

УДК 681.7.054.43; 621.671

В. Е. Брешев, д-р техн. наук, доц., **Ю. С. Долженко**, ассист.

Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Россия

Тел. +79591596616; E-mail: veb_lug@mail.ru.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ПРИВОДОВ ВРАЩЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе представлена разработанная обобщённая концепция создания бесконтактных приводов вращения для эффективного применения в машинах различного назначения – безвальных динамических насосах, станках резки монокристаллов, сатураторах и др. машинах. Сформулированы основные научно-технические задачи на пути создания бесконтактных приводов вращения и подходы к их решению. Представлены результаты исследования технико-технологических преимуществ и конструктивных особенностей бесконтактных приводов с кольцевыми роторами, проанализированы варианты их конструкций и способов эффективного применения в машинах для зачистки емкостей, центробежно-вихревых и центробежных безвальных насосах, бесшпиндельных станках резки монокристаллов.

Ключевые слова: концепция, бесконтактный привод, свободный ротор, безвальный динамический насос, бесшпиндельный станок резки монокристаллов.

V. E. Breshev, Y. S. Dolzhenko.

THE CONCEPT OF CREATING CONTACTLESS ROTARY ACTUATORS AND THEIR APPLICATION IN MACHINES FOR VARIOUS PURPOSES

The paper presents the developed generalized concept of creating contactless rotary actuators for effective use in machines for various purposes – non-stop dynamic pumps, single crystal cutting machines, saturators, and other machines. The main scientific and technical tasks on the way to create contactless rotary actuators and approaches to their solution are formulated. The results of a study of the technical and technological advantages and design features of contactless drives with annular rotors are presented, their design options and methods of effective use in tank stripping machines, centrifugal vortex and centrifugal pumps, spindle-less single crystal cutting machines are analyzed.

Keywords: concept, contactless drive, free rotor, limbless dynamic pump, spindle-less single crystal cutting machine.

1. Введение

В машиностроении, станкостроении и приборостроении нашли широкое применение узлы и механизмы, в которых выполняют полезную работу или реализуют целевые процессы роторы, совершающие вращательное движение на различных скоростных режимах и под различными нагрузками. Как правило, роторы имеют механические опоры в виде подшипников качения или скольжения, а крутящий момент им сообщается через механические передачи различного типа (зубчатые, винтовые, ременные и др.). Последние передают силы и моменты за счёт механического контакта, которому свойственны значительные силы трения, износ, микросоударения, деформации. Исключение механического контакта заменой механических опор и механических передач действием электромагнитных, газо- или гидродинамических сил позволяет, в ряде случаев, снять технические ограничения, связанные с износом и деформациями узлов, вибрациями, непродуктивными потерями на трение и, таким образом сделать роторные машины высокоскоростными, более надёжными и энергоэффективными [1-5].

Анализ последних достижений в области оборудования и технологии механической и физико-технической обработки показывает устойчивую тенденцию к

разработке и применению высокоскоростного и энергоэффективного оборудования. По этой причине во всём мире разрабатываются шпиндельные узлы и приводы бесконтактного типа, в том числе на опорах с газовой смазкой [2, 4, 5], на электромагнитных и гибридных опорах [1, 5]. Отсутствие твердотельного механического контакта в так называемых бесконтактных приводах вращения открывает новые технико-технологические возможности для применения в роторных машинах различного назначения, особенно высокоскоростных и прецизионных [2, 5]. Вместе с тем, на сегодняшний день не существует обобщённой концепции по созданию бесконтактных приводов вращательного движения, которая бы содержала основные подходы к их структурному синтезу, конструированию, вариативности конструктивных исполнений, а также решению научно-технических задач передачи сил и моментов без механического контакта, обеспечению при этом устойчивости вращающихся роторов.

2. Цель исследования

Разработка обобщённой концепции создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения – станков резки монокристаллов, станков шлифования, безвальных динамических насосов, импеллеров и др. машин.

