

## Научная статья

УДК 621.313.333

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-37-45

Мирошников Вадим Владимирович\*, Ерошин Сергей Сергеевич,  
Гречишкина Наталья Владимировна

Луганский государственный университет имени Владимира Даля

\*E-mail: prorectormvv@mail.ru

**ДИСКОВЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С РОТОРОМ  
БЕЗ ТРАДИЦИОННЫХ ОПОР****Информация о статье**

Поступила:

19 июля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 октября 2024 г.

Принята к печати:

24 октября 2024 г.

Опубликована:

31 октября 2024 г.

**Ключевые слова:**

дисковый асинхронный двигатель; устойчивое вращение ротора; критерий устойчивости вращения; магнитное поле; механические опоры; магнитная система; статор; магнитопровод; индуктор; симметрия

**Аннотация.**

Дисковые асинхронные двигатели (ДАД) применяются в электромеханических узлах, в которых поперечный размер (диаметр), значительно больше продольного (осевого). Рабочий орган чаще всего располагается в непосредственной близости от электрического ротора или даже является его частью. Он может выполнять две функции. В первую очередь это электрический ротор электрической машины, а во вторую – рабочий орган, который выполняет полезную технологическую работу. В качестве примера могут быть рабочие колеса центробежных, вихревых или дисковых насосов. Как правило, они имеют симметричную форму, а прикладываемая нагрузка одинакова по всем поверхностям. Вторым примером являются дисковые пилы, которые вращаются в осесимметричном магнитном поле и применяются для обработки полупроводниковых монокристаллов. Обработка ведется алмазным отрезным кругом с внутренней режущей кромкой, который является осесимметричной деталью. Ротор должен быть выполнен из металла с малым внутренним сопротивлением. Размеры ротора должны быть согласованы с параметрами магнитного поля по величине и направлению. Они должны соответствовать критерию устойчивого вращения, рассмотренного ниже.

В статье показаны достоинства и недостатки двигателей с открытой и закрытой магнитной системой, а также с двумя индукторами. Продемонстрированы реализации конструкторских решений с безобмоточным массивным ротором, который не имеет традиционных опор, а значит, не имеет вала. Посредством программы ELCUT показано распределение силовых линий магнитного потока в зависимости от компоновки двигателя. Экспериментально подтверждено регулируемое движение ротора в осевом направлении в рабочем зазоре ДАД.

**Для цитирования:** Мирошников В.В., Ерошин С.С., Гречишкина Н.В. Дисковый асинхронный двигатель с ротором без традиционных опор // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4 (174). С. 37-45. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-37-45, EDN: PKYYYY

**Введение.** В настоящее время дисковые асинхронные двигатели (ДАД) все чаще применяются в электромеханических узлах, в которых поперечный размер (диаметр) значительно больше продольного (осевого). Иногда в этих конструкциях рабочий орган располагается в непосредственной близости от электрического ротора или даже является его частью, которая может выполнять две функции: ротор электрической машины и рабочий орган, выполняющий полезную технологическую работу.

Примером могут быть разрабатываемые нами центробежные насосы, в которых традиционное рабочее колесо удерживается в пространстве и вращается в магнитном поле индуктора [1, 2].

Вторым примером может быть узел резки слитков кремния алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой. Алмазный инструмент вращается в магнитном поле регулируемой конфигурации и является свободным ротором, то есть не имеет вала и подшипников [3, 4].

Алмазный отрезной круг располагается на опорной плоскости, перпендикулярной оси статора. Зубцы магнитопровода индуктора совпадают с опорной плоскостью. Индуктор содержит трехфазную обмотку. Пазы обмоток осесимметричны и прорезаны под углом к радиусу. Алмазный отрезной круг, являясь режущим инструментом, выполняет функцию ротора ДАД. Ротор не имеет обмотки. Он изготавливается из бериллиевой бронзы, прочность которой почти такая же, как у стали аустенитного класса, а электрическое сопротивление сопоставимо с медью.

Размеры ротора и индуктора должны быть согласованы. Направление вращения ротора и магнитного поля определяет устойчивость вращения ротора. Конфигурация магнитного поля задается геометрией индуктора. Действие электромагнитных сил на свободный кольцевой ротор, находящийся во вращающемся магнитном поле, описано в наших работах [5-10].

