (см. рисунок 10 *c*).

В результате тарировки датчика Холла SS495A были получены величины:  $k_r = 783$  мкм/В,  $S_{\Delta r} = 0,7$  мкм и  $k_o = 832$  мкм/В,  $S_{\Delta o} = 0,6$  мкм, которые были введены в программно-аппаратный комплекс «КОМПАС». С учетом этих значений были определены предельно допустимые амплитуды колебаний вала в радиальном  $[\Delta_r]$  и осевом  $[\Delta_o]$  направлениях:

$$[\Delta_r] = 0,6 \cdot 12 - 3 \cdot 0,7 = 5 \text{ мкм}; \quad (33)$$

$$[\Delta_o] = 0,6 \cdot 14 - 3 \cdot 0,6 = 7 \text{ мкм}. \quad (34)$$

Затем были проведены испытания, в результате которых были определены резонансные частоты вращения вала, для радиальных колебаний равные 33 000, для осевых — 36 000 об/мин, и амплитуды колебаний вала электрошпинделя на этих частотах вращения. Анализ амплитуд радиальных и осевых колебаний вала показал существенное превышение амплитуд радиальных колебаний над осевыми. Поэтому в дальнейшем рассматривались только радиальные колебания.

Изменения относительной амплитуды колебаний при изменении частоты вращения электро-

