

УДК 621.81

А.Е. КОВЕНСКИЙначальник НТЦ-27¹

E-mail: aleko@kbttem.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» – заведующий лабораторией приводных систем и технологического оборудования²

E-mail: vladbas@mail.ru

Р.Е. ВОЛКОТРУБнаучный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования²

E-mail: aug1961r@mail.ru

¹ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь*Поступила в редакцию 11.06.2020.*

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ С АЭРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ. ЧАСТЬ 1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ

В статье приведены результаты исследований механизма возникновения осевых колебаний в механической системе «вал электрошпинделя с аэростатическими опорами — режущий алмазный диск — разрезаемая полупроводниковая пластина», предложена математическая модель возникающих при этом осевых колебаний вала электрошпинделя, учитывающая собственные частоты механических колебаний вала электрошпинделя, скорость рабочей подачи, соотношения осевых жесткостей алмазного диска и осевых аэростатических опор вала электрошпинделя, положение периферийной поверхности полупроводниковой пластины относительно направления рабочей подачи, и демпфирующие свойства рассматриваемой механической системы. Использование предложенной модели позволило получить инженерные зависимости, одна из которых позволяет оценить влияние приведенных выше параметров на деформацию режущего алмазного диска, величина которой связана с качеством начального участка прорезаемого паза, другая — возникающую при этом дополнительную к квазистатической, связанной с осевой составляющей силы резания, динамическую составляющую осевой нагрузки, являющуюся одним из основных источников возникновения трещин и сколов режущих кромок алмазных дисков и полупроводниковых пластин. Все это в совокупности позволит разработать методику адаптивного управления параметрами функционирования приводов, обеспечивающую требуемое качество прорезаемого паза при отсутствии сколов и трещин алмазного диска и полупроводниковой пластины.

Ключевые слова: алмазный диск, аэростатические опоры, кристаллы, колебания, резание, электрошпиндель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-48-54>

Введение. Использование электрошпинделей с аэростатическими опорами в прецизионном оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы позволяет использовать скорости вращения до 100 000 об/мин с одновременным обеспечением высокой плавности работы и, при высококачественной балансировке, минимизировать радиальные и осевые колебания. Это, в сочетании с высококачественным и отбалансированным в составе электрошпинделя инструментом [1] позволяет обеспечить высокое

качество прорезаемого паза в полупроводниковой пластине, требования к которому по мере миниатюризации размеров кристалла, толщины режущего алмазного диска и увеличения скорости резания постоянно растут.

При разделении полупроводниковых пластин на кристаллы в процессе врезания алмазного круга в полупроводниковую пластину вне оси ее симметрии в направлении резания всегда возникают импульсные осевые нагрузки, вследствие которых при высоких скоростях резания могут возникать

сколы и трещины на пластине и режущем алмазном диске, а также осевые колебания. Последние в ряде случаев могут приводить к возникновению трещин в прилегающих к зоне резания поверхностях пластины, и интенсивному износу режущего слоя алмазного диска.

Расчетам и исследованиям процессов колебаний вала скоростного электрошпинделя посвящено значительное число научных исследований [1–17]. Так, в работе [1], приведены результаты исследований радиальных и осевых колебаний вала скоростного электрошпинделя на аэростатических подшипниковых опорах, во многом определяющих условия начального взаимодействия режущего алмазного диска толщиной 20–50 мкм с полупроводниковой пластиной при ее разделении на кристаллы. Авторами рассмотрены неблагоприятные условия, приводящие к сколам и трещинам на полупроводниковой пластине и (или) алмазном диске, а в ряде случаев — к их разрушению. Установлено влияние частот вращения вала и углового положения режущего алмазного диска на их интенсивность. Показано, что интенсивностью этих колебаний можно эффективно управлять путем внешней визуализации и (или) регистрации встроенными средствами, анализа параметров этих колебаний и выбора, в том числе автоматизированного, рациональных частот вращения и подбора углового положения режущего алмазного диска при наладке оборудования.

