

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.318
doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-6-14

АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ

Владимир Евгеньевич Брешев^{1✉}, Юлия Сергеевна Долженко²

^{1,2} Луганский государственный университет им. Владимира Даля, Луганск, Россия

¹ veb_lug@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3277-8427>

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

Аннотация

Цель исследования: разработка обобщённого алгоритма исследования средствами машиностроительных САПР динамических процессов при функционировании шпинделей и другого оборудования на газостатических подшипниках. Решаются задачи анализа динамических процессов при функционировании оборудования, выбора программного обеспечения для исследования жёсткости и несущей способности, а затем колебаний неуравновешенного ротора на газостатических подшипниках, выполнения компьютерных вычислительных экспериментов (ВКЭ) в соответствии с разработанной методикой, представление результатов в графическом виде и их анализ.

Метод исследования: вычислительные компьютерные эксперименты в САЕ-программах машиностроительных САПР. Новизна работы заключается в разработанном обобщённом алгоритме исследования динамических процессов посредством проведения вычислительных компьютерных экспериментов на основе трёхмерной расчётной модели, в полученных функциональных зависимостях для давления газовой смазки и амплитуд поперечных колебаний от различных параметров и условий. Приведены результаты исследований распределения давления воздушной

смазки в конических газостатических подшипниках высокоскоростного шпинделя при варьировании внешней нагрузки, а также амплитуды поперечных колебаний неуравновешенного ротора при разгоне и прохождении трёх критических частот вращения, при которых возникает явление резонанса. Выводы: разработанный алгоритм вычислительных компьютерных экспериментов на основе трёхмерной расчётной модели позволяет средствами машиностроительных САПР достаточно точно исследовать динамические процессы, возникающие при функционировании шпинделей; представленный алгоритм является универсальным, поэтому может быть применён для исследования физических процессов при функционировании оборудования различного назначения; применение данного алгоритма позволяет получать результаты, необходимые для создания новых технических объектов без проведения многочисленных натурных испытаний, что значительно сокращает время и стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: эксперимент, процессы, оборудование, подшипники, колебания, смазка, САПР.

Ссылка для цитирования:

Брешев В.Е. Алгоритм исследования динамических процессов в технологическом оборудовании на газостатических подшипниках / В.Е. Брешев, Ю.С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 1. – С. 6-14. doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-6-14.

Original article
Open Access Article

ALGORITHM FOR STUDYING DYNAMIC PROCESSES IN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH GASOSTATIC BEARINGS

Vladimir Evgenyevich Breshev^{1✉}, Yulia Sergeevna Dolzhenko²

^{1,2} Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russia

¹ veb_lug@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3277-8427>

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

Abstract

Study purpose is to develop a generalized algorithm for studying dynamic processes during the operation of spindles and other equipment with gasostatic bearings using machine-building CAD tools. The following tasks are solved: analyzing dynamic processes during the operation of equipment, selecting software for studying stiffness and bearing capacity, and then studying vibrations of an unbalanced rotor with gasostatic bearings, performing computer calculating experiments (CCE) in accordance with the developed methodology, presenting the results graphically and analyzing them.

Research method include computer calculating experiments in CAE-programs of machine-building CAD. The novelty of the work is in the developed generalized algorithm for studying dynamic processes by conducting computer calculating experiments based on a three-dimensional computational model; in the obtained functional dependencies for the pressure of a gas lubricant and the amplitudes of temperature fluctuations on various parameters and conditions. There are

Reference for citing:

Breshev VE, Dolzhenko YuS. Algorithm for studying dynamic processes in technological equipment with gasostatic bearings. *Transport Engineering*. 2025;1:6-14. doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-6-14.

Введение

Актуальная проблема разработки высокоскоростного и энергоэффективного технологического оборудования на газостатических подшипниках (ГСП) требует решения целого ряда научно-технических задач. Среди них наиболее сложными являются исследования газодинамических процессов течения газовой (воздушной) смазки, приводящих к возникновению упругих сил реакций и жёсткости ГСП при внешнем воздействии, а также исследование процессов колебаний газостатических подшипников, валов (роторов) и инструмента технологического оборудования [1-4]. Колебания ГСП и закреплённых на них валов с инструментом возникают под действием переменных газодинамических сил, технологических сил при механической обработке, сил инерции при вращении неуравновешенных масс и других.