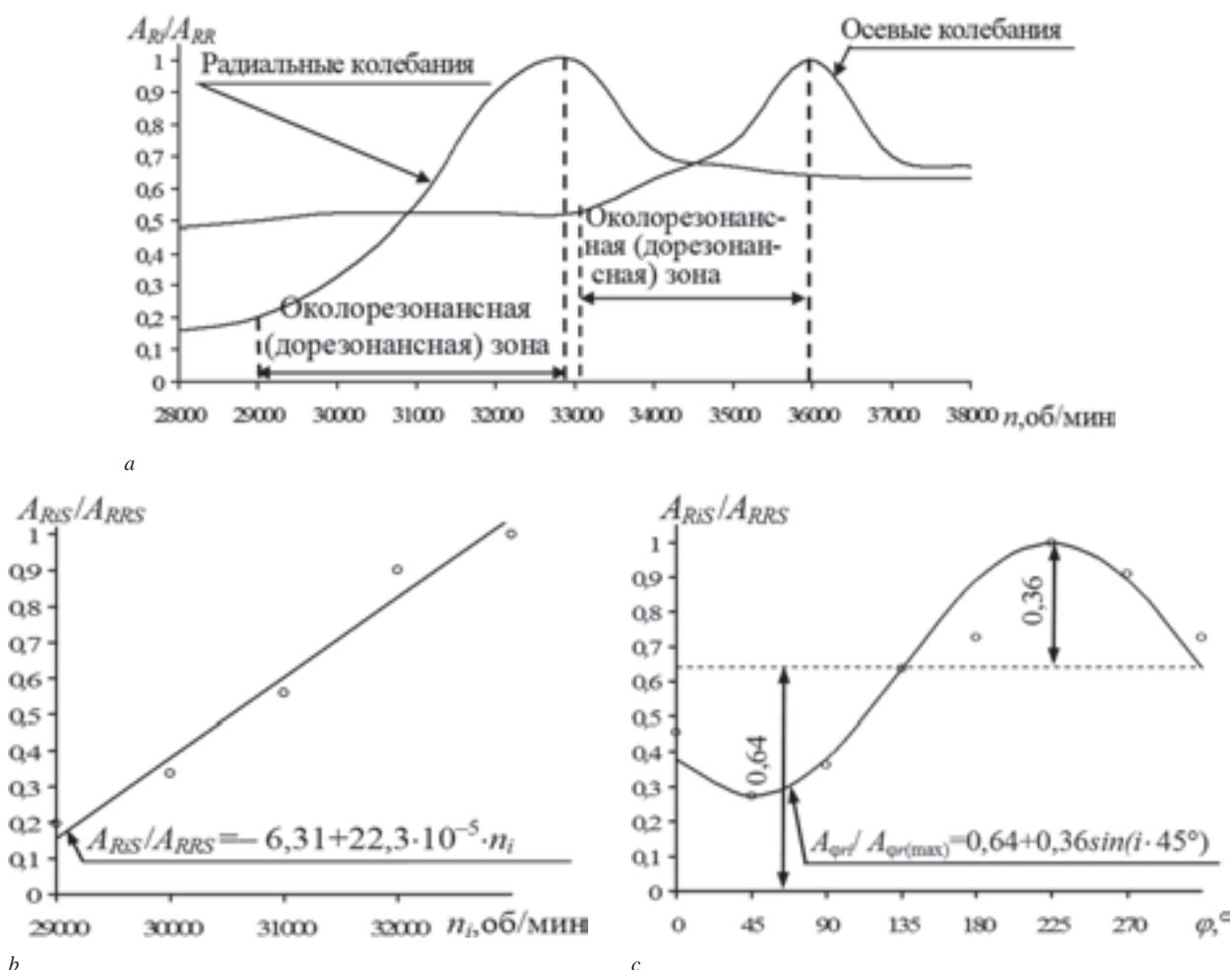


Рисунок 11 — Аппроксимированная зависимость амплитуды радиальных колебаний от частоты вращения (*a*), околорезонансных частот вращения электрошпинделя (*b*) и углового положения относительно оси вала оправки с режущим алмазным диском (*c*)

Figure 11 — Approximate dependence of the radial vibration amplitude on the rotation frequency (*a*), the near-resonant rotation frequencies of the electric spindle (*b*) and the angular position relative to the shaft axis of the mandrel with a cutting diamond disc (*c*)

шпинделя показаны на рисунке 11 *a*, результаты определения корреляционной связи между колебаниями вала и частотой его вращения в около-резонансной (дорезонансной) зоне и угловым положением относительно его оправки с алмазным режущим диском приведены на рисунках 11 *b* и 11 *c* соответственно.

Зависимость, связывающая амплитуду радиальных колебаний вала с частотой вращения электрошпинделя в околорезонансной (дорезонансной) зоне, может быть представлена в виде

$$A_{RIS} / A_{RRS} = -6,31 + k_{RR} \cdot 10^{-5} n_i, \quad (35)$$

где  $k_{RR} = 22,3 \cdot 10^{-5} 1/(\text{об/мин})$ .

Корреляционная связь между дисбалансом вала с установленной на нем оправкой с режущим алмазным диском и ее угловым положением относительно оси вала приведена на рисунке 11 *c*. Зависимость изменения амплитуды колебаний, связанной с угловым положением алмазного диска с оправкой, имеет вид:

$$A_{\varphi i} / A_{\varphi(\max)} = 0,64 + 0,36 \sin(i \cdot 45^\circ), \quad (36)$$

где  $i = 0; 1; 2, \dots, 7$ .

Анализ рисунка 11 и эмпирических зависимостей (11) и (12) показывает следующее:

- использование частоты вращения электрошпинделя  $\sim 28\ 000$  об/мин (см. рисунок 11 *a*) в сочетании с угловым положением алмазного диска под углом  $\sim 45^\circ$  по отношению к начальному позволяет обеспечить минимально возможные амплитуды колебаний и максимально достижимую плавность взаимодействия алмазного диска с полупроводниковой пластиной при ее разделении на кристаллы;
- диапазон варьирования частотой вращения в дорезонансной зоне позволяет увеличивать или уменьшать амплитуду колебаний электрошпинделя в  $\sim 6$  раз, изменение углового положения оправки с алмазным режущим диском относительно оси вала — в  $\sim 4$  раза, что позволяет при обеспечении требуемого качества обработки создать режим прерывистого резания в энергоэффективной резонансной зоне вращения электрошпинделя;
- достаточно широкий диапазон программно-управляемого варьирования амплитудой колебаний электрошпинделя в сочетании с оперативным мониторингом параметров вибраций, радиальных и осевых колебаний позволяет создать автоматизированную систему адаптивного управления частотой вращения электрошпинделя и подачей стола, обеспечивающую при требуемом качестве наибольшую производительность процесса разделения полупроводниковых пластин на кристаллы.