3. Постановка задачи

На пути создания машин, отдельных узлов, приводов или механизмов со «свободным» ротором, который не имеет механических опор, наиболее сложной и принципиальной является научно-техническая задача обеспечения статической и динамической устойчивости ротора при передаче крутящего момента и выполнении полезной работы [1-5]. При вращении без или под воздействием заданной внешней (технологической) нагрузки, ротор должен сохранять устойчивое требуемое положение в рабочем пространстве машины на различных скоростных режимах, то есть обладать устойчивостью вращательного движения [6]. Для решения данной задачи необходимо установить общий принцип пространственного распределения действующих на ротор сил различной природы, определить методы расчёта и аналитические выражения для главного вектора и главного момента действующих сил (сил реакции, движущих сил, сил сопротивлений). Затем, на этой основе, сформулировать условия статической и динамической устойчивости роторов бесконтактных приводов, а имитационным моделированием и натурными экспериментами подтвердить основные полученные результаты [1, 2, 4, 5]. Таким образом, может быть обоснована возможность создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения, разработаны основные принципы их создания.

4. Методика исследований, модели и основные результаты

Для разработки концепции создания бесконтактных приводов, рассмотрим их технико-технологические и конструктивные особенности. Они, с одной стороны, лежат в основе получаемых технических преимуществ машинами с бесконтактными приводами, а с другой стороны, требуют решения научно-технических задач обеспечения статической и динамической устойчивости роторов в условиях отсутствия механических опор и механических передач. В этом случае передача сил и моментов между узлами (детальными) привода, совершающими относительное движение, происходит полями сил при отсутствии твердотельного контакта. Перечислим основные из них [1, 5, 7-9]:

1. Вращающийся «свободный» ротор удерживается в пространстве силовым полем или несколькими полями сил различной природы, а технологическая нагрузка, приложенная по его кромкам или по поверхностям, может оказывать как стабилизирующее, так и дестабилизирующее действие. При этом главный момент движущих сил должен быть регулируемым и стабильным независимо от частоты вращения и положения ротора в поле сил, а главный вектор должен находиться в обратной связи со смещениями, вызванными различными возмущающими факторами.

2. «Свободный» ротор выполняет полезную работу и, одновременно, является вторичным элементом специальной электрической машины, газо- или гидростатических турбин и подшипников. Совмещение ротором функций опор и вторичных элементов движителей (электродвигателей и турбин) позволяет конструкцию привода и машины сделать более простой и компактной (рациональной).

3. Сокращение количества и массы движущихся узлов, испытывающих динамические нагрузки, исключение интенсивно изнашивающихся поверхностей, вследствие отсутствия механического контакта при движении, приводит к повышению уровня надёжности машин с бесконтактными приводами, снижению непроизводительных потерь, уменьшению потребляемой мощности машины при прочих равных условиях.

4. Передача мощности (вращающего момента) на ротор осуществляется силовыми полями различной природы и поэтому имеет мягкий демпфирующий характер. Благодаря этому исключаются соударения, значительно снижаются вибрационные нагрузки. Последние характерны для передаточных и исполнительных механизмов, так как вызваны колебаниями валов, карданных, ременных, фрикционных или зубчатых передач, дисбалансом шпиндельных узлов, шумом и биениями в подшипниках качения или скольжения и т.д.

5. Крутящий момент на ротор эффективно передаётся через любую не электропроводящую среду или стенку (стекло, воздух, жидкости, пластики, композитные материалы) поэтому ротор специальной электрической машины может совершать устойчивое вращение изолированно от внешней среды или остальной части машины (индуктора) и выполнять полезную работу, получая энергию посредством силового электродинамического поля через прочную и герметичную стенку.

6. В предельно простом случае «свободным» ротором бесконтактного привода может быть плоское кольцо из парамагнитного материала. Если нанести алмазный абразивный слой на его внутреннюю кромку, то кольцевой ротор превращается в режущий инструмент, который способен разрезать заготовки новым способом – «напроход». Если нанести абразивный слой на поверхности плоского кольца, то оно превращается в рабочий орган машины для зачистки внутренних поверхностей. Если же установить на одну из поверхностей лопатки, то ротор превращается в рабочее колесо центробежного насоса, компрессора, импеллера или сатуратора.