Переменные силы различной природы приводят к колебательным движениям вращающихся частей (узлов, роторов) оборудования в различных направлениях – продольном (вдоль оси вращения), поперечном и угловом (поворотном). Рост амплитуд колебаний приводит к снижению качества и производительности механиче-

ской обработки материалов. Особую опасность представляет возникновение резонанса при разгоне шпинделя или выполнении механической обработки на высокоскоростных режимах. Резонанс приводит к резкому росту амплитуд вынужденных колебаний газостатических подшипников и валов. Колебания подвижных опорных поверхностей газостатических подшипников изменяют величину зазора с газовой смазкой, поэтому их амплитуда в процессе функционирования оборудования не должна уменьшать зазор до касания опорных поверхностей газостатических подшипников. Допустимым остаточным зазором для нормального функционирования ГСП принято считать зазор величиной 2-4 мкм [1, 4, 5, 6].

Таким образом, исследование и обеспечение динамической устойчивости роторов является условием работоспособности ГСП и технологического оборудования.

Keywords: experiment, processes, equipment, bearings, vibrations, lubrication, CAD.

Цель исследования – разработка обобщённого алгоритма исследования средствами САПР динамических процессов при функционировании шпинделей и другого оборудования на газостатических подшипниках.

Постановка задачи

Современные машиностроительные САПР среднего и верхнего уровня обладают фактически неограниченными возможностями трёхмерного моделирования машин, деталей и узлов любых форм с поверхностями самой высокой сложности, а также достаточными для инженерных и научных целей вычислительными ресурсами, универсальными и динамично развивающимися программными модулями и базами данных. Особенно интенсивно развивается в машиностроительных САПР функциональное моделирование или моделирование физических процессов, которые мы называем вычислительными компьютерными экспериментами (ВКЭ) [1, 7, 9, 11]. ВКЭ в виртуальной среде на базе твердотельных моделей позволяют выполнять расчёты на прочность, кинематический и динамический анализ, моделировать газодинамические и тепловые процессы, моделировать различные стендовые испытания оборудования, а затем оперативно и на любой стадии вносить изменения в конструкторскую документацию и, таким же образом, в виртуальной среде проверять новые технические решения [1, 7, 9].

Моделирование и исследование физических процессов реализуется в САЕ-программах или программах инженерного анализа машиностроительных САПР, которые имеют различную специализацию. Например, в интегрированной САПР *SolidWORKS* модуль *COSMOSWorks* решает задачи статической прочности и устойчивости, собственных частот колебаний, анализа усталости, поведения конструкции при ударе. *COSMOSMotion (ADAMS)* решает задачи моделирования движения механизмов, кинематического и динамического анализа. *COSMOSFloWorks* решает задачи газогидродинамики и теплопередачи при взаимодействии текучей среды с твёрдыми телами [8], в том числе позволяет определять силы реакции газостатических подшипников и их жёсткости для исследования динамики ротора (вала) шпинделя [1, 9, 10, 11].

В настоящей работе решаются задачи анализа динамических процессов при

функционировании оборудования на газостатических подшипниках, выбора программного обеспечения для исследования жёсткости и несущей способности, а затем колебаний неуравновешенного ротора на ГСП. Динамические процессы течения газовой смазки в зазорах ГСП и вынужденных колебаний вращающегося ротора при действии возмущающих переменных сил определяют работоспособность, статическую и динамическую устойчивость шпинделей. Данные процессы взаимосвязаны, так как течение газовой (воздушной) смазки определяет несущую способность и жёсткость ГСП, а колебания и динамическая устойчивость вращающегося вала с инструментом в значительной степени зависят от расположения подшипников и их жёсткости. Следующими задачами являются непосредственное выполнение компьютерных вычислительных экспериментов в соответствии с разработанной методикой, представление результатов в графическом виде и их анализ. При исследовании динамических процессов на первом этапе вычислительными экспериментами на основе 3D-модели шпинделя необходимо исследовать так называемые статические характеристики ГСП – жёсткость и несущую способность, определяемые течением газовой смазки и распределением её давления по зазору [1, 8, 9]. На втором этапе ВКЭ, на основе динамической модели вала на упругих ГСП, с введенной тарированной неуравновешенностью, необходимо исследовать собственные частоты колебаний, смоделировать вращение на установившихся режимах и при разгоне в условиях действия переменных возмущающих сил, возникновении колебаний и резонанса [1, 8, 10, 11]. Таким способом средствами САПР могут быть исследованы динамические процессы при функционировании оборудования на газостатических подшипниках и параметрические, конструктивные, технологические условия его динамической устойчивости.

