

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.7.054.43; 621.671

doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-12-22

## СИНТЕЗ БЕСКОНТАКТНЫХ ПРИВОДОВ РАБОЧИХ МАШИН И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК

Владимир Евгеньевич Брешев<sup>1✉</sup>, Юлия Сергеевна Долженко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, Россия

<sup>1</sup> veb\_lug@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3277-8427>

<sup>2</sup> j.sergeevna01@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6501-0641>

### Аннотация

Цель исследования: синтез бесконтактных приводов различного назначения, шпинделя на газостатических подшипниках станка шлифования и безвального динамического насоса, исследование их параметров и характеристик. В работе решаются задачи разработки методики синтеза бесконтактных приводов для рабочих машин различного назначения, выполнения компьютерных экспериментов по исследованию параметров и характеристик газостатических подшипников шпинделя и гидродинамических параметров потока жидкости во вращающемся рабочем колесе насоса, разработки математической модели устойчивости кольцевого ротора в силовом поле. Исследования выполняются двумя теоретическими методами – аналитическим методом по классическим методикам расчётов и вычислительными компьютерными экспериментами в САЕ-программах машиностроительных САПР, а адекватность разработанной математической модели устойчивости кольцевого ротора проверяется в натурном эксперименте. Новизна работы заключается в разработке обобщённой методики синтеза бесконтактных приводов рабочих машин, в которой используются два независимых метода теоретических исследований, а также предложенной математической модели устойчивости вращающегося

кольцевого ротора в силовом поле. Приведены результаты исследований параметров и характеристик газостатических подшипников шпинделя и центробежного безвального насоса двумя методами, описан обобщённый алгоритм их синтеза. Выводы: разработана обобщённая методика синтеза бесконтактных приводов различного назначения – шпинделей на газостатических подшипниках и «безвальных» динамических насосов, которые являются высокоскоростными, энергоэффективными и обладают высокой надёжностью ввиду фактического отсутствия износа подвижных элементов конструкций; представлены результаты исследования параметров и характеристик газостатических подшипников шпинделя и гидродинамических параметров потока жидкости во вращающемся рабочем колесе безвального насоса, полученные двумя методами; разработана математическая модель устойчивости вращающегося кольцевого ротора без механических опор, а её адекватность экспериментально подтверждена демонстрацией устойчивого вращения в жидкости рабочего колеса в форме кольцевого ротора.

**Ключевые слова:** синтез, привод, метод, эксперимент, математическая модель.

Ссылка для цитирования:

Брешев В.Е. Синтез бесконтактных приводов рабочих машин и исследование их параметров и характеристик / В.Е. Брешев, Ю.С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 12. – С. 12-22. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-12-22.

Original article

Open Access Article

## SYNTHESIS OF CONTACTLESS DRIVES OF MACHINE TOOLS AND STUDY OF THEIR PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

Vladimir Evgenyevich Breshev<sup>1✉</sup>, Yulia Sergeevna Dolzhenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Russia

<sup>1</sup> veb\_lug@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3277-8427>

<sup>2</sup> j.sergeevna01@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6501-0641>

## Abstract

The study objective is to synthesize contactless drives for various purposes, a spindle on gas-static bearings of a grinding machine and a non-stop dynamic pump, and to study their parameters and characteristics. The paper solves the problems of developing a method for synthesizing contactless drives for machine tools for various purposes, performing computer experiments to study the parameters and characteristics of gas-static spindle bearings and hydrodynamic parameters of fluid flow in a rotating pump impeller, and developing a mathematical model for the stability of an annular rotor in a force field. The research is carried out by two theoretical methods – the analytical method according to classical calculation methods and computational computer experiments in CAE-programs of machine-building CAD, and the adequacy of the developed mathematical model of stability of the annular rotor is checked in a field experiment. The novelty of the work lies in the development of a generalized synthesis technique for contactless drives of machine tools, which uses two independent methods of theoretical research, as well as the proposed mathematical

model of stability of a rotating annular rotor in a force field. The results of studying the parameters and characteristics of gas-static bearings of a spindle and a centrifugal pump by two methods are presented, and a generalized algorithm for their synthesis is described. Conclusions: a generalized synthesis technique has been developed for contactless drives for various purposes – spindles on gas-static bearings and non-stop dynamic pumps, which are high-speed, energy-efficient and highly reliable due to the actual absence of wear on movable structural elements; the study results of the parameters and characteristics of gas-static spindle bearings and hydrodynamic parameters of fluid flow in a rotating impeller of a non-stop pump are presented, obtained by two methods; a mathematical model of the stability of a rotating annular rotor without mechanical supports has been developed, and its adequacy has been experimentally confirmed by demonstrating stable rotation in the fluid of an annular rotor impeller.