В работе [2] приведены результаты исследования жесткостных параметров подшипниковых опор прецизионных скоростных электрошпинделей. Показано, что эти параметры изменяются нелинейно в степенной функции и имеют определенные максимальные величины. Отмечено, что к более перспективному направлению развития в этой области можно отнести создание электрошпинделя с комбинированными аэростатическими подшипниковыми опорами и опорами скольжения, а также разработку конструкции такого шпинделя. Его использование позволит существенно расширить технические возможности управления качеством скоростной лезвийной обработки плоских поверхностей, которое достигается управлением не только тепловыми режимами, величинами жесткости системы «станок — приспособление — инструмент — деталь», но и скоростями резания в диапазоне величин, недостижимом для известных технических решений.

Авторами работы [3] проведен анализ особенностей подшипниковых узлов, результаты которого показали, что в прецизионных высокоскоростных электрошпинделях в ряде случаев технически обоснованно могут быть использованы комбинированные подшипниковые опоры, включающие современные радиально-упорные подшипники и, например, аэростатические подшипники, при этом целесообразно использование предвари-

тельного натяга и создание в процессе обработки дополнительного осевого нагружения с автоматизированным управлением процессом изменения жесткостных параметров с использованием специальных алгоритмов.

Работы [4–6, 8–11, 13, 14, 16, 17] посвящены моделированию и расчету подшипниковых опор скоростных электрошпинделей, [1, 4, 7] — мониторингу параметров их функционирования.

Анализ приведенных выше публикаций показывает, что исследования колебаний электрошпинделей на аэростатических опорах осуществляется без учета влияния жесткости упругоподатливых алмазных дисков, что существенно сужает возможности использования полученных результатов при выборе их рациональных конструктивных параметров и режимов функционирования, причем во многом комплексное решение этой проблемы может быть достигнуто путем разработки и исследований математической модели осевых колебаний системы «вал электрошпинделя — алмазный диск».

Целью исследований являлась разработка математической модели осевых колебаний вала электрошпинделя на аэростатических опорах при импульсном осевом нагружении с учетом влияния на их параметры жесткости алмазного диска и режимов функционирования.

Методика исследований. Общий вид используемых в изготавливаемом ОАО «Планар» оборудовании для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы электрошпинделей фирмы Colibri, их конструктивная схема, формализованная схема механической системы «вал — диск» для разработки математической модели осевых колебаний и схема взаимодействия алмазного режущего диска с полупроводниковой пластиной при врезании показаны на рисунке.

При движении элемента *A* (рисунок *a*) со скоростью рабочей подачи стола *V* масса вала смещается в направлении оси на величину *x*. Тогда уравнение равновесия сил, действующих на массу *m*, может быть записано в виде:

$$C_d(Vt \cdot \operatorname{tg} \alpha - x) - k_d \dot{x} = m\ddot{x} + k_b \dot{x} + C_b x, \quad (1)$$

где C_d , C_b — жесткости в направлении оси вала электрошпинделя соответственно алмазного диска при локализованном нагружении его режущей алмазной кромки и аэростатической опоры, Н/мм; V — скорость рабочей подачи стола при разделении полупроводниковой пластины на кристаллы, мм/с; t — текущее время, с; α — угол между направлением движения режущего алмазного диска и поверхностью полупроводниковой пластины в начальный момент их взаимодействия, рад; x , \dot{x} , \ddot{x} — смещение (мм), скорость смещения (мм/с) и ускорение (мм/с²) соответственно в осевом направлении центра масс вала электрошпинделя в результате взаимодействия режущего алмазного диска с полупроводниковой пластиной; m — масса электрошпинделя, кг;