Магнитные силы, которые действуют на токопроводящий ротор, в каждой точке имеют две составляющие: тангенциальную  $\vec{F}_t$  и радиальную  $\vec{F}_r$ . Тангенциальная сила  $\vec{F}_t$  создает вращающий момент, радиальная сила  $\vec{F}_r$  может быть направлена в центр поля или от центра. В первом случае центр масс вращающегося ротора будет двигаться по сходящейся спирали в центр магнитного поля, во втором – по расходящейся спирали от центра.

Так как рабочий орган не имеет механических опор, актуальным является вопрос устойчивости вращения. Проведены исследования движения кольцевых пластин в осесимметричном поле настраиваемой конфигурации. Установлены условия устойчивого вращения ротора. Выявлены конструктивные и технологические факторы, влияющие на устойчивость вращения диска. Разработан критерий устойчивости [11,12].

#### **Экспериментальное подтверждение работоспособности ДАД, ротор которого не имеет традиционных механических опор.**

Экспериментальные исследования выполнялись на стенде (Рис. 1). Стенд включает два индуктора. Первый 1 имеет открытую магнитную систему, второй 2 – закрытую. Индукторы расположены на столе 3. На панели управления 4 размещены переключатели 5 и закреплен преобразователь частоты 6. Амперметры 7 показывают значение токов в каждой фазе питающей цепи.

Для регулирования частоты вращения магнитного поля используется преобразователь частоты *MITSUBISHI transistorized inverter fr-E540-3,7k-ec*, имеющий номинальную мощность 3,7 кВт и позволяющий регулировать частоту выходного напряжения от 0,5 до 400 Гц [13].

Универсальность стенда позволяет реализовывать различные схемы компоновки ДАД с ротором без механических опор: с открытой магнитной системой, с закрытой магнитной системой и с двумя активными статорами, то есть индукторами.

Наиболее простым по конструкции является ДАД с открытой магнитной системой и кольцевым безобмоточным ротором (см. Рис 1, поз. 1). Обращаем внимание, что, если ротор и индуктор имеют

случайные размеры, ротор будет вращаться неустойчиво. На Рис. 2 показан алюминиевый диск, размеры которого не соответствуют критерию устойчивости [11]. При включении диск поднимается над индуктором, вращается неустойчиво, непрерывно наталкивается на ограничительные стойки, которые возвращают его в магнитное поле. При отсутствии внешней нагрузки диск вращается с максимальной частотой 1500 об/мин как ротор синхронной ДАД.

Рис. 3 демонстрирует работу двигателя с ротором из бериллиевой бронзы, размеры которого соответствуют критерию устойчивого вращения. В начальный момент центр ротора не совпадает с центром магнитного поля, а при плавном пуске ротор начинает двигаться по сходящейся спирали в центр поля, в котором он будет устойчиво вращаться (см. Рис. 3а).

Если предположить, что кольцевой ротор имеет на внутренней поверхности алмазную режущую кромку, получается узел резания, с помощью которого можно резать монокристаллы, например, кремния. На Рис. 3б технологическая нагрузка имитируется внешним воздействием. Под этим воздействием ротор уходит от центра, воспринимает силу резания, но сохраняет устойчивое вращение вдоль ГЦОИ. Если снять технологическую нагрузку, ротор вернется в исходное положение (рис. 3в).

Главным преимуществом открытой магнитной системы является ее простота. Основным недостатком – большое сопротивление магнитной цепи машины, так как якорь изготовлен не из ферромагнетика и не имеет обмотки. Это приводит к уменьшению магнитного потока, проходящего через ротор. На Рис. 4 приведена развертка сектора ДАД, которая равна полюсному делению. Компьютерное моделирование с помощью отечественной программы ELCUT [13] показало распределение силовых линий и силы магнитного поля, которые действуют на ротор, в рабочем зазоре. Статор 1 содержит 24 паза (на Рис. 4 показано только 6 пазов). В пазах статора находится трехфазная, двухслойная обмотка 2 с укороченным шагом ( $\beta_1 = 5/6$ ) и двумя парами полюсов [15]. Ротор 3 отделен от поверхности статора воздушным зазором. Как видно из Рис. 5, большинство силовых линий вращающегося магнитного поля замыкаются над пазами статора, а сравнительно небольшая часть проходит через ротор. Это приводит к нагреву обмоток и существенному снижению КПД.