**Keywords:** synthesis, drive, method, experiment, mathematical model.

## Reference for citing:

Breshev VE, Dolzhenko YuS. Synthesis of contactless drives of machine tools and study of their parameters and characteristics. *Transport Engineering*. 2025;12:12-22. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-12-22.

## Введение

Синтез бесконтактных приводов является актуальной задачей при разработке новых конструкций рабочих машин различного назначения – шпинделей для шлифовальных станков, динамических насосов, компрессоров, турбодетандеров. В бесконтактных приводах подвижные элементы – роторы, валы и рабочие колёса вращаются без механического (твердотельного) контакта с неподвижными узлами, что достигается действием на них газодинамических, электромагнитных, гидродинамических и других сил. Такие силы, при действии на движущиеся валы или роторы, не предполагают механического контакта при функционировании. Отсутствие трения качения, полужидкостного или сухого трения определяет основные преимущества бесконтактных приводов – они, как правило, высокоскоростные, прецизионные, экономичные и долговечные [1-5]. Однако, расчёт и конструирование бесконтактных приводов является многопараметрическим синтезом и требует решения нескольких сложных научно-технических задач, которые не так актуальны для приводов традиционных кон-

струкций, например, на шарикоподшипниковых опорах и с использованием механических передач. Во-первых, это решение задачи устойчивости движения и положения валов и роторов при вращении на высокоскоростных режимах, разгоне и действии технологических сил при выполнении полезной работы или другими словами – задачи устойчивости движения [6-11]. Во-вторых, решение задачи повышения нагрузочной или несущей способности, которая меньше, чем у приводов с опорами качения или скольжения, или другими словами – задача повышения статической устойчивости [2, 6, 7, 11, 12] при выполнении полезной работы. В-третьих, необходимо исследовать силы, обеспечивающие движение и устойчивость положения (точность позиционирования) роторов и валов, а также параметры, которые в бесконтактных приводах имеют газо-, гидродинамическую или электромагнитную природу и сложное пространственное распределение. Это существенно затрудняет теоретический расчёт термодинамических, электродинамических параметров и интегральных характеристик – сил реакции, несущей

способности, жёсткости, вращающего момента, напора и производительности [6, 9, 11-13]. Решение третьей задачи требует определения эффективных подходов и надёжных методов при исследовании физических процессов, поэтому при синтезе бесконтактных приводов предложено одновременно использовать два независимых теоретических метода.

**Цель исследования:** синтез бесконтактных приводов различного назначения – шпинделя на газостатических подшипниках станка шлифования и безвального динамического насоса, исследование их параметров и характеристик.

**Постановка задачи.** Выполненные ранее исследования [1, 6, 9, 11] показали, что синтез бесконтактных приводов машин различного назначения требует решения аналогичных по содержанию задач и применения общих подходов к их решению. В данной работе рассматриваются шпиндель на газостатических подшипниках для высокоскоростной механической обработки (шлифования), а также принципиально новая конструкция динамического насоса, в котором рабочее колесо закрепляется на кольцевом роторе, а не на валу (так называемая «безвальная» конструкция). Вра-

щающийся часть (ротор) насоса совмещает в себе функции вторичного элемента асинхронного электродвигателя, опорной системы и рабочего органа – центробежного рабочего колеса. При этом рабочее колесо совершает устойчивое вращательное движение [6, 8, 9] и перекачивает жидкость без закрепления на валу и без механических опор. Для этого в работе решаются задачи разработки обобщённой методики синтеза бесконтактных приводов рабочих машин различного назначения, выполнения компьютерных экспериментов по исследованию параметров и характеристик газостатических подшипников шпинделя и гидродинамических параметров потока жидкости во вращающемся рабочем колесе насоса. Разрабатывается математическая модель устойчивого вращения кольцевого ротора в силовом поле, так как концепция создания безвального насоса подразумевает создание условий, при которых электромагнитные движущие силы, действующие на кольцевой ротор, приводят к главному моменту, создающему вращение рабочего колеса и главному вектору, обеспечивающему устойчивость его положения [6, 9].

## Методика исследований, модели и основные результаты

Синтез бесконтактных приводов рабочих машин, независимо от назначения включает два основных этапа – структурный синтез и параметрический.

*На первом этапе* определяется общее построение и структурный состав привода и машины в зависимости от общей идеи проектирования и технического задания. Выбираются конструктивные типы подвижного узла (вала или ротора) и рабочего органа. В зависимости от характера и распределения технологических нагрузок подбираются тип, количество и способ размещения бесконтактных опор (подшипников), а также тип и размещение двигательного устройства (электродвигателя или турбины).