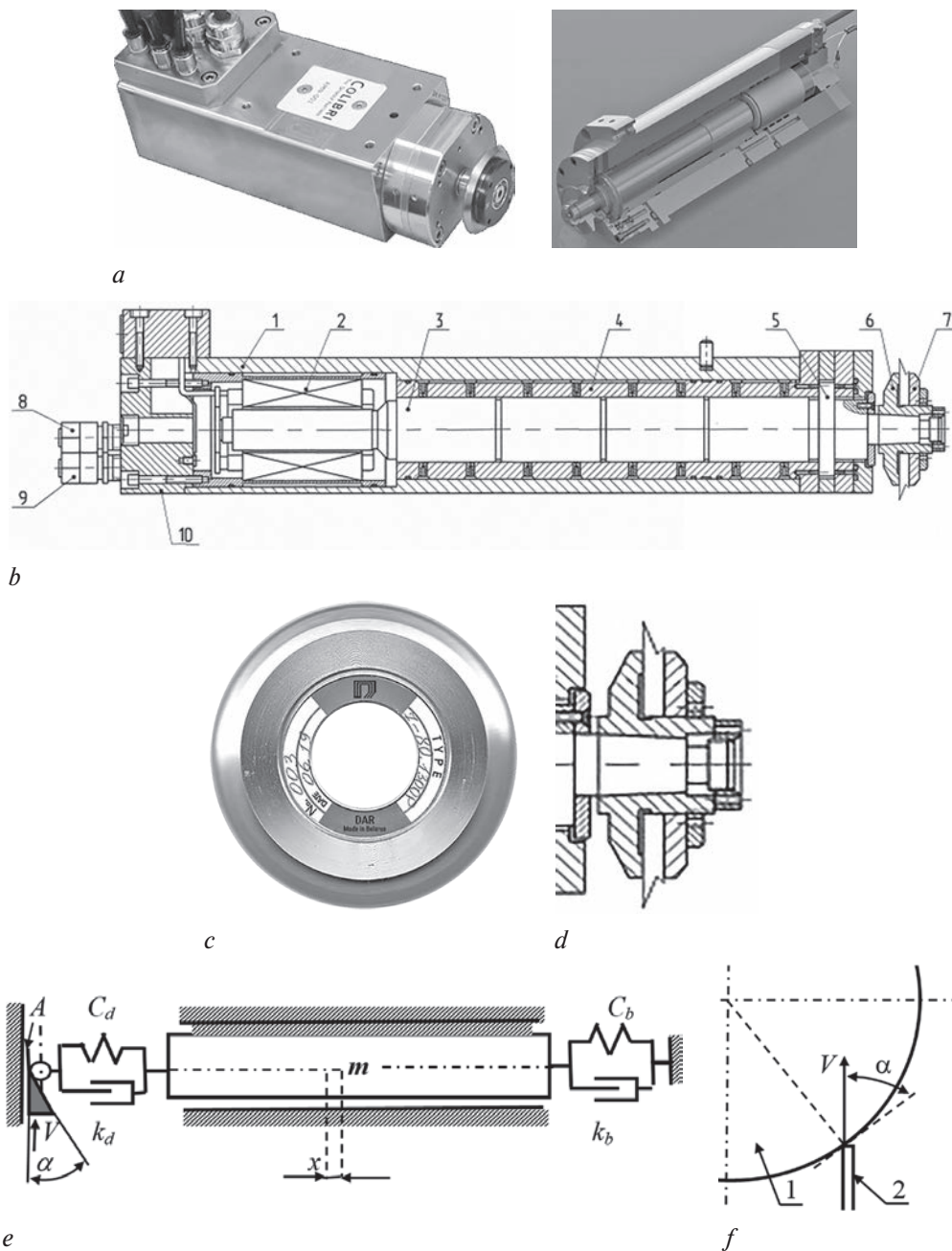


Рисунок — Общий вид (а) и конструктивная схема (б) электрошпинделя фирмы Colibri (1 — корпус; 2 — статор; 3 — ротор; 4 — подшипник; 5 — осевой подшипник; 6, 7 — оправка; 8, 9 — штуцер; 10 — крышка), алмазный диск (с) и конструктивная схема его крепления (d), формализованная для разработки математической модели осевых колебаний схема механической системы «вал — диск» (е) и схема взаимодействия алмазного режущего диска (1) с полупроводниковой пластиной (2) при врезании (f)

Figure — General view (a) and design scheme (b) of the Colibri electric spindle (1 — body; 2 — stator; 3 — rotor; 4 — bearing; 5 — axial bearing; 6, 7 — mandrel; 8, 9 — fitting; 10 — cover), diamond disk (c) and its mounting design scheme (d), formalized for the development of a mathematical model of axial vibrations, the scheme of the mechanical system “shaft — disk” (e) and the scheme of interaction of the diamond cutting disk (1) with a semiconductor wafer (2) when embedding (f)

k_d, k_b — коэффициенты сопротивления осевому смещению вала электрошпинделя, связанные с демпфирующими свойствами соответственно режущего алмазного диска и осевой аэростатической опоры, кг/с.