ДАД с открытой магнитной системой удобно использовать для перемешивания жидких сред в замкнутых объемах с одновременным их подогревом за счет тепла, выделяемого статором.

Если расположить над ротором магнитопровод, сопротивление магнитной цепи существенно уменьшится. Эффективность электрической машины возрастет. На Рис. 1 (см. поз. 2) показан действующий макет узла резки слитка кремния на пластины, в основе лежит ДАД с закрытой магнитной системой. Он состоит из индуктора 8, кольцевого магнитопровода 9 и кольцевого ротора 10, который

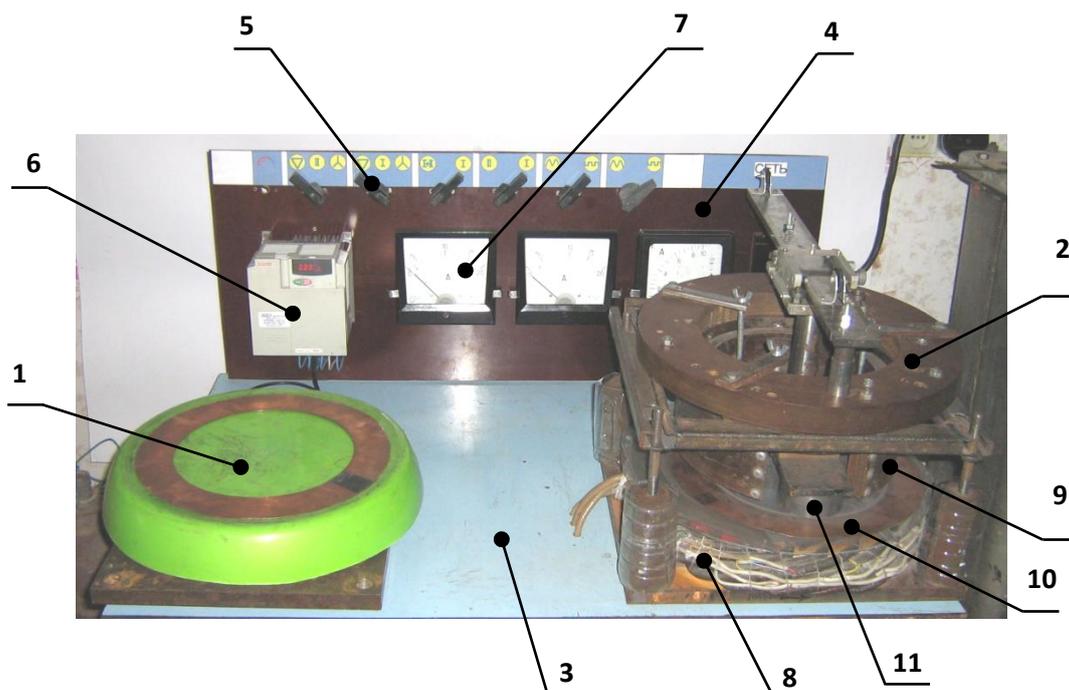


Рис. 1. Испытательный стенд: 1 – ДАД с открытой магнитной системой; 2 – ДАД с закрытой магнитной системой; 3 – стол; 4 – панель управления; 5 – переключатели; 6 – преобразователь частоты; 7 – амперметры; 8 – нижний индуктор; 9 – верхний магнитопровод; 10 – алмазный отрезной диск; 11 – разрезаемый монокристалл кремния

Fig. 1. Test bench: 1 – DBP with an open magnetic system; 2 – DBP with a closed magnetic system; 3 – table; 4 – control panel; 5 – switches; 6 – frequency converter; 7 – ammeters; 8 – lower inductor; 9 – upper magnetic circuit; 10 – diamond cutting disc; 11 – cut silicon single crystal



Рис. 2. Демонстрация вращения ротора, параметры которого не соответствуют критерию устойчивости  
Fig. 2. Demonstration of rotation of a rotor whose parameters do not meet the stability criterion

одновременно является элементом ДАД и алмазным инструментом с внутренней режущей кромкой. Магнитопровод 9 имеет сквозной паз для перемещения слитка кремния 11. Через этот паз производится три движения: подача слитка на толщину отрезаемой пластины, радиальная подача резания и холостой ход.