В бесконтактных приводах такие структурные элементы как кольцевой ротор в станке резки монокристаллов или безвальном насосе [9] могут выполнять

функции инструмента или рабочего органа, опорной системы и ротора электродвигателя. В других бесконтактных приводах подшипники могут быть структурно и конструктивно обособлены от электродвигателя и рабочего органа, как в показанном на рис. 1 шпинделе [14], у которого радиальные газостатические подшипники, газостатический подпятник и электродвигатель являются различными структурными элементами и конструктивными узлами.

В новой конструкции безвального динамического насоса один структурный элемент – кольцевой ротор – совмещает в себе функции всей системы опор и вторичного элемента электродвигателя, а весь подвижный узел насоса состоит из сдвоенного центробежного колеса и кольцевого ротора [6] (рис. 2а).

Подвод жидкости осуществляется вдоль оси вращения рабочего колеса 1

сдвоенной симметричной конструкции, а на соединённом с ним плоскими спицами медном кольцевом роторе 2 создаются крутящий момент и восстанавливающие упругие силы (силы реакции) электромагнитной природы, которые удерживают колесо в центральном рабочем положении.

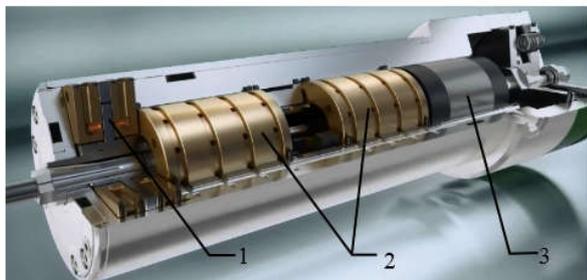


Рис.1. Высокоскоростной (до 125000 об/мин) шпиндель LS 125-62 компании Alfred Jäger GmbH на газостатических подшипниках: 1 – подпятник; 2 – радиальные подшипники; 3 – электродвигатель  
*Fig. 1. High-speed (up to 125000 rpm) spindle LS 125-62 from Alfred Jäger GmbH on gas-static supports: 1 – bearing plate; 2 – radial supports; 3 – electric motor*

Отвод жидкости производится радиально по периферии. При этом по поверхностям кольцевого ротора 2 действуют ещё и гидродинамические силы, создавая реакции «дополнительных» условных бесконтактных опор. Их действие основано на локальном повышении давления нагнетаемой рабочим колесом жидкости в сужающихся сечениях при смещении ротора 2 с колесом 1 от центрального положения в любом направлении.

На втором этапе создания бесконтактного привода выполняется параметрический синтез, позволяющий определить априорно конструктивные, силовые и технологические параметры приводов рабочих машин, а затем итерационно приближаясь, получить окончательные, соответствующие техническому заданию. Особенность методики исследований на данном этапе состоит в применении двух независимых методов расчёта – аналитического, а также вычислительного компьютерного эксперимента средствами САПР [11, 16, 17].

Применительно к шпинделям на газостатических подшипниках аналитическим методом является расчёт характери-

стик на основе приближённых решений уравнений Рейнольдса. Аналитический метод решает задачу определения характеристик в линейной постановке, с рядом существенных допущений (ламинарность течения газовой смазки, бесконечная длина подшипников, неизменность газодинамических параметров по ширине зазора и др.) [6, 12, 15].

Он удобен для прикидочных расчётов при определении априорных значений параметров газостатических подшипников, а также для верификации более точного и универсального метода исследования процессов течения газовой смазки в зазорах подшипников – компьютерных вычислительных экспериментов в САЕ-программах машиностроительных САПР [16, 17, 18] (рис. 3). Общий алгоритм (схема) синтеза шпинделей на газостатических подшипниках показана на рис. 4.

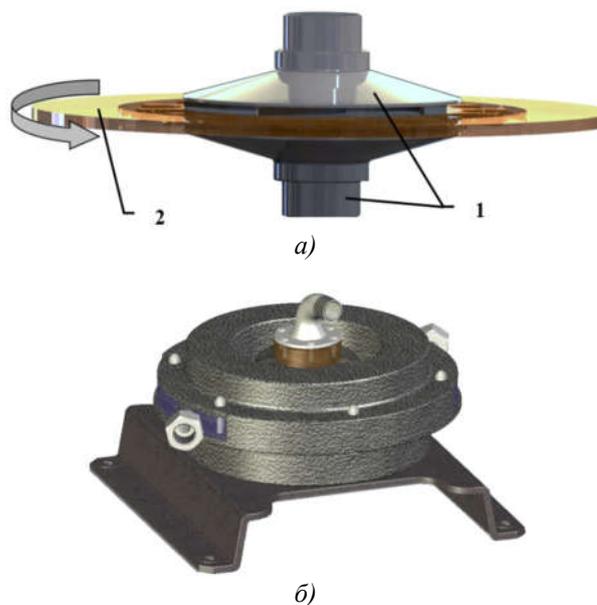


Рис. 2. Ротор динамического насоса новой конструкции (а) и его 3D-модель (б): 1 – сдвоенное центробежное колесо; 2 – кольцевой ротор  
*Fig. 2. The rotor of a dynamic pump of a new design (a) and its 3D model (b): 1 - a double centrifugal wheel; 2 - an annular rotor*

Сравнение результатов расчёта несущей способности ( $\sum W_i^z$ ), жёсткости ( $\sum K_z^\varepsilon$ ), расхода воздушной смазки ( $\sum Q_i$ ) газостатического двойного подпятника, полученных двумя методами, приведено в таблице [17].