Приведем уравнение (1) к виду

$$m\ddot{x} + \dot{x}(k_b + k_d) + x(C_b + C_d) = C_d V t \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

и с его учетом получим дифференциальное уравнение колебаний вала электрошпинделя в осевом направлении:

$$\ddot{x} + \omega_b u_b (1 + k_\omega k_u) \dot{x} + \omega_b^2 (1 + k_\omega) x = \omega_b^2 k_c V t \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где $\omega_b = \sqrt{C_b/m}$, $\omega_d = \sqrt{C_d/m}$ — круговые частоты механических колебаний вала электрошпинделя с собственными частотами, обусловленными упругими свойствами осевой аэростатической опоры и режущего алмазного диска соответственно, рад/с; $u_d = k_d/m$, $u_b = k_b/m$ — коэффициенты затухания при осевых механических колебаниях вала электрошпинделя с собственной частотой, обусловленные демпфирующими свойствами

осевой аэростатической опоры и вязкоупругими свойствами материала алмазного режущего диска соответственно, c^{-1} ; $k_\omega = \omega_d/\omega_b$, $k_u = u_d/u_b$, $k_C = C_d/C_b$ — безразмерные соотношения круговых частот, безразмерных коэффициентов затухания и жесткостей режущего алмазного диска и аэростатической опоры соответственно.

В общем виде решение уравнения (3) может быть записано в следующем виде:

$$x = e^{-\frac{\omega_b u_b (1+k_\omega k_u)}{2} t} \left[A \sin \left(\omega_b t \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} \right) + B \cos \left(\omega_b t \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} \right) + k_C \frac{V \cdot \text{tg} \alpha}{\omega_b (1+k_\omega)} \left[\omega_b t - \frac{u_b (1+k_\omega k_u)}{(1+k_\omega)} \right] \right] \quad (4)$$

Тогда для начальных условий при $t = 0$, $x = 0$ и $\dot{x} = 0$ после приведения уравнения (4) к удобному для исследований безразмерному виду с использованием зависимости периода осевых механических колебаний вала с собственной частотой $T = 2\pi/\omega_b$ получим:

$$\frac{x \cdot \omega_b}{V} = \frac{k_C \cdot \text{tg} \alpha}{1+k_\omega} \times \left[\begin{aligned} & -e^{-\pi u_b (1+k_\omega k_u) \frac{t}{T}} \times \\ & \frac{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{2(1+k_\omega)}}{\sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}}} \times \\ & \times \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} \right) - \\ & - \frac{u_b (1+k_\omega k_u)}{(1+k_\omega)} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} \right) \\ & + 2\pi \frac{t}{T} - \frac{u_b (1+k_\omega k_u)}{(1+k_\omega)} \end{aligned} \right] + = \frac{k_C \cdot \text{tg} \alpha}{1+k_\omega} \times \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} - \varphi_0 \right) + \left[\begin{aligned} & -A_0 e^{-\pi u_b (1+k_\omega k_u) \frac{t}{T}} \times \\ & + 2\pi \frac{t}{T} - \frac{u_b (1+k_\omega k_u)}{(1+k_\omega)} \end{aligned} \right]$$

где

$$A_0 = \sqrt{\frac{1 - k_\omega \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{(1+k_\omega)^2}}{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}}};$$

$$\arctg \varphi_0 = \frac{u_b (1+k_\omega k_u) \sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}}}{(1+k_\omega) \left\{ 1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{2(1+k_\omega)} \right\}}.$$

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ зависимости (5) показывает следующее:
 - параметры осевых колебаний с собственными частотами механической системы «алмазный диск — вал аэростатического подшипника» комплексно зависят от скорости рабочей подачи V , соотношения осевых жесткостей k_C и демпфирующих свойств режущего алмазного диска и аэростатической осевой опоры электрошпинделя, положения периферийной поверхности полупроводниковой пластины относительно направления рабочей подачи, определяющей угол α ;

- с учетом того, что стол, на котором крепится полупроводниковая пластина, имеет массу 15–16 кг и его смещениями в направлении оси вала электрошпинделя можно пренебречь, наиболее существенное влияние на параметры взаимодействия режущего алмазного круга с полупроводниковой пластиной оказывают осевая деформация круга и осевые ускорения вала электрошпинделя, определяющие динамическую составляющую нагрузки, а также взаимное положение режущего алмазного диска и пластины, определяющие угол α .