Разрабатываемая методика (или алгоритм) компьютерных экспериментов должна предполагать вариативность условий их проведения, возможность верифи-

кации полученных данных с помощью других методов исследований, различные способы представления полученной ин-

формации – графические, табличные, через аналитические зависимости и т.д.

Методика, модели и результаты исследований

На примере высокоскоростного шпинделя на регулируемых конических газостатических подшипниках рассмотрим пошагово методику (алгоритм) подготовки и выполнения вычислительных компьютерных экспериментов по исследованию динамических процессов, возникающих при функционировании шпинделя. Данная методика является обобщённой (охватывает различные физические процессы) и универсальной – применима для исследования процессов в оборудовании различного назначения.

1. Виртуализация объекта исследований – разработка 3D-модели, максимально соответствующей конструкции реально существующего или проектируемого оборудования. Для этого в настоящее время используются твердотельные 3D-модели, которым можно присваивать механические свойства материалов для каждого из тел деталей и узлов, определять их взаимное положение и условия взаимодействия, а затем проводить исследования физических, в том числе динамических, процессов вычислительными компьютерными экспериментами в САЕ-программах.

3D-модель шпинделя на ГСП строится на основе априорно определённых геометрических и конструктивных параметрах узлов шпинделя, в том числе его газостатических подшипников. Для априорной конструкции аналитическим методом [1, 2, 4, 6] выполняется предварительный (прикидочный) расчёт статических характеристик ГСП (жёсткостей и несущих способностей), которые в первом приближении соответствуют заданным значениям в техническом задании.

2. Анализ физических процессов, подлежащих моделированию и исследованию, которые определяющим образом влияют на функционирование технологического оборудования. Это может быть процесс движения звеньев механизма и узлов машины, передача и распределение нагрузок с возникающими деформациями,

напряжениями и перемещениями упругих тел, процессы теплообмена, течения жидкости или газа, колебательные процессы вращающихся валов и др. [7].

Для высокоскоростных шпинделей на ГСП, в том числе конических, такими определяющими физическими процессами являются течение газовой смазки в зазоре. Оно приводит к возникновению упругих сил реакции при эксцентриситете от действия внешних сил и влияет на колебательные процессы при вращении вала, его разгоне и прохождении резонансных частот. Особую опасность несут в себе поперечные колебания, вызванные неуравновешенностью вала шпинделя и технологическими силами, происходящие на резонансных частотах вращения [10, 11]. Явление резонанса, как известно, возникает при совпадении собственных частот колебаний ротора с частотами внешних возмущающих сил и сопровождаются резким ростом амплитуд колебаний вала, что может привести к потере устойчивости движения [12], повреждению газостатических подшипников и оборудования.

3. Формирование расчётной модели вычислительного компьютерного эксперимента – постановка в соответствие 3D-модели объекта параметров моделируемого физического процесса. Определение расчётного пространства и его дискретизация на конечные элементы или объёмы, определение начальных и граничных условий – свойств материалов, способов и особенностей контакта поверхностей, способов приложения и величин сил, параметров начального положения, скорости, давления, температуры и т.д.

При исследовании статических характеристик ГСП шпинделя расчётной моделью является 3D-модель опорной системы с заданными параметрами зазора с воздушной смазкой, эксцентриситетов подшипников. Зазор с воздушной смазкой определяет расчётную область, которая разделяется на конечные объёмы, для воз-

душной смазки определяются давление на входе (подачи на питатели) и на выходе из зазора, температура, вязкость, характер течения – уровень турбулентности и другие [1, 8, 9].