5. Анализ возможностей применения бесконтактных приводов со свободным ротором

Перечисленные технико-технологические и конструктивные особенности бесконтактных приводов со «свободным» ротором могут эффективно использоваться в машинах и устройствах различного назначения. Рассмотрим некоторые из них.

Сатураторы, импеллеры, машины для зачистки ёмкостей. Отсутствие передаточного механизма и устойчивое вращение ротора без вала позволяет осуществлять его управляемое плоскопараллельное движение через герметичную стенку, как показано на рисунке 1.

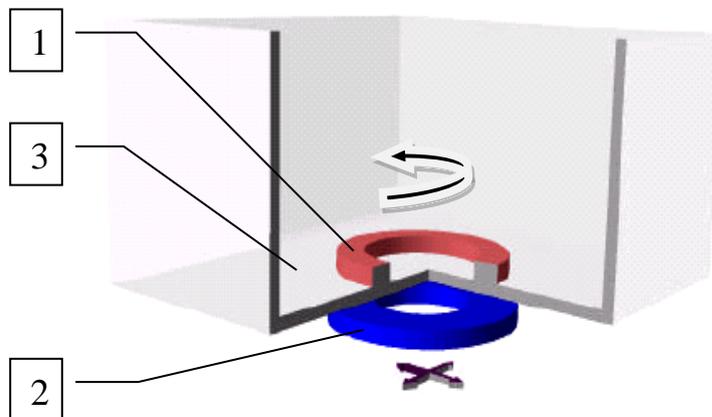


Рисунок 1. Работа, выполняемая вращающимся «свободным» ротором в замкнутом изолированном объёме

Свободный ротор 1 изолирован от индуктора силового поля 2 и совершает полезную работу (обработка поверхности, перемешивание содержимого ёмкости) в изолированном объёме 3 [1].

Вторым важным направлением применения бесконтактных приводов со «свободным» ротором являются динамические насосы и компрессоры. Основой работы данных машин является устойчивое вращательное движение кольцевого ротора в перекачиваемой среде, который снабжён лопатками (лопастями) расчётного профиля. В этом случае ротор будет в рабочем пространстве машины создавать поток жидкости или газа. Его важным техническим преимуществом является отсутствие вала с муфтами, уплотнениями и механическими передачами. Данную конструкцию принято называть «безвальной». На рисунке 2 показана конструкция центробежного (динамического) насоса с рабочим колесом без механических опор [1, 5].

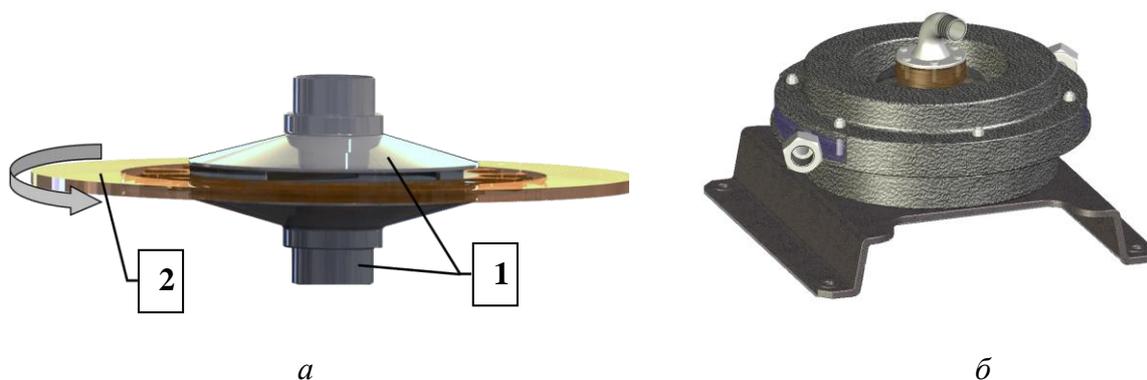


Рисунок 2. Ротор динамического насоса новой конструкции (а) и его 3D-модель (б): 1 – сдвоенное центробежное колесо; 2 – кольцевой ротор

В насосе сдвоенное центробежное колесо закреплено в центре кольцевого ротора (рисунок 2, а). Последний совмещает в себе функции системы опор и вторичного элемента электродвигателя, а весь вращающийся узел состоит из сдвоенного центробежного колеса и неподвижно соединённого с ним спицами кольцевого медного ротора.