Анализ источников научно-технической литературы показал [17], что осевая жесткость аэростатических подшипников и, как следствие, частота собственных колебаний вала электрошпинделя, а также логарифмический декремент затухания существенно зависят от давления сжатого воздуха. Авторами [17] показано, что при изменении давления сжатого воздуха от 0,2 до 0,9 МПа частоты собственных колебаний возрастают от 455 до 584 Гц, а логарифмический декремент колебаний λ снижается с 0,82 до 0,5, т. е. связанные с ними зависимость $u_b = \lambda/\pi$ величины безразмерных коэффициентов затухания колебаний уменьшаются с 0,26 до 0,1.

Поскольку осевая жесткость алмазного диска намного ниже осевой жесткости аэростатической опоры электрошпинделя, то, соответственно, ω_d существенно ниже ω_b и $k_\omega = \omega_d/\omega_b \ll 1$. При этом величина $k_u = u_d/u_b$ может быть условно принята равной единице. Тогда даже при максимальной

величине $u_d \approx 0,26$, $\sqrt{1 - \frac{[u_b (1+k_\omega k_u)]^2}{4}} \approx 1$, $A_0 \approx 1$; $\varphi_0 = 0,26$ рад, $\varphi_1 \approx \pi/2$.

Тогда, с приемлемой для инженерной практики точностью

$$\frac{x \cdot \omega_b}{V} \approx k_c \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left[e^{-\pi u_b \frac{t}{T}} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi_0 \right) + 2\pi \frac{t}{T} - u_b \right], \quad (6)$$

максимальная величина смещения достигается при

$$\cos \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi_0 \right) = 1, \quad (7)$$

т. е. при

$$\frac{t}{T} = \frac{\varphi_0}{2\pi} \quad (8)$$

или

$$t^* = \frac{\varphi_0}{\omega_d}. \quad (9)$$

Тогда

$$x_{\max} \approx k_c \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{V}{\omega_b} (0,96 - u_b). \quad (10)$$

С учетом приведенного выше, максимальные величины деформации d_{\max} алмазного диска и действующего на него в этот момент усилия F_{\max} , обусловленные осевыми механическими колебаниями вала электрошпинделя с собственной частотой, могут быть определены из зависимостей:

$$\delta_{\max} = V \cdot t^* \operatorname{tg} \alpha - x_{\max} \approx \frac{V \operatorname{tg} \alpha}{\omega_b} [\varphi_0 - k_c (0,96 - u_b)]; \quad (11)$$

$$F_{\max} = \delta_{\max} C_d \approx C_d \frac{V \operatorname{tg} \alpha}{\omega_b} [\varphi_0 - k_c (0,96 - u_b)]. \quad (12)$$

Заключение. Установлен механизм возникновения осевых колебаний в механической системе «вал электрошпинделя с аэростатическими опорами — режущий алмазный диск — разрезаемая полупроводниковая пластина», заключающийся в возникновении импульсной осевой силы при врезании под углом в полукруглую поверхность полупроводниковой пластины линейно движущегося упругоподатливого в осевом направлении режущего алмазного диска, жестко связанного с валом электрошпинделя, установленным в корпусе на упругие осевые и радиальные аэростатические подшипники.

Разработана математическая модель, учитывающая параметры осевых механических колебаний с собственными частотами вала электрошпинделя, скорость рабочей подачи алмазного режущего диска, соотношения осевых жесткостей алмазного диска и вала электрошпинделя, положение периферийной поверхности полупроводниковой пластины относительно направления рабочей подачи и демпфирующие свойства механической системы.

Использование предложенной модели позволило получить инженерные зависимости. С использованием одной из них (11) можно оценить влияние на деформацию режущего алмазного диска осевых колебаний вала электрошпинделя на аэростатических опорах (величина деформации

связана с качеством обработки начального участка прорезаемого паза). Другая зависимость (12) позволяет оценить дополнительную к квазистатической, связанной с осевой составляющей силы резания, динамическую составляющую осевой нагрузки на режущий алмазный диск и полупроводниковую пластину, являющуюся одним из основных источников возникновения трещин и сколов режущих алмазных дисков и полупроводниковых пластин.