В рассматриваемом случае использование приведенных на рисунке 11 зависимостей позволило применять резонансную (в радиальном направлении) частоту вращения электрошпинделя,

обеспечивающую близкий к прерывистому энергоэффективный режим резания с более благоприятным для зоны взаимодействия алмазного диска с пластиной режимом удаления снимаемого материала и охлаждения алмазного диска, в совокупности позволившие существенно повысить долговечность алмазного диска.

**Заключение.** Разработана методика выбора параметров функционирования горизонтального электрошпинделя с аэростатическими радиальными и осевыми опорами и консольным креплением алмазного режущего диска, основанная на анализе результатов моделирования вынужденных колебаний вала. В основу методики положены данные, полученные при натурных испытаниях с определением вибрации, возникающей в процессе функционирования электрошпинделя с различными частотами вращения и дисбалансами. Показаны возможности создания эффективной системы мониторинга колебаний в процессе подготовки и работы электрошпинделя, а также осуществления адаптивного управления частотами вращения электрошпинделя с учетом амплитуд колебаний.

При реализации методики предусмотрены два этапа управления колебаниями вала электрошпинделя: на первом этапе определяется зависимость дисбаланса от углового положения оправки относительно вала и осуществляется подбор его величины, обеспечивающий рациональный, с позиций создания оптимальных условий резания полупроводниковых пластин, режим резания *при резонансных (в радиальном направлении) частотах вращения электрошпинделя*; на втором, реализуемом непосредственно в процессе разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, — адаптивное управление частотами вращения электрошпинделя, обеспечивающее установку величины амплитуды колебаний, позволяющей оптимизировать (до возможного уровня) условия обработки при конкретизированных массогабаритных и инерционно-жесткостных параметрах электрошпинделя. При этом исключается схватывание рабочих поверхностей аэростатических опор и потеря его работоспособности.

### Список литературы

1. Зверев, А.И. Многокритериальное проектирование шпиндельных узлов на опорах качения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / А.И. Зверев. — М.: СТАНКИН, 1997. — 45 с.
2. Дадаев, С.Г. Разработка теоретических основ и методов расчета динамических характеристик профилированных спиральными канавками газодинамических опор: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.05, 01.02.06 / С.Г. Дадаев. — Челябинск, 2002. — 359 с.
3. Звонарев, П.Н. Разработка метода расчета радиальных упруго газодинамических подшипников с предварительно напряженными лепестками для малых турбомашин низкотемпературных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03 / П.Н. Звонарев. — М., 2005. — 201 с.
4. Kosmylin, A.V. Using magnetic force in the gas-static bearings of high-speed spindles / A.V. Kosmylin, V.S. Shchetinin, I.A. Ivanova // Russian Engineering Research. — 2009. — Vol. 29, no. 5. — Pp. 456–458.