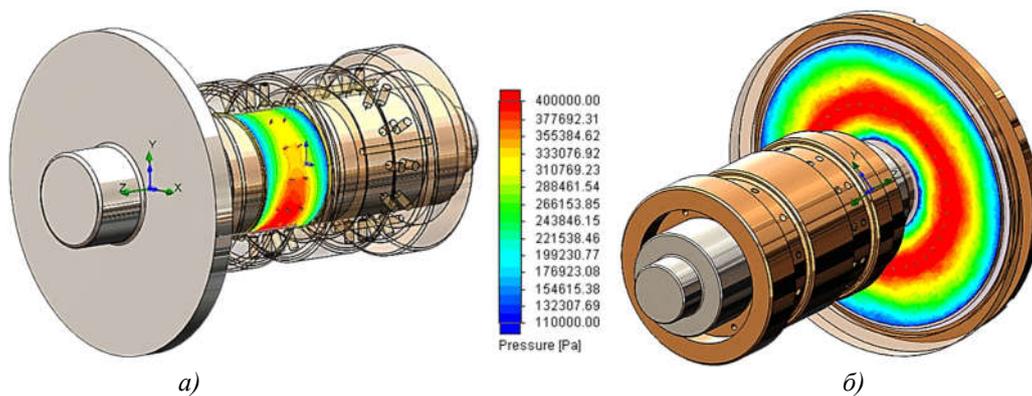


Рис. 3. Исследование средствами САПР распределения давления воздушной смазки в радиальном газостатическом подшипнике; а – подпятник; б - шпиндель  
 Fig. 3. CAD study of the air lubrication pressure distribution in the radial gas-static bearing (a) and the spindle bearing (b)

Таблица

Результаты расчётов

Table

Calculation results

| Метод расчёта   | Средние зазоры левого /правого подпятников,<br>ков,<br>(уровень нагрузки,%) | Значения характеристик двойного подпятника |                     |                       |
|---|---|--|---------------------|-----------------------|
|   |   | $\sum K_z^e$ ,<br>Н/мкм                    | $\sum W_i^z$ ,<br>Н | $\sum Q_i$ ,<br>л/мин |
| МКЭ   | $C_{0Л}/C_{0П} = 15$ мкм/15 мкм, (0 %)                                      | 350,7                                      | 0,0                 | 92,96                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 17,5/12,5$ мкм, (30 %)                                     | 436,9                                      | 2184,6              | 74,82                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 20$ мкм/10 мкм, (60 %)                                     | 453,4                                      | 3153,1              | 89,63                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 25$ мкм/5 мкм, (100 %)                                     | 346,2                                      | 4687,5              | 104,7                 |
| МВ  | $C_{0Л}/C_{0П} = 15$ мкм/15 мкм, (0 %)                                      | 380,0                                      | 0,0                 | 95,61                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 17,5/12,5$ мкм, (30 %)                                     | 446,0                                      | 2460,0              | 95,28                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 20$ мкм/10 мкм, (60 %)                                     | 541,0                                      | 4533,0              | 87,92                 |
|   | $C_{0Л}/C_{0П} = 25$ мкм/5 мкм, (100 %)                                     | 482,0                                      | 4805,0              | 88,78                 |
| Среднее отклонение $\Delta_{ср}$ величин характеристик, % |   | 12,9                                       | 14,52               | 11,41                 |

Компьютерный вычислительный эксперимент на основе метода конечных элементов (МКЭ) и аналитический метод на основе приближённого решения уравнения Рейнольдса методом возмущений (МВ) [15] показали хорошую сходимость результатов – от 85,5 % до 88,6 %. При в ВКЭ достигнуты чувствительность результатов на изменение величины эксцентриситета и среднего зазора с воздушной смазкой в подпятнике не ниже 1 мкм и повторяемость результатов в серии экспериментов с одинаковыми условиями не менее 99 %.