Трехмерная модель ДАД приведена на Рис. 5. Она включает в себя статор 1 с распределенной трехфазной обмоткой 2, ротор 3 и магнитопровод 4.

Распределение силовых линий показано на Рис. 6. Из рисунка видно, что основная часть силовых линий магнитного поля, создаваемого обмотками 2, направлена от поверхности зубцов статора 1 к магнитопроводу 4 и проходит через ротор 3 нормально

к его поверхности. Так как силы, действующие на ротор, пропорциональны магнитному потоку, вращающий момент на роторе ДАД возрастает. Кроме того, наличие магнитопровода понижает сопротивление магнитной цепи ДАД, что способствует уменьшению нагрева обмоток статора и повышению КПД.

Эффективность системы будет повышена, если заменить верхний магнитопровод индуктором. Верхний индуктор должен быть симметричен нижнему. Эта компоновка представлена на Рис. 7. Она включает в себя нижний 1 и верхний 2 индукторы, кольцевой ротор 3, который размещен в рабочем зазоре. Ротор монолитный, выполнен из алюминия.

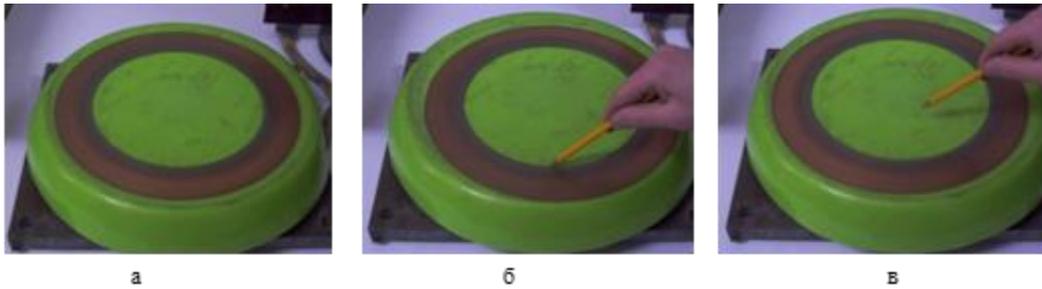


Рис. 3. Демонстрация вращения ротора, размеры которого соответствуют критерию устойчивого вращения

Fig. 3. Demonstration of rotor rotation, the dimensions of which correspond to the criterion of stable rotation

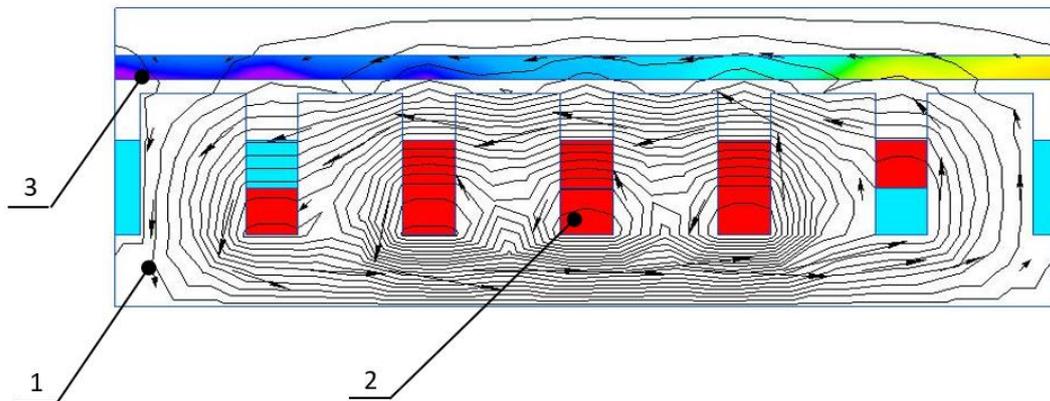


Рис. 4. Распределение силовых линий магнитного поля ДАД с открытой магнитной системой: 1 – статор; 2 – обмотка в пазе; 3 – ротор