5. Щетинин, В.С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомангнитных опорах металлорежущих станков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 [Электронный ресурс] / В.С. Щетинин; Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. — Комсомольск-на-Амуре, 2011. — 35 с. — Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/nauchnoe-obosnovanie-sozdaniya-i-razrabotka-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-na-gazomagn>. — Дата доступа: 02.06.2020.
6. Иванова, Н.А. Метод расчета газомангнитного подшипника высокоскоростного шпиндельного узла / Н.А. Иванова, В.С. Щетинин, С.С. Блинков // Омский научный вестник. — 2011. — № 1. — С. 63–65.
7. Yamada, H. Development of Magnetic aerostatic hybrid spindle / H. Yamada, N. Suzuki // NTN, Technical review. — 2001. — No. 69. — Pp. 21–26.
8. Совершенствование эксплуатационных характеристик высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах / А.С. Хвостиков [и др.] // Современные наукоемкие технологии. — 2010. — № 9. — С. 183.
9. Космынин, А.В. Совершенствование характеристик газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 [Электронный ресурс] / А.В. Космынин; Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. — Комсомольск-на-Амуре, 2004. — 40 с. — Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-kharakteristik-gazovykh-opor-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-metallo/read>. — Дата доступа: 02.06.2020.
10. Иванова, Н.А. Совершенствование характеристик опор высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 [Электронный ресурс] / Н.А. Иванова; Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. — Комсомольск-на-Амуре, 2011. — 23 с. — Режим доступа: [tekhnosfera.com/sovershenstvovanie-kharakteristik-beskontaktnykh-opor-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-metallovezhushchih-stanokov](http://tekhnosfera.com/sovershenstvovanie-kharakteristik-beskontaktnykh-opor-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-metallovezhushchih-stanokov). — Дата доступа: 02.04.2021.
11. Брешев, В.Е. Приводы машин на регулируемых конических аэроэластических опорах / В.Е. Брешев, А.В. Брешев. — Луганск: Луганский гос. ун-т им. В. Даля, 2016. — 200 с.
12. Курзаков, А.С. Разработка радиальных аэроэластических опор с плавающими регуляторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 [Электронный ресурс] / А.С. Курзаков. — Красноярск: Краснояр. гос. техн. ун-т, 2002. — 211 с. — Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-radialnykh-aerostaticheskikh-opor-s-plavayushchimi-regulyatorami>. — Дата доступа: 02.04.2021.
13. Nosko, P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. — Vol. VIIIA. — Lublin, 2008. — Pp. 126–133.
14. Клименков, Ю.С. Газостатические опоры с системой стабилизации положения вала и расширенным диапазоном нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 [Электронный ресурс] / Ю.С. Клименков. — Владимир: Владимир. гос. ун-т, 2009. — 176 с. — Режим доступа: <http://www.dslib.net/mashyno-vedenie/gazostaticheskie-opory-s-sistemoy-stabilizacii-polozhenija-vala-i-rasshirenyym.html>. — Дата доступа: 02.04.2021.
15. Kosmynin, A.V. Carrying capacity of gas-magnetic bearings for high-speed spindles / A.V. Kosmynin, V.S. Shchetinin // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, no. 12. — Pp. 1252–1253.
16. Kosmynin, A.V. Influence of the Magnetic Force in Gas-Magnetic Bearings on the Operation of High-Speed Spindles in Metalworking Equipment / A.V. Kosmynin, V.S. Shchetinin // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, no. 5. — Pp. 451–452.
17. Шаломов, В.И. О влиянии некоторых параметров газовых опор на выходные характеристики шпиндельных узлов шлифовальных станков / В.И. Шаломов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2012. — № 3. — С. 32–36.
18. Хвостиков, А.С. Применение вейвлет-анализа для диагностики методом акустической эмиссии при сильном зашумлении сигнала / А.С. Хвостиков, В.С. Щетинин // Научное обозрение. — 2007. — № 6. — С. 63–65.
19. Грибиниченко, М.В. Обобщенная математическая модель осевых подшипников с газовой смазкой элементов судовых энергетических установок / М.В. Грибиниченко, А.В. Куренский, Ю.Я. Фершалов // Морские интеллектуальные технологии. — 2011. — Спецвыпуск. — № 1. — С. 21–23.
20. Гуськов, А.М. Сегментная модель для расчета сферических аэроэластических опор [Электронный ресурс] / А.М. Гуськов, Р.А. Пошехонов // Наука и образование. — № 12, декабрь 2011. — Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/doc/286475.html>. — Дата доступа: 17.03.2021.
21. Ковенский, А.Е. Мониторинг и управление параметрами колебаний высокоскоростного электрошпинделя на аэроэластических подшипниковых опорах / А.Е. Ковенский, В.Л. Басинюк, А.А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. научн. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 154–158.
22. Ударная диагностика аэроэластического шпиндельного узла со сферическими опорами [Электронный ресурс] / Р.А. Пошехонов [и др.] // Наука и образование. — М: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», эл. № ФС 77-48211. — № 07, июль 2014. — Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/717582.html>. — Дата доступа: 17.03.2021.
23. Лекции по физике: полный курс лекций по физике [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://physics-lectures.ru/mexanicheski-kolebaniya-i-volny/7-8-vynuzhdennyye-kolebaniya>. — Дата доступа: 15.04.2021.
24. Бесчастных, В.Н. Разработка метода расчета и экспериментальное определение характеристик радиальных сегментных газовых подшипников для тяжелых роторов ГТУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / В.Н. Бесчастных. — М., 2011. — 144 с.
25. Коднянко, В.А. Технология и компьютерная среда автоматизации моделирования, расчета и исследования газостатических опор: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. / В.А. Коднянко. — Красноярск, 2005. — 339 с.