Для исследования колебаний вала шпинделя на ГСП разрабатывается динамическая трёхмерная модель ротора (вала) шпинделя в CAE-программе с установкой виртуальных опор рассчитанной жёсткости. На её основе выполняется расчёт собственных частот колебаний ротора, что позволяет определить наиболее опасные резонансные области функционирования шпинделя, когда собственные частоты совпадают с частотами вынужденных колебаний от вращения неуравновешенного вала шпинделя, действия внешних сил резания и др. При этом введением в 3D-модель вала тарированной неуравновешенности моделируются динамические нагрузки, зависящие от частоты вращения и вызывающие поперечные колебания вала при вращении на различных скоростных режимах.

4. Расчёт параметров исследуемых физических процессов, например, сил ре-

акций в подшипниках, жёсткостей, амплитуд колебаний валов и ГСП при разгоне и вращении на различных скоростях, получение качественных и количественных результатов, их визуализация.

Вычислительный компьютерный эксперимент по исследованию течения воздушной смазки (определению пространственного распределения давления смазки в зазоре, а затем интегральных характеристик – сил реакции и жёсткостей) в правом коническом газостатическом подшипнике при действии нагрузки показан на рис. 1, а для всего высокоскоростного шпинделя на двух регулируемых конических ГСП (рис. 2).

При исследовании колебаний вала шпинделя на ГСП с помощью его динамической модели выполняется виртуальный разгон и вращение при действии динамических нагрузок, например, от введенной в 3D-модель неуравновешенности. Определяются величины амплитуд поперечных колебаний на установившихся и переходных режимах вращения, включая попадание в наиболее опасные – резонансные – области частот вращения.

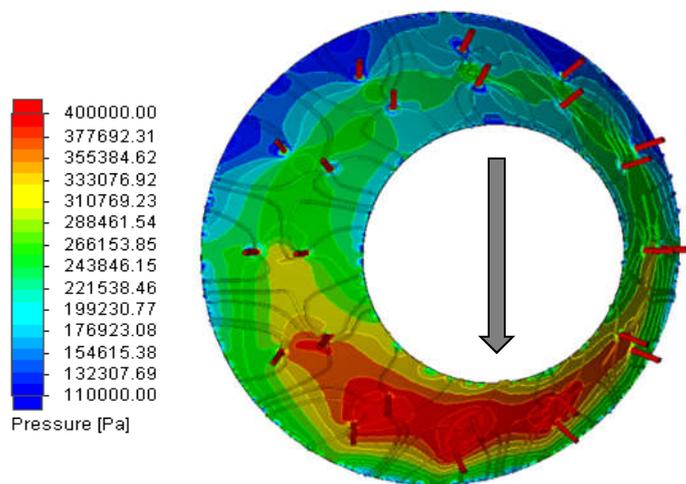


Рис. 1. Распределение давления воздушной смазки в «смазочном конусе» конического ГСП при среднем зазоре 25 мкм, эксцентриситете 20 мкм, давлении подачи смазки 4,5 атм., действии внешней нагрузки (показана стрелкой) на уровне 90% от максимально допустимой

Fig. 1. Distribution of air lubrication pressure in the "lubrication cone" of a conical GSP with an average clearance of 25 microns, an eccentricity of 20 microns, a lubrication supply pressure of 4.5 atm., the action of an external load (shown by an arrow) at the level of 90% of the maximum permissible