Другим вариантом конструкции безвального динамического насоса является центробежно-вихревой насос, показанный на рисунке 3 [1, 5].

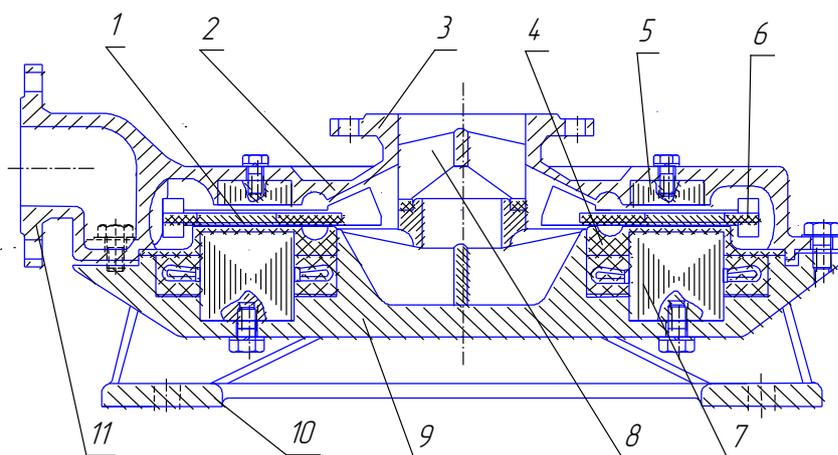


Рисунок 3. Центробежно-вихревой насос с рабочим колесом – «свободным» кольцевым ротором: 1 – рабочее колесо с кольцевым ротором; 2 – крышка насоса; 3 – фланец по подающей магистрали; 4 – пластиковый изолирующий колпак; 5 – дополнительный магнитопровод; 6 – лопасти рабочего колеса; 7 – индуктор силового поля; 8 – входной патрубок; 9 – корпус; 10 – крепление корпуса; 11 – фланец выходной горловины

Его рабочее колесо имеет внутреннюю центробежную часть и наружную вихревую. Медный кольцевой ротор находится внутри рабочего колеса, изготовленного из полимерного материала.

В радиальном направлении рабочие колёса центробежно-вихревого и динамического насосов удерживаются электродинамическими силами, действующими на кольцевой ротор, а в осевом направлении обтекающий поток создаёт условные (не выделенные конструктивно) гидродинамические опоры, исключая механический контакт между рабочими колёсами и корпусами насосов. Показанные на рисунках 2 и 3 насосы имеют ряд технических и эксплуатационных преимуществ:

- единственной движущейся деталью в насосах является рабочее колесо, содержащее кольцевой ротор и совершающее устойчивое вращение в силовом поле в жидкой среде без механической передачи вращающего момента;
- в конструкции насосов отсутствуют шарикоподшипниковые узлы;
- насосы не имеют вала и уплотнений по движущимся поверхностям (манжет, сальников, щелевых или торцевых уплотнений);
- высокая герметичность внутреннего рабочего пространства позволяют использовать безвальные насосы в качестве погружных или для безопасной перекачки особо опасных (ядовитых) жидкостей;

– высокая надёжность, так как основная часть (более 70 %) отказов динамических насосов связана с неисправностью подшипников или уплотнений по валу, более низкий уровень вибраций и шума;

– простота конструкции, что обеспечивает снижение себестоимости безвальных насосов с роторами без механических опор;

– удобство в эксплуатации и снижение эксплуатационных затрат, так как существенно облегчается ремонт и техническое обслуживание;

Адекватность и техническая реализуемость концепции создания насосов, компрессоров с роторами без механических опор была проверена в натурном эксперименте. Ротор, конструкция которого состоит из двух кольцевых пластин (аналогично ротору 2 на рисунке 2, *а*) [1] с размещёнными между ними лопатками, в эксперименте был помещён в ёмкость с водой и раскручивался. При вращении он создавал поток перекачиваемой жидкости от центра к периферии ёмкости и сохранял свою устойчивость при смещениях ёмкости во время вращения (рисунок 4).