**KOVENSKY Alexander E.**

Head of STC-27<sup>1</sup>

Email: [aleko@kbtm.by](mailto:aleko@kbtm.by)

**BASINIUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Prof.**

Chief of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment” — Head of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment<sup>2</sup>

E-mail: [vladbas@mail.ru](mailto:vladbas@mail.ru)

**VOLKOTRUB Ryta E.**

Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment<sup>2</sup>

E-mail: [aug1961r@mail.ru](mailto:aug1961r@mail.ru)

<sup>1</sup>Planar OJSC, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*Received 26 April 2021.*

## METHOD OF SELECTING THE OPERATION PARAMETERS OF ELECTRIC SPINDLE WITH AEROSTATIC SUPPORTS FOR SEPARATION OF SEMICONDUCTOR PLATES TO CRYSTALS. PARTS 2–3

The article presents the results of studies of the shaft oscillation processes of a precision horizontal high-speed electric spindle with aerostatic radial and axial supports, used at Planar OJSC in equipment for separation of semiconductor plates into crystals. The studies were carried out using the developed mathematical models that take into account the design features of these electric spindles, including the cantilever mounting of the cutting tool, the imbalance of the diamond disc with the mandrel and the mass ratio of the main components of the electric spindle, as well as the results of their full-scale tests. Based on the analysis of the data obtained, regularities are shown that connect the amplitude values of the oscillations of the electric spindle shaft with the imbalance of the diamond disc with the mandrel and the rotational speed of the electric spindle, which made it possible to propose engineering dependences for choosing the permissible values of the imbalance and rotational, from the standpoint of resonance conditions and permissible shaft oscillations, rotational speed of the electric spindle. Recommendations have been developed for the creation of a system for monitoring and active control of the parameters and functioning of the electric spindle in the process of separating semiconductor plates into crystals, which make it possible to use the resonant mode of radial oscillations to improve cutting conditions, excluding direct contact of the working surfaces of aerostatic supports, their seizure and loss of performance of the electric spindle. The article presents a method of selecting the operation parameters of a high-speed precision horizontal electric spindle with aerostatic radial and axial supports and a cantilever mounting of a diamond cutting disc. It is based on the analysis of the simulation results of shaft forced oscillations and data on the shaft oscillations during the operation of the electric spindle with different rotation frequencies and imbalances. The results obtained can be used to monitor shaft oscillations during the operation of the electric spindle, while the high operation efficiency of which is achieved by adaptive control of rotation frequencies taking into account the amplitudes of these oscillations.

**Key words:** aerostatic supports, microelectronics, forced vibrations, cutting, electric spindle, adaptive control, vibration, monitoring