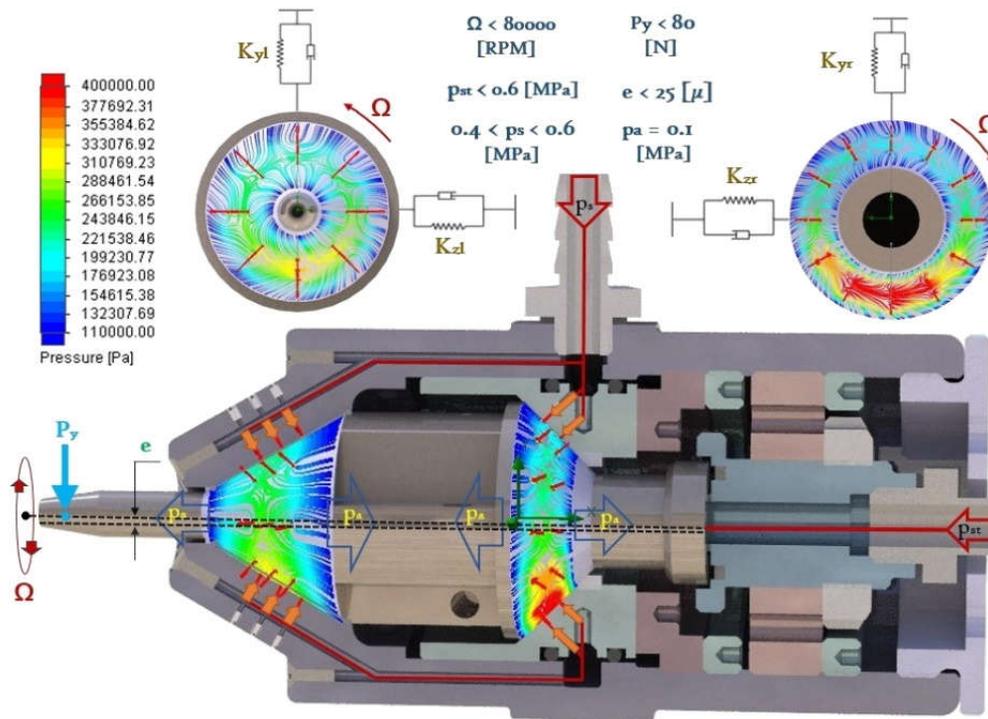


Рис. 2. Исследование характеристик конических ГСП на 3D-модели высокоскоростного шпинделя
 Fig. 2. Study of the characteristics of conical GSP on a 3D model of a high-speed spindle

Для регулируемого шпинделя (см. рис. 2), на средних по величине зазора настройках его газостатических подшипников, в экспериментах были получены значения критических частот вращения. Первая критическая скорость вращения – 29000 об/мин (собственная частота 483,3 Гц – Mode1); вторая критическая скорость вращения – 31500 об/мин (соб-

ственная частота 525 Гц – Mode2); третья критическая частота вращения – 41000 об/мин (собственная частота 683,3 Гц – Mode3). На данных частотах происходит резкий рост амплитуд поперечных колебаний центра масс неуравновешенного (дисбаланс 3 г·мм) вала шпинделя, как показано на рис. 3.

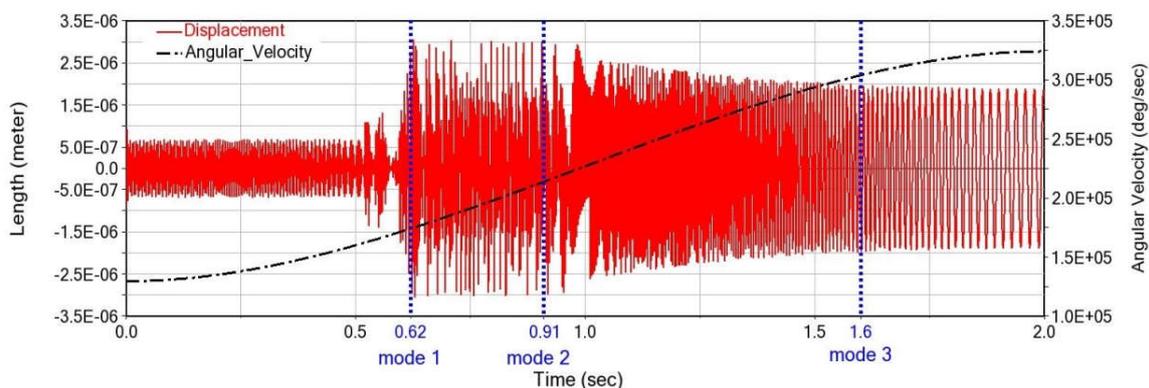


Рис. 3. Амплитуды поперечных колебаний при разгоне вала на ГСП и прохождении им трёх резонансных частот
 Fig. 3. Amplitudes of transverse vibrations during acceleration of the shaft on the GSP and its passage of three resonant frequencies

На рис. 4 амплитуды поперечных колебаний центра масс ротора показаны в

плоскости, перпендикулярной его оси вращения.