Fig. 4. Distribution of magnetic field lines of DBP with an open magnetic system: 1 – stator; 2 – winding in the groove; 3 – rotor

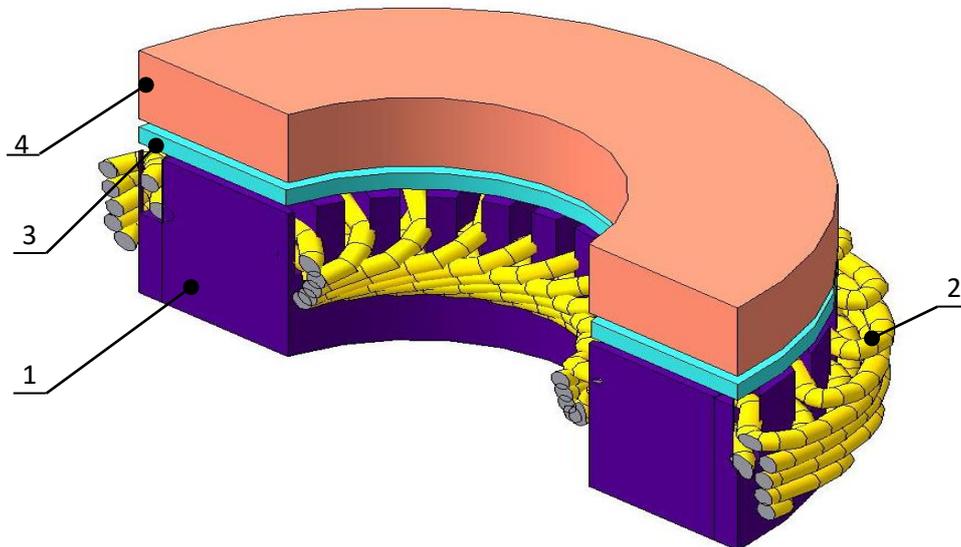


Рис. 5. Трехмерная модель ДАД с верхним магнитопроводом: 1 – статор; 2 – обмотка; 3 – кольцевой

Fig. 5. Three-dimensional model of a DBP with an upper magnetic core: 1 – stator; 2 – winding; 3 – ring

Если ДАД имеет два активных статора, то распределение магнитного поля в рабочем зазоре будет зависеть от относительного углового положения статоров. Необходимым условием при конструировании ДАД является симметрия статоров. Будем считать, что положение статоров «согласовано»,

если северный полюс верхнего статора находится над южным полюсом нижнего. В этом случае магнитное поле в рабочем зазоре однородно. Если имеет место угловое смещение полюсов, то поле становится неоднородным, что приводит к изменению направления сил, действующих на ротор.

В общем случае на ротор действуют силы, расположенные под углом к его плоскости. При этом можно рассмотреть три режима движения ротора:

- первый режим – движение под действием сил, лежащих в плоскости ротора;
- второй режим – движение под действием сил, расположенных под углом к плоскости ротора;
- третий режим – движение под действием сил, направленных перпендикулярно плоскости ротора.

Первый режим движения ротора демонстрирует Рис. 7. Статоры находятся в согласованном положении. Об этом свидетельствуют цветные маркеры на цилиндрических поверхностях статоров. Зеленый цвет соответствует северному полюсу, красный – южному.

При «согласованном» положении статоров силовые линии проходят вертикально и достаточно параллельно друг другу, что создает однородное поле

в рабочем зазоре ДАД. В этом случае в соответствии с законом электромагнитной индукции на проводник с током будет действовать сила  $\vec{F}\tau$  в плоскости ротора. Это соответствует первому режиму.