Использование разработанной модели позволяет установить закономерности, комплексно связывающие между собой скорость рабочей подачи режущего алмазного диска с его осевой жесткостью и дополнительной нагруженностью, обусловленные осевыми колебаниями в механической системе и разработать методику адаптивного управления параметрами функционирования приводов стола и электрошпинделя, обеспечивающую требуемое качество прорезаемого паза при отсутствии сколов и трещин алмазного диска и полупроводниковой пластины.

Список литературы

1. Ковенский, А.Е. Мониторинг и управление параметрами колебаний высокоскоростного электрошпинделя на аэростатических подшипниковых опорах / А.Е. Ковенский, В.Л. Басинюк, А.А. Глазунова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 154–158.
2. Некоторые особенности прецизионной планаризации пластин / С.Б. Школык [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 86–89.
3. Некоторые особенности подшипниковых узлов прецизионных высокоскоростных электрошпинделей / В.Л. Басинюк [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 6 — С. 173–176.
4. Щетинин, В.С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомасляных опорах металлорежущих станков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / В.С. Щетинин; Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. — Комсомольск-на-Амуре, 2011. — 35 с.
5. Кузнецов, Н.К. Идентификация параметров и моделирование динамики трехмассовой мехатронной системы / Н.К. Кузнецов, А.Ю. Перепелыгина, Р.В. Кононенко // Вестн. ИрГТУ. — 2010. — № 3. — С. 6–11.
6. Махов, А.А. Динамическая модель шпинделя на аэростатических опорах / А.А. Махов, Г.Н. Позняк // Вестн. РУДН. Сер.: Инженерные исследования. — 2004. — № 1(8). — С. 76–82.
7. Ударная диагностика аэростатического шпиндельного узла со сферическими опорами [Электронный ресурс] / Р.А. Пошехонов [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014. — № 7. — Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717582.html>. — Дата доступа: 02.06.2020.
8. Пошехонов, Р.А. Примеры расчета сферической аэростатической опоры с учетом смещений и скорости шпинделя [Электронный ресурс] / Р.А. Пошехонов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2012. — № 6. — Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/272.html>. — Дата доступа: 01.06.2020.
9. Частично пористые газостатические опоры шпиндельных узлов. Теория и эксперимент: монография [Электрон-

- ный ресурс] / А.В. Космынин [и др.] // Академия Естествознания. — 2011. — Режим доступа: <http://www.rae.ru/monographs/119>. — Дата доступа: 01.06.2020.
10. Гуськов, А.М. Сегментная модель для расчета сферических аэростатических опор [Электронный ресурс] / А.М. Гуськов, Р.А. Пошехонов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2011. — № 12. — Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/286475.html>. — Дата доступа: 01.06.2020.
 11. Пошехонов, Р.А. Расчет сферических аэростатических опор при заданном смещении и скорости шпинделя [Электронный ресурс] / Р.А. Пошехонов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2012. — № 10. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-sfericheskikh-aerostaticheskikh-opor-pri-zadannom-smeschenii-i-skorosti-shpindelya>. — Дата доступа: 01.06.2020.
 12. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин [и др.]. — М.: Академия естествознания, 2005. — 218 с.
 13. Numerical simulation of slider air bearings based on a mesh-free method for HDD applications/ L. Xuhong [et al.] // *Microsystem Technologies*. — 2005. — Vol. 11, No. 8–10. — Pp. 797–804.
 14. Stepanyants, L.G. Method of Theoretical Investigation of Externally Pressurized Gas-Lubricated Bearings / L.G. Stepanyants, N.D. Zablotsky, I.E. Sipekov // *Trans. ASME. Journal of Lubrication Technology*. — 1969. — Vol. 91, No. 1. — Pp. 166–170.
 15. Шатохин, С.Н. Теория и методы проектирования адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих металлорежущих станков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02 / С.Н. Шатохин; СФУ. — Красноярск, 2010. — 50 с.
 16. Усакин, К.С. Моделирование динамического состояния шпиндельного узла прецизионного токарного модуля для выявления ситуаций, при которых необходима дополнительная балансировка для минимизации уровня вибрации / К.С. Усакин, А.А. Игнатъев // *Вестн. Саратовского гос. техн. ун-та*. — 2010. — Т. 2, № 1(45). — С. 89–97.
 17. Хомяков, В.С. Моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов. Обработка конструкционных материалов в машиностроении / В.С. Хомяков, Н.А. Кочинев, Ф.С. Сабиров // *Изв. ТулГУ. Технич. науки*. — 2011. — Вып. 3. — С. 251–259.