Применительно к динамическому насосу алгоритм синтеза аналогичен показанному на рис. 4 алгоритму для шпинделей, но отличается по исследуемым параметрам. Исследуются абсолютная скорость

рабочей жидкости на входе –  $V_1$  и на выходе из рабочего колеса –  $V_2$ ;  $U_1$  и  $U_2$  – переносные скорости жидкости, обусловленные вращением колеса;  $W_1$  и  $W_2$  – относительные скорости жидкости на входе и выходе;  $H$  – напор с учётом гидравлических потерь;  $M$  – вращающий момент на рабочем колесе, который передаётся от кольцевого ротора. Их сравнение с результатами вычислительных компьютерных экспериментов в САЕ-программах машиностроительных САПР показало расхождение не более 15 %. Полученные в вычислительном эксперименте в программе газо- и гидродинамического анализа распределения давления и скорости жидкости по прочной части рабочего колеса (рис. 1, а), вращающегося с частотой 800 об/мин, показаны на рис. 5.

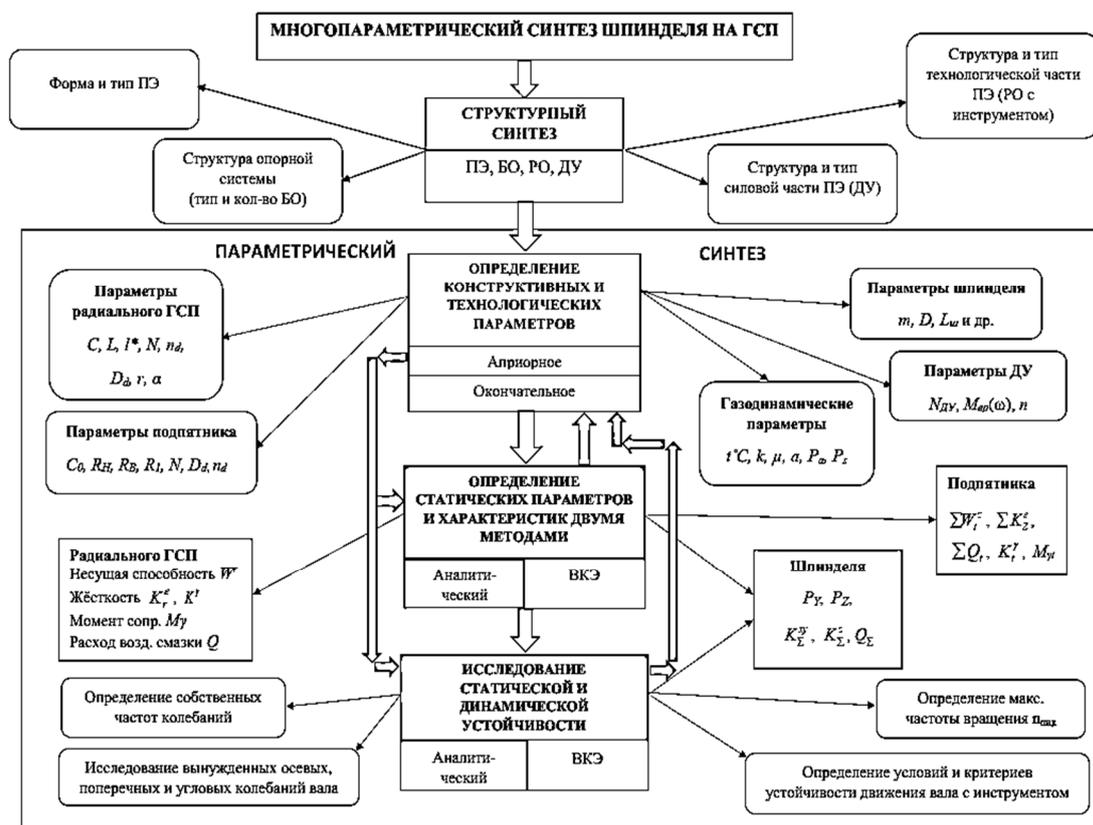


Рис. 4 Общий алгоритм многопараметрического синтеза  
 Fig. 4 General algorithm of multiparametric synthesis