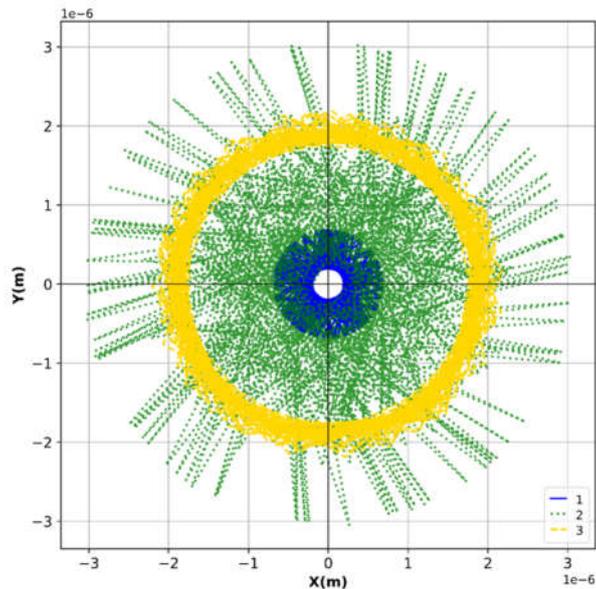


Рис. 4. Поперечные колебания центра масс ротора на различных частотах при разгоне: 1 – докритическая частота вращения ротора; 2 – область трёх критических частот вращения ротора; 3 – закритическая частота вращения ротора

Fig. 4. Transverse oscillations of the rotor center of mass at different frequencies during acceleration: 1 – subcritical rotor rotation frequency; 2 – the area of three critical rotor rotation frequencies; 3 – supercritical rotor rotation frequency

5. Анализ и интерпретация полученных результатов, определение их соответствия нашим представлениям о данных физических процессах, а также результатам, полученным иными методами. Другими методами получения результатов являются, как правило, экспериментальные натурные исследования оборудования (лабораторные или производственные), а также проверенные классические методы проектных расчётов.

При проектировании или модернизации шпинделя мы можем в лабораторных условиях определить силы реакции, несущие способности и жёсткости вала или отдельных газостатических подшипников, точность позиционирования концевой участка вала, резонансные области и амплитуды возникающих колебаний вала при разгоне и установившемся вращении и др. Важной задачей при разработке высокоскоростного оборудования является определение параметрических, конструктивных и технологических условий, при которых будет сохраняться динамическая устойчивость вала [1, 6, 10, 11, 12] и работоспо-

собность шпинделя на высокоскоростных режимах функционирования.

6. Коррекция расчётной модели на основе анализа полученных результатов, изменение настроек программы, варьирование параметрами физического процесса и факторами, которые на него влияют, а затем повторение вычислительных экспериментов. На этом этапе вычислительные компьютерные эксперименты становятся итерационным процессом, благодаря которому результаты приближаются по своему уровню достоверности к результатам натуральных экспериментов и расчётов по классическим методикам, а расчётная модель и конструкция – к заданным параметрам и характеристикам в техническом задании.

7. Выполнение с помощью откорректированной расчётной модели повторных и уточняющих ВКЭ при конструктивных изменениях и модернизации оборудования, расширении диапазонов варьирования параметрами и факторами, влияющими на исследуемые динамические процессы, поиск на этой основе новых эффективных технических решений.

Заключение

Разработанный алгоритм вычислительных компьютерных экспериментов на основе трёхмерной расчётной модели позволяет средствами машиностроительных САПР всесторонне и достаточно точно исследовать динамические процессы, возникающие при функционировании шпинделей, получить ответ фактически на любой исследовательский запрос инженера-конструктора при создании новых изделий. Представленный алгоритм является обобщённым и универсальным, поэтому

может быть применён для исследования разных физических процессов, происходящих при функционировании оборудования различного назначения.