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-25-41>

### References

- Zverev A.I. *Mnogokriterialnoe proektirovanie shpindelnykh uzlov na oporakh kacheniya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Multi-criteria design of spindle assemblies on rolling bearings. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Moscow, 1997. 45 p. (in Russ.).
- Dadaev S.G. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i metodov rascheta dinamicheskikh kharakteristik profilirovannykh spiralnymi kanavkami gazodinamicheskikh opor*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Development of theoretical foundations and methods for calculating the dynamic characteristics of gas-dynamic supports profiled with spiral grooves. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Chelyabinsk, 2002. 359 p. (in Russ.).
- Zvonarev P.N. *Razrabotka metoda rascheta radialnykh uprugozadinamicheskikh podshipnikov s predvaritelno napryazhennymi lepestkami dlya malyykh turbomashin nizkotemperaturnykh ustanovok*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of a method for calculating radial elastic gas-dynamic bearings with prestressed lobes for small turbomachines of low-temperature installations. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2005. 201 p. (in Russ.).
- Kosmynin A.V., Shchetinin V.S., Ivanova I.A. Using magnetic force in the gas-static bearings of high-speed spindles. *Russian engineering research*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 456–458.
- Shchetinin V.S. *Nauchnoe obosnovanie sozdaniya i razrabotka vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov na gazomagnitnykh oporakh metallovezhushchikh stankov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific substantiation of the creation and development of high-speed spindle units on gas-magnetic bearings of metal-cutting machines. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2011. 35 p. Available at: <https://www.disserscat.com/content/nauchnoe-obosnovanie-sozdaniya-i-razrabotka-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-na-gazomagnitnykh-oporakh-metallovezhushchikh-stankov> (accessed 02 June 2020) (in Russ.).
- Ivanova N.A., Shchetinin V.S., Blinkov S.S. Metod rascheta gazomagnitnogo podshipnika vysokoskorostnogo shpindel'nogo uzla [Method for calculating a gas magnetic bearing of a high-speed spindle assembly]. *Omsk scientific bulletin*, 2011, no. 1, pp. 63–65 (in Russ.).
- Yamada H., Suzuki N. Development of magnetic aerostatic hybrid spindle. *NTN, Technical review*, 2001, no. 69, pp. 21–26.
- Khvostikov A.S., Kosmynin A.V., Shchetinin V.S., Smirnov A.V., Blinkov S.S. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov na beskontaktnykh oporakh [Improving the operational characteristics of high-speed spindle assemblies on contactless supports]. *Modern high technologies*, 2010, no. 9, p. 183 (in Russ.).
- Kosmynin A.V. *Sovershenstvovanie kharakteristik gazovykh opor vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov metalloobrabatvayushchego oborudovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improvement of the characteristics of gas supports of high-speed spindle assemblies of metalworking equipment. D. Sc. Thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2004. 40 p. Available at: <https://www.disserscat.com/content/sovershenstvovanie-kharakteristik-gazovykh-opor-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-metalloobrabatvayushchego-oborudovaniya> (accessed 02 June 2020) (in Russ.).
- Ivanova N.A. *Sovershenstvovanie kharakteristik opor vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov metallovezhushchikh stankov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of characteristics of supports of high-speed spindle nodes of metal-cutting machine tools. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2011. 23 p. Available at: <https://www.disserscat.com/content/sovershenstvovanie-kharakteristik-opor-vysokoskorostnykh-shpindelnykh-uzlov-metalloobrabatvayushchikh-stankov> (accessed 02 June 2020) (in Russ.).