KOVENSKY Alexander E.

Head of STC-27¹

Email: aleko@kbtem.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 Equipment²

E-mail: vladbas@mail.ru

VOLKOTRUB Ryta E.

Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment²

E-mail: aug1961r@mail.ru

¹Planar OJSC, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 11 June 2020.

METHOD OF SELECTING THE OPERATION PARAMETERS OF ELECTRIC SPINDLE WITH AEROSTATIC SUPPORTS FOR SEPARATION OF SEMICONDUCTOR PLATES TO CRYSTALS. PART 1. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AXIAL OSCILLATIONS OF THE ELECTRIC SPINDLE

The article presents the results of studies of the mechanism of the occurrence of axial vibrations in the mechanical system “electrospindle shaft with aerostatic bearings — cutting diamond disk — cuttable semiconductor wafer”. A mathematical model of the resulting axial vibrations of the electrospindle shaft is proposed, taking into account the natural frequencies of mechanical vibrations of the electrospindle shaft, the working feed rate, the ratio of the axial stiffness of the diamond disk and the axial aerostatic bearings of the electrospindle shaft, the position of the peripheral surface of the semiconductor wafer relative to the direction of the working feed, and the damping properties of the mechanical system under consideration. The use of the proposed model made it possible to obtain engineering dependences, one of which have the possibility to estimate the influence of the above parameters on the deformation of the cutting diamond disk, the value of which is related to the quality of the initial section of the cut groove, the other, which arises in addition to the quasi-static, related to the axial component of the cutting force, dynamic component of the axial load, which is one of the main sources occurrence of cracks and chips of the cutting edges of diamond disks and semiconductor wafers. All of this, in aggregate, will make it possible to develop an adaptive

methodology for controlling the functioning parameters of the drives, which ensures the required quality of the slot to be cut in the absence of chips and cracks in the diamond disk and semiconductor wafer.

Keywords: diamond disk, aerostatic bearings, crystals, vibrations, cutting, electrospindle