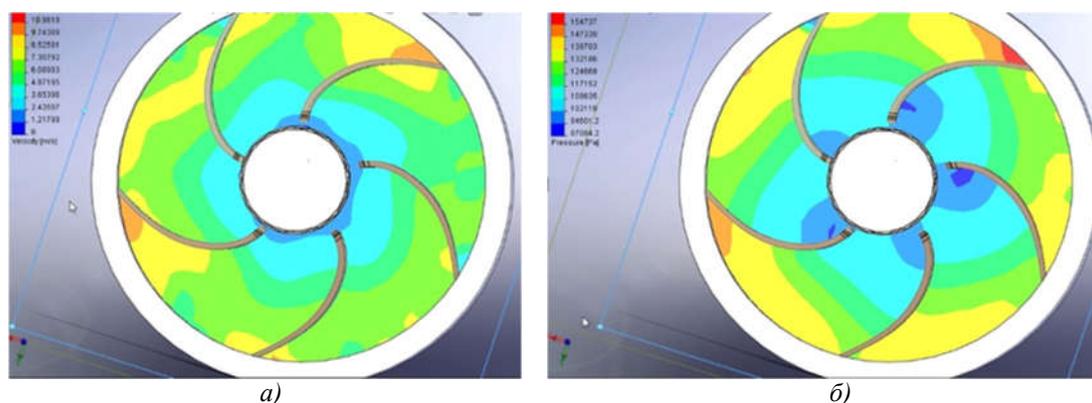


Рис. 5. Исследование средствами САПР распределения скорости (а) и давления (б) жидкости при вращении рабочего колеса насоса со скоростью 800 об/мин  
 Fig. 5. CAD/CAE study of the distribution of velocity (a) and pressure (b) of the liquid during rotation of the pump impeller at a speed of 800 rpm

Концепция разрабатываемого безвального динамического насоса состоит в том, что его приводит во вращение кольцевой ротор из парамагнитного материала, который движется под действием вращающегося электромагнитного поля, образуемого трёхфазной обмоткой статора. Распределение электромагнитных сил в рабочем пространстве насоса таково, что кольцевой ротор под их действием совершает устойчивое вращательное движение. При

сколь угодно малом смещении кольцевого ротора от центрального положения формируется главный вектор электродинамических сил, который пропорционален и противоположно направлен смещению, поэтому стремится вернуть кольцевой ротор с рабочим колесом насоса (рис. 1) в исходное центральное положение.

При движении рабочего колеса и его кольцевого ротора силы электромагнитной природы создают на кольцевом роторе



тангенциальных сил ( $F_\tau$ ) – всегда дестабилизирующее [1, 9].

На основе анализа характера распределения элементарных сил при возникшем смещении, получены аналитические выра-

$$F_{\tau y} = \frac{C_\tau B^2 R_{PH}}{3} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PH}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^3 \cos \varphi d\varphi - \frac{C_\tau B^2 R_{PB}}{3} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PB}} \cos \varphi \right)^3 \cos \varphi d\varphi. \quad (1)$$

$$M_{or} = \frac{C_\tau B^2 R_{PH}}{4} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PH}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi - \frac{C_\tau B^2 R_{PB}}{4} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PB}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi. \quad (2)$$

$$F_{rx} = C_r B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2), \quad (3)$$

где  $B$  – модуль вектора магнитной индукции;  $C_\tau$ ,  $C_r$  – комплексные коэффициенты;  $R_{PH}$ ,  $R_{PB}$  – наружный и внутренний радиусы ротора без механических опор.

Доминирование радиальной составляющей  $F_{rx}$  в главном векторе электромагнитных сил определяет устойчивость положения кольцевого ротора при вращении, а величина главного момента  $M_{or}$  – частоту вращения и мощность привода. На основе полученных выражений (1)–(3) для составляющих главного вектора и вращающего момента, были последовательно исследованы возможные комбинации размеров статора и кольцевого ротора, влияние изменения величины магнитной индукции в различных точках и получены аналитические зависимости, определяющие условия

устойчивости движения кольцевого ротора во вращающемся электромагнитном поле. Адекватность математической модели была проверена экспериментально на примере устойчивости рабочего колеса насоса при вращении в ёмкости с водой и её движении относительно вращающегося кольцевого ротора и статора, генерирующего вращающееся магнитное поле. Ротор, конструкция которого состоит из двух кольцевых пластин (аналогично ротору 2 на рис. 2а) [9] с размещёнными между ними лопатками, помещался в ёмкость с водой и раскручивался. Он создавал поток перекачиваемой жидкости от центра к периферии ёмкости и сохранял устойчивость при смещениях ёмкости во время вращения, как это показано на рис. 8.

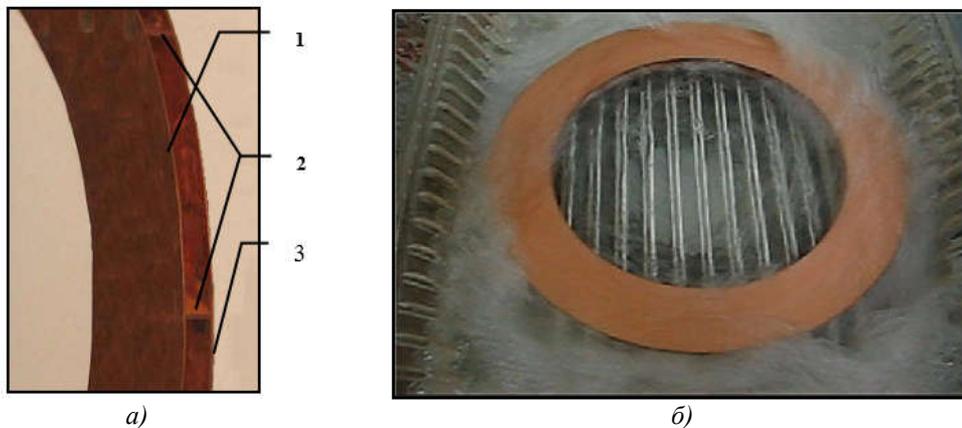


Рис. 8 Конструкция рабочего колеса (а) с кольцевыми медными пластинами 1, 3 с лопатками 2 между ними и его устойчивое вращение в ёмкости с водой (б)