- sokoskorostnyh-shpindelnyh-uzlov-metallorazhuschih-stankov (accessed 02 April 2021) (in Russ.).
11. Breshev V.E., Breshev A.V. *Privody mashin na reguliruemyykh konicheskikh aerostaticeskikh oporakh* [Machine drives on adjustable conical aerostatic supports]. Lugansk, Luganskiy gosudarstvennyy universitet im. V. Dalya Publ., 2016. 200 p. (in Russ.).
  12. Kurzakov A.S. *Razrabotka radialnykh aerostaticeskikh opor s plavayushchimi regulyatorami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of radial aerostatic supports with floating controllers. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Krasnoyarsk, 2002. 211 p. Available at: <https://www.disscat.com/content/razrabotka-radialnykh-aerostaticeskikh-opor-s-plavayushchimi-regulyatorami> (accessed 02 April 2021) (in Russ.).
  13. Nosko P., Breshev V., Fil P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose. *TEKA Commission of motorization in agriculture*, 2008, vol. VIIIA, pp. 126–133.
  14. Klimentov Yu.S. *Gazostaticheskie opory s sistemoy stabilizatsii polozheniya vala i rasshirennym diapazonom nagruzok*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Gasostatic bearings with a system for stabilizing the shaft position and an extended load range. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Vladimir, 2009. 176 p. Available at: <http://www.dslib.net/mashyno-vedenie/gazostaticheskie-opory-s-sistemoj-stabilizatsii-polozheniya-vala-i-rasshirennym.html> (accessed 02 April 2021) (in Russ.).
  15. Kosmylin A.V., Shchetinin V.S. Carrying capacity of gas-magnetic bearings for high-speed spindles. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1252–1253.
  16. Kosmylin A.V., Shchetinin V.S. Influence of the magnetic force in gas-magnetic bearings on the operation of high-speed spindles in metalworking equipment. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 5, pp. 451–452.
  17. Shalomov V.I. O vliyaniy nekotorykh parametrov gazovykh opor na vykhodnye kharakteristiki shpindelnykh uzlov shlifovalnykh stankov [On the effect of some parameters of gas bearing on the output characteristics of spindle units grinding machines]. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2012, no. 3, pp. 32–36 (in Russ.).
  18. Khvostikov A.S., Shchetinin V.S. Primenenie veyvlet-analiza dlya diagnostiki metodom akusticheskoy emissii pri silnom zashumlenii signala [Application of wavelet analysis for diagnostics by the method of acoustic emission in case of strong signal noise]. *Nauchnoe obozrenie*, 2007, no. 6, pp. 63–65 (in Russ.).
  19. Gribinichenko M.V., Kurensky A.V., Fershalov Yu.Ya. Obobshchennaya matematicheskaya model osevykh podshipnikov s gazovoy smazkoy elementov sudovykh energeticheskikh ustanovok [The generalized mathematical model of axial bearings with gas lubrication of ship power plant elements]. *Marine intellectual technologies*, 2011, special issue, no. 1, pp. 21–23 (in Russ.).
  20. Guskov A.M., Poshekhonov R.A. Segmentnaya model dlya rascheta sfericheskikh aerostaticeskikh opor [Segment model of spherical aerostatic bearings]. *Science & education*, 2011, no. 12. Available at: <http://www.techomag.edu.ru/doc/286475.html> (accessed 17 March 2021) (in Russ.).
  21. Kovensky A.E., Basiniuk V.L., Hlazunova H.A. Monitoring i upravlenie parametrami kolebaniy vysokoskorostnogo elektrotroshpindelya na aerostaticeskikh podshipnikovykh oporakh [Monitoring and control of oscillations properties of high-speed electric spindle on aerostatic bearing supports]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 154–158 (in Russ.).
  22. Poshekhonov R.A., Lapshin V.V., Zaharevich E.M., Kirianov V.P. Udar'naya diagnostika aerostaticeskogo shpindel'nogo uzla so sfericheskimi oporami [Impact diagnostic of aerostatic spindle unit with aerostatic bearings]. *Science & education*, 2014, no. 7. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/717582.html> (accessed 17 March 2021) (in Russ.).
  23. *Lektsii po fizike. Polnyy kurs lektsiy po fizike* [Physics lectures. A complete course of lectures on physics]. Available at: <http://physics-lectures.ru/mexanicheski-kolebaniya-i-volny/7-8-vynuzhdennye-kolebaniya> (accessed 15 April 2021) (in Russ.).
  24. Beschastnykh V.N. *Razrabotka metodov rascheta i eksperimentalnoe opredelenie kharakteristik radialnykh segmentnykh gazovykh podshipnikov dlya tyazhelykh rotorov GTU*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of a calculation method and experimental determination of the characteristics of radial segmental gas bearings for heavy rotors of gas turbine units. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2011. 144 p. (in Russ.).
  25. Kodnyanko V.A. *Tekhnologiya i kompyuternaya sreda avtomatizatsii modelirovaniya, rascheta i issledovaniya gazostaticeskikh opor*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Technology and computer environment for automation of modeling, calculation and research of gas-static supports. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Krasnoyarsk, 2005. 339 p. (in Russ.).