Применение данного алгоритма позволяет получать результаты, необходимые для создания новых технических объектов без проведения многочисленных натурных испытаний, что значительно сокращает время и стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
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. Космынин, А. В. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Виноградов. Владивосток: Дальнаука, 2002. 327 с.
5. Космынин, А. В. Подшипники на газовой смазке высокоскоростных роторов [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека / А. В. Космынин, [и др.]. // Современные наукоемкие технологии, 2009. №1. – URL: http://www.rae.ru/snt/?section=article_index (дата обращения: 08.10.2024).
6. Пинегин, С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой: справочник / С. В. Пинегин, А. В. Орлов, Ю. Б. Табачников. М.: Машиностроение, 1984. 216 с. (Основы проектирования машин).
7. Брешев, В.Е. Теория механизмов и машин. Анализ и синтез механизмов: учебное пособие / В.Е. Брешев. Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля,

2024. 368с.
8. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике /А. А. Алямовский [и др.]. СПб: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с. – (Мастер).
9. 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.
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 г. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2024. Вып. 2(85). С. 31-40.
12. Алфутов, Н. А. Устойчивость движения и равновесия: учебник для студентов вузов / Н. А. Алфутов, К. С. Колесников; под ред. К. С. Колесникова. 2-е изд. М.: МГТУ, 2003. Т.3. 256 с. – (Механика в техническом университете в 8 т.).

REFERENCES

1. Breshev VE. Development of theory and design methods of contactless type drives with combined and passive stability assurance: monograph. Lugansk: Publishing House of Lugansk Vladimir Dahl State University; 2016.
2. Brian Rowe W. Hydrostatic, aerostatic, and hybrid bearing design. Oxford; 2012.
3. Wiley J. Air Bearings. Theory, design and applications. Farid Al-Bender KU Leuven, Department of

- Mechanical Engineering Leuven. Belgium; 2021.
4. Kosmyinin AV, Vinogradov VS. Gas bearings of high-speed turbo drives of metalworking equipment. Vladivostok: Dalnauka; 2002.
5. Kosmyinin AV. Bearings with gas lubrication of high-speed rotors. Modern High Technologies [Internet]. 2009 [cited 2024 Oct 08];1. Available from: http://www.rae.ru/snt/?section=article_index

6. Pinegin SV, Orlov AV, Tabachnikov YuB. Precision swing supports and supports with gas lubrication: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1984.
7. Breshev VE. Theory of mechanisms and machines. Analysis and synthesis of mechanisms: textbook. Lugansk: Publishing House of Lugansk Vladimir Dahl State University; 2024.
8. Alyamovsky AA. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2008.
9. Breshev VE, Dolzhenko YuS. Computer calculating experiments to study the characteristics of the gas-static bearing of the grinding machine spindle. Bulletin of Lugansk Vladimir Dahl State University. 2024;2(80):28-34.
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 for studying dynamic stability of a high-speed spindle of gas-static bearings. Progressive Technologists and Machine Building Systems: Collection of Scientific Papers of XXXI NTC, Sept 16-22, 2024; Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI century; Sevastopol. Moscow: DonNTU Publishing House. 2024;2(85):31-40.
12. Alfutov NA, Kolesnikov KS. Stability of motion and equilibrium: textbook for university students. 2nd ed. Moscow: MSTU; 2003.

Информация об авторах:

Брешев Владимир Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика», тел. +79591596616. ID:1248351, SPIN-код: 1923-7263.

Breshev Vladimir Evgenyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Machines, Tools and Engineering Graphics; phone: +79591596616. ID:1248351, SPIN code: 1923-7263.

Долженко Юлия Сергеевна – ассистент кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика», тел. +79591626402. ID:1263308, SPIN-код: 3801-44043.

Dolzhenko Yulia Sergeevna – Assistant of the Department of Machines, Tools and Engineering Graphics; 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 11.12.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 27.12.2024. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.12.2024; approved after review on 12.12.2024; accepted for publication on 27.12.2024. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.