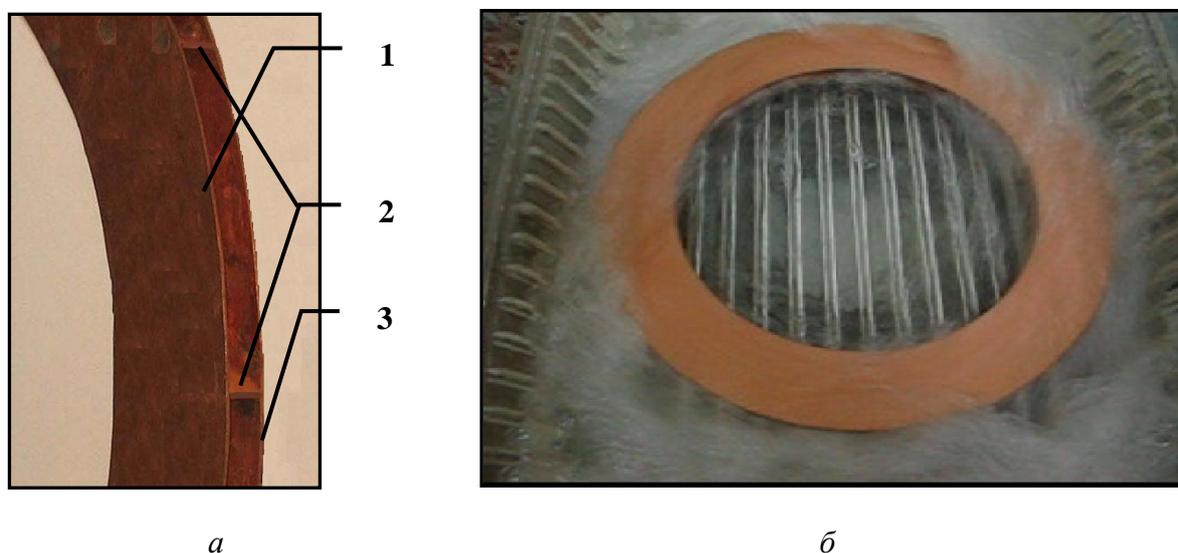


Рисунок 4. Конструкция рабочего колеса (*а*) с кольцевыми медными пластинами 1 и 3, лопатками 2 и его устойчивое вращение (*б*) в ёмкости с водой

Третьим применением привода с кольцевым ротором без механических опор является резка монокристаллов. В этом случае «свободный» кольцевой ротор используется в качестве алмазного круга с внутренней режущей кромкой (АКВР). Бесконтактный привод кольцевого ротора позволяет создавать станки резки полупроводниковых монокристаллов на совершенно новом техническом уровне, когда фактически отсутствует массивный шпиндельный узел (так называемая бесшпиндельная конструкция), а инструмент устойчиво вращается за счёт пондеромоторного действия вращающегося силового электромагнитного поля и сил сопротивлений.

Схема узла резания бесшпиндельного станка резки показана на рисунке 5. «Свободный» кольцевой ротор 1 имеет внутреннюю алмазную режущую кромку и вращается без механических опор и электрических контактов в силовом вращающемся электромагнитном поле индуктора 2, внутренней кромкой ротор режет полупроводниковый монокристалл 3 на пластины 4. Резка происходит более

эффективным способом – «напроход», что позволяет уменьшить размеры инструмента примерно в 2 раза, а массу вращающихся деталей примерно в 100...150 и более раз.

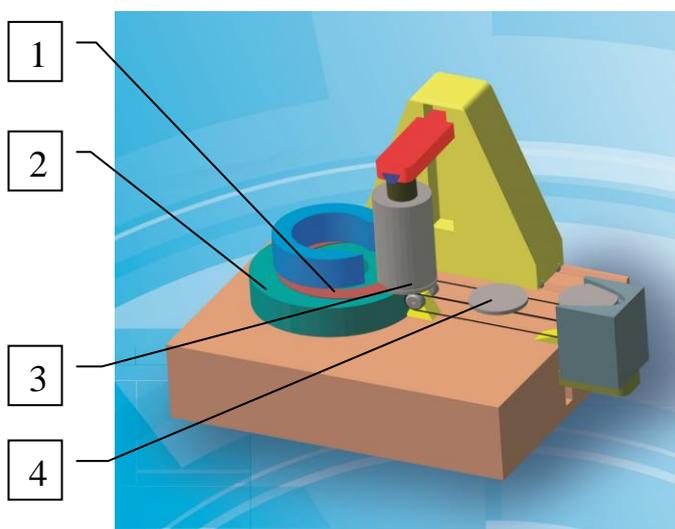


Рисунок 5. Резка монокристаллов на проход свободным кольцевым ротором в бесшпиндельном станке резки