Fig. 8 The design of the impeller (a) with annular copper plates 1, 3 with blades 2 between them and its steady rotation in a container with water (b)

Таким образом экспериментально доказана адекватность разработанной математической модели динамического равновесия кольцевого ротора расчётных раз-

### Заключение

В процессе исследований разработана обобщённая методика синтеза (создания) бесконтактных приводов различного назначения – шпинделей на газостатических подшипниках и безвальных динамических насосов. Такие приводы являются высокоскоростными, энергоэффективными и обладают высокой надёжностью ввиду фактического отсутствия износа подвижных элементов конструкций.

Особенностью предложенной методики синтеза бесконтактных приводов является применение двух независимых теоретических методов исследования – аналитического, основанного на классических методиках расчёта параметров и характеристик, и вычислительного компьютерного эксперимента, основанного на применении программ газо- и гидродинамического анализа машиностроительных САПР.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ерошин, С. С. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор / С. С. Ерошин, В. Е. Брешев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. №5(17). С. 82-85.
2. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. Oxford, 2012. 334 p.
3. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. 595 p.
4. Брешев, В. Е. Анализ технических преимуществ применения аэростатических опор в шпинделях технологических машин / В. Е. Брешев // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2023. № 7(73). С. 141-145.
5. Космынин, А. В. Шпиндели на газовых опорах – перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов / А. В. Космынин, М. Р. Петров // Современные проблемы науки и образования. 2006. №6. С. 47-48.
6. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография / В. Е. Брешев. Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. 208 с.

меров, который устойчиво вращается, создаёт поток перекачиваемой жидкости и развивает достаточную для насосов частоту вращения – 3000 об/мин и более.

Представлены результаты исследования параметров и интегральных характеристик газостатических подшипников шпинделя и гидродинамических параметров потока жидкости во вращающемся рабочем колесе безвального насоса.

Применение аналитического метода при синтезе безвального насоса показано на примере разработанной математической модели для определения вращающего момента и стабилизирующего главного вектора движущих сил, которые определяют устойчивость вращающегося кольцевого ротора без механических опор. Адекватность разработанной математической модели подтверждена экспериментально демонстрацией устойчивого вращения в жидкости рабочего колеса в форме кольцевого ротора.

7. Космынин, А. В. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Виноградов. – Владивосток: Дальнаука, 2002. 327 с.
8. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин. 4-е изд. СПб.: Лань, 2003. 304 с.
9. Брешев, В. Е. Приводы машин с кольцевыми рабочими органами без механических опор: монография / В. Е. Брешев, С. В. Шевченко. Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. 186 с.
10. Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. / J. Yang [et al] // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. №130. P.262-279.
11. Брешев, В. Е. Вычислительные эксперименты по исследованию динамической устойчивости высокоскоростного шпинделя на газостатических подшипниках / В.Е. Брешев, Ю.С. Долженко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. науч. тр. XXXI МНТК Машиностроение и техносфера XXI века, г. Севастополь, 16-22 сентября 2024. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2024. Вып. 2(85). С. 31-40.

12. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. М.: Наука, 1982. 265 с.
13. Космынин, А. В. Подшипники на газовой смазке высокоскоростных роторов [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека / А. В. Космынин, В. С. Виноградов, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов // Современные наукоёмкие технологии. 2009. №1. – URL: [http://www.rae.ru/snt/?section=article\\_index](http://www.rae.ru/snt/?section=article_index) (дата обращения: 08.10.2024).
14. Alfred Jäger air bearing spindle. Die Spindeltypen LS 125-62 mit 125 000U/min zeichnen sich durch hohe Rundlaufgenauigkeiten. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=g6ZkF2Vv1S0> (дата обращения: 19.11.2024).
15. Рябичев, В. Д. Аналитический метод исследования энергосберегающих опор с газовой смазкой для оборудования механической обработки / В. Д. Рябичев, В. Е. Брешев // Ресурсосберегаю-

щие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. 2021. № 2(35). С. 29-36.

16. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике /А. А. Алямовский [и др.]. СПб: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с. – (Мастер).
17. Брешев, В. Е. Вычислительные компьютерные эксперименты по исследованию характеристик газостатического подпятника шпинделя шлифовального станка / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2024. №2(80). С. 28-34.
18. Долженко, Ю.С. Многопараметрический синтез шпинделей на газостатических подшипниках / Ю.С. Долженко // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Сб. науч. тр. X Международной научно-практической конференции, г. Тамбов, 21-22 октября 2024 г.: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. Вып.10. С. 84-91.

## REFERENCES

1. Eroshin SS, Breshev VE. Improving the efficiency of machines using working bodies without mechanical supports. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2005;5(17):82-85.
2. Rowe BW. *Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design*. Oxford; 2012.
3. Wiley J. *Air Bearings. Theory, Design and Applications*. Belgium: Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven; 2021.
4. Breshev VE. Analysis of the technical advantages of using aerostatic supports in the spindles of technological machines. *Vestnik of Lugansk Vladimir Dahl National University*. 2023;7(73):141-145.
5. Kosmynin AV, Petrov MR. Spindles on gas supports – a promising way to develop high-speed metalworking. *Modern Problems of Science and Education*. 2006;6:47-48.
6. Breshev VE. *Development of theory and design methods of contactless drives with combined and passive stability: monograph*. Lugansk: Publishing House of Lugansk Vladimir Dahl National University; 2016.
7. Kosmynin, AV, Vinogradov AV. Gas bearings of high-speed turbo drives of metalworking equipment. Vladivostok: Dalnauka; 2002.
8. Merkin, DR. *Introduction to the theory of motion stability*. 4th ed. St. Petersburg: Lan; 2003.
9. Breshev VE, Shevchenko SV. *Drives of machines with annular working bodies without mechanical supports: monograph*. Lugansk: Publishing house of LSU named after V. Dahl; 2017.
10. Yang J Modeling and analysis of a high-speed spindle with hybrid bearings considering the influence of bearing parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009;130:262-279.
11. Breshev VE, Dolzhenko YuS. Computational experiments to study the dynamic stability of a high-speed spindle of gas-static bearings. *Collection of Scientific Papers of XXXI ISTK Mechanical Engi-*

neering and Technosphere of the XXI Century, September 16-22, 2024: *Progressive Technologists and Systems of Mechanical Engineering*; Sevastopol, Donetsk: DonNTU Publishing House. 2024;2(85):31-40.

12. Pinegin SV, Tabachnikov YuB, Sipenkov IE. Static and dynamic characteristics of gas-static supports. Moscow: Nauka; 1982.
13. Kosmynin AV, Vinogradov VS, Shchetinin VS, Smirnov AV. High-speed rotor bearings on gas lubrication. *Modern High Technologie [Internet]*. 2009 [cited 2024 Oct 08]: 1. Available from: [http://www.rae.ru/snt/?section=article\\_index](http://www.rae.ru/snt/?section=article_index)
14. Alfred Jäger air bearing spindle. Die Spindeltypen LS 125-62 mit 125 000U/min zeichnen sich durch hohe Rundlaufgenauigkeiten [Internet]. [cited 2024 Nov 19]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=g6ZkF2Vv1S0>
15. Ryabichev VD, Breshev VE. Analytical method for the study of energy-saving supports with gas lubrication for mechanical machining equipment. *Collection of Scientific Papers, 2021: Resource-saving technologies for the production and pressure treatment of materials in mechanical engineering*; 2021;2(35):29-36.
16. Alyamovsky AA. *SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2008.
17. Breshev VE, Dolzhenko YuS. Computational computer experiments on the study of the characteristics of the gas-static bearing of a grinding machine spindle. *Vestnik of Lugansk Vladimir Dahl National University*. 2024;2(80):28-34.
18. Dolzhenko YuS. Multiparametric synthesis of spindles of gas-static bearings. *Collection of Scientific Papers of the X International Scientific and Practical Conference, October 21-22, 2024: Virtual Modeling, Prototyping and Industrial Design*; Tambov: Publishing House of TSTU. 2024;10:84-91.

## Информация об авторах:

**Брешев Владимир Евгеньевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Станки, инструменты и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», тел. +79591596616. ID:1248351, SPIN-код: 1923-7263.

**Breshev Vladimir Evgenyevich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Machines, Tools and Engineering Graphics, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +79591596616. ID:1248351, SPIN code: 1923-7263.

**Долженко Юлия Сергеевна** – ассистент кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» тел. +79591626402. ID:1263308, SPIN-код: 3801-44043.

**Dolzhenko Yulia Sergeevna** – Assistant of the Department of Machines, Tools and Engineering Graphics, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, phone: +79591626402. ID:1263308, SPIN code: 3801-44043.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 27.11.2025. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 13.10.2025; approved after review on 10.11.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**