Второй режим движения ротора будет при смещении индукторов влево или вправо (Рис. 8). Смещение индукторов приводит к появлению вертикальной составляющей силы  $\vec{F}_z$ . Под действием этой силы ротор поднимается над поверхностью нижнего статора, а  $\vec{F}\tau$  осуществляет вращение его. Если смещение верхнего статора будет влево, сила  $\vec{F}\tau$  будет направлена вниз.

Если сила  $\vec{F}_z$  уравновешивает вес ротора, он зависает в рабочем зазоре ДАД. Если  $\vec{F}_z$  превышает вес ротора, то он прижимается к поверхности верхнего индуктора.

Третий режим движения ротора имеет место при смещении полюсов на  $90^\circ$  относительно «согласо-

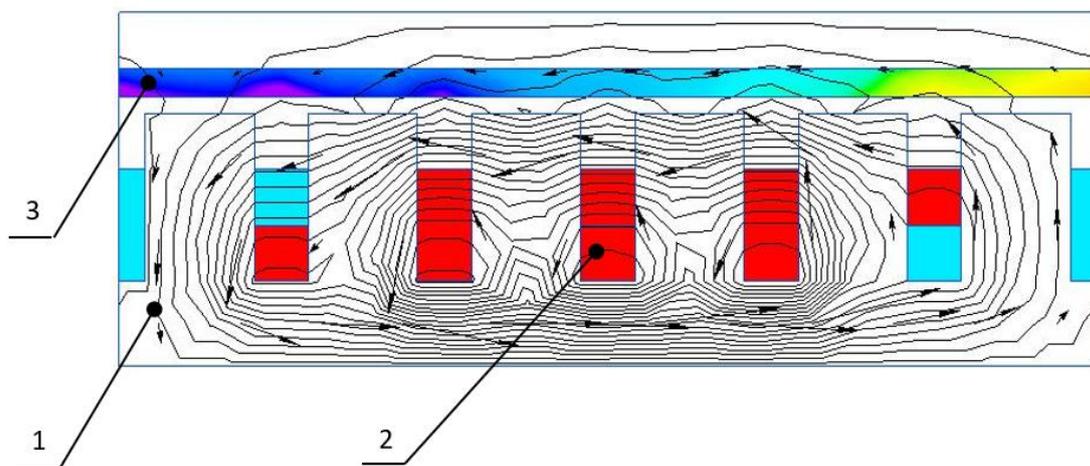


Рис. 6. Распределение силовых линий магнитного поля в ДАД с открытой магнитной системой: 1 – статор; 2 – обмотка в пазе; 3 – ротор

Fig. 6. Distribution of magnetic field lines in a DMA with an open magnetic system: 1 – stator; 2 – winding in the groove; 3 – rotor

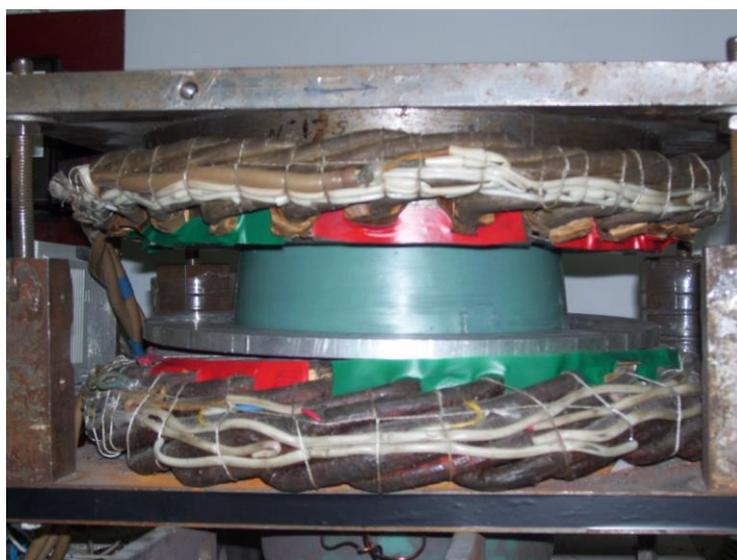


Рис. 7. ДАД с двумя индукторами: нижний 1 и верхний 2 индукторы, кольцевой ротор 3

Fig. 7. DBP with two inductors: lower 1 and upper 2 inductors, ring rotor 3