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-48-54>

References

- Kovensky A.E., Basiniuk V.L., Glazunova A.A. Monitoring i upravlenie parametrami kolebaniy vysokoskorostnogo elektroshtindelya na aerostaticeskikh podshipnikovykh oporakh [Monitoring and control of oscillation parameters of a high-speed electrospindle on aerostatic bearings]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 154–158 (in Russ.).
- Shkolyk S.B., Zaitsev V.A., Tsyrukun D.P., Volkotrub R.E. Nekotorye osobennosti pretsizionnoy planarizatsii plastin [Some features of precision planarization of plates]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 86–89 (in Russ.).
- Basiniuk V.L., Volkotrub R.E., Lobkova M.P., Shkolyk S.B., Tsyrukun D.P. Nekotorye osobennosti podshipnikovykh uzlov pretsizionnykh vysokoskorostnykh elektroshtindel'ev [Some features of the bearing assemblies of precision high-speed electrospindles]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2017, iss. 6, pp. 173–176 (in Russ.).
- Shchetinin V.S. *Nauchnoe obosnovanie sozdaniya i razrabotka vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov na gazomagnitnykh oporakh metallozhushchikh stankov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific rationale for the creation and development of high-speed spindle assemblies on the gas-magnetic supports of metal-cutting machines. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2011. 35 p. (in Russ.).
- Kuznetsov N.K., Pereplygina A.Yu., Kononenko R.V. Identifikatsiya parametrov i modelirovanie dinamiki trekhmassovoy mekhatronnoy sistemy [Parameters identification and simulation of three-mass mechatronic system dynamics]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 3, pp. 6–11 (in Russ.).
- Makhov A.A., Poznyak G.N. Dinamicheskaya model shpindel'ya na aerostaticeskikh oporakh [Dynamic model of a spindle on aerostatic bearings]. *RUDN journal of engineering researches*, 2004, no. 1(8), pp. 76–82.
- Poshekhonov R.A., Lapshin V.V., Zakharevich E.M., Kiryanov V.P. Udarnaya diagnostika aerostaticeskogo shpindel'nogo uzla so sfericheskimi oporami [Impact diagnostics of an aerostatic spindle unit with spherical bearings]. *Science and education*, 2014, no. 7. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717582.html> (accessed 06 February 2020) (in Russ.).
- Poshekhonov R.A. Primery rascheta sfericheskoy aerostaticeskoy opory s uchetom smeshcheniy i skorosti shpindel'ya [Spherical aerostatic bearing calculation examples, taking into account the spindle velocity and displacement]. *Engineering journal: science and innovation*, 2012, no. 6. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/272.html> (accessed 06 January 2020) (in Russ.).
- Kosmynin A.V., Vinogradov S.V., Vinogradov V.S., Schetinin V.S., Smirnov A.V. *Chastichno poristye gazostaticheskie opory shpindelnykh uzlov. Teoriya i eksperiment* [Partially porous gas-static supports of spindle assemblies. Theory and experiment]. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2011. Available at: <http://www.rae.ru/monographs/119> (accessed 06 January 2020) (in Russ.).
- Guskov A.M., Poshekhonov R.A. Segmentnaya model dlya rascheta sfericheskikh aerostaticeskikh opor [Segment model for calculating spherical aerostatic supports]. *Science and education*, 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/286475.html> (accessed 06 January 2020) (in Russ.).
- Poshekhonov R.A. Raschet sfericheskikh aerostaticeskikh opor pri zadannom smeshchenii i skorosti shpindel'ya [Calculation of spherical aerostatic bearings at a given offset and spindle speed]. *Science and education*, 2012, no. 10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-sfericheskikh-aerostaticeskikh-opor-pri-zadannom-smeshchenii-i-skorosti-shpindel'ya> (accessed 06 January 2020) (in Russ.).
- Kosmynin A.V., Kabaldin Yu.G., Vinogradov V.S., Chernobay S.P. *Ekspluatatsionnye kharakteristiki gazovykh opor vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov* [Operational characteristics of gas supports of high-speed spindle units]. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2005. 218 p. (in Russ.).
- Li X., Du H., Bo L., Gih K.L. Numerical simulation of slider air bearings based on a mesh-free method for HDD applications. *Microsystem Technologies*, 2005, vol. 11, no. 8–10, pp. 797–804.
- Stepanynts L.G., Zablotsky N.D., Sipenkov I.E. Method of Theoretical Investigation of Externally Pressurized Gas-Lubricated Bearings. *Transactions of ASME. Journal of Lubrication Technology*, 1969, vol. 91, no. 1, pp. 166–170.
- Shatokhin S.N. *Teoriya i metody proektirovaniya adaptivnykh gidrostaticeskikh i aerostaticeskikh shpindelnykh opor i napravlyayushchikh metallozhushchikh stankov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Theory and design methods of adaptive hydrostatic and aerostatic spindle bearings and guides for metal cutting machines. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Krasnoyarsk, 2010. 50 p. (in Russ.).
- Usakin K.S., Ignatyev A.A. Modelirovanie dinamicheskogo sostoyaniya shpindel'nogo uzla pretsizionnogo tokarnogo modulya dlya vyyavleniya situatsiy, pri kotorykh neobkhodima dopolnitelnaya balansirovka dlya minimizatsii urovnya vibratsii [Simulation of dynamic machining unit precision turning module for identification of situations in which additional balance is necessary for vibration minimization]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 2, no. 1(45), pp. 89–97 (in Russ.).
- Khomyakov V.S., Kochinev N.A., Sabirov F.S. Modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie dinamicheskikh kharakteristik shpindelnykh uzlov. Obrabotka konstruksionnykh materialov v mashinostroenii [Modeling and experimental investigation of spindle dynamic performance. Processing of structural materials in mechanical engineering]. *News of the Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2011, iss. 3, pp. 251–259 (in Russ.).