Разработанный и изготовленный действующий экспериментальный макет станка резки монокристаллов показан на рисунке 6 [1, 7, 9].

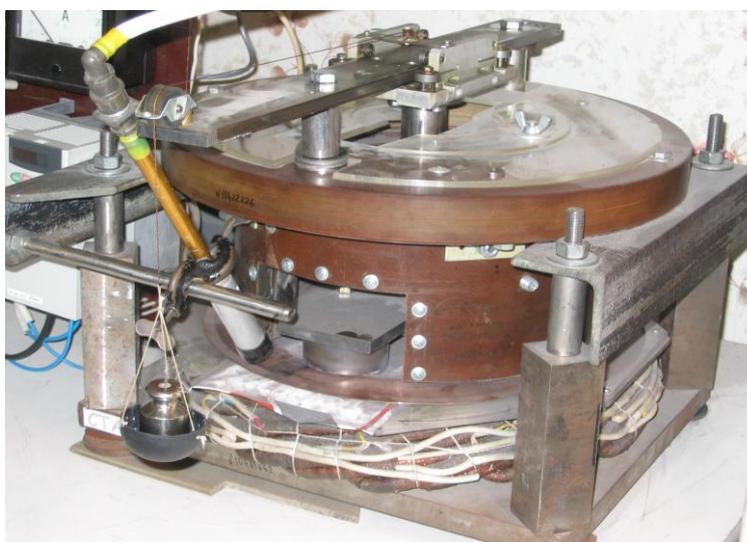


Рисунок 6. Экспериментальный макет станка резки с бесконтактным приводом алмазного круга

Применение алмазного круга без механических опор и электрических контактов при резке монокристаллов позволяет добиться снижения массы станка резки примерно в 7-10 раз, уменьшить энергопотребление станка в 3-4 раза, фактически снять ограничения на размеры по диаметру разрезаемых слитков, которые характерны для станков резки с помощью АКВР традиционной конструкции.

6. Заключение

1. Разработана обобщённая концепция создания бесконтактных приводов вращения для машин различного назначения – станков резки и шлифования, безвальных динамических насосов, импеллеров и сатураторов. В таких приводах кольцевой ротор вращается без механических опор, механических передач и электрических контактов, поэтому условно такие приводы можно считать бесконтактными, а сам ротор – «свободным».

2. Бесконтактные приводы вращения, за счёт исключения механического контакта между движущимися и неподвижными узлами, являются наиболее высокоскоростными, ресурсо- и энергосберегающими, обладают высокой производительностью, надёжностью и долговечностью.

3. Представлены результаты исследования технико-технологических преимуществ и конструктивных особенностей бесконтактных приводов с кольцевыми роторами. Проанализированы и показаны варианты их конструкций и эффективного применения в машинах для зачистки ёмкостей, в центробежно-вихревых и центробежных безвальных насосах, бесшпиндельных станках резки монокристаллов на пластины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.

2. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012 – 334 p.

3. 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.

4. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.

5. 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.

6. Брешев, В. Е. Алгоритм исследования динамических процессов в технологическом оборудовании на газостатических подшипниках / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. – №1(37). – С. 6-14.

7. 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.

8. Pavel Nosko. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose / Pavel Nosko, Vladimir Breshev, Pavel Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. VIIIA. – Lublin, 2008. – P. 126–133.

9. Брешев, В. Е. Многопараметрический синтез бесконтактных приводов с кольцевыми роторами для рабочих машин / В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Науч. журнал. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2025. – № 1(46). – С. 58–73.

Поступила в редколлегию 11.04.2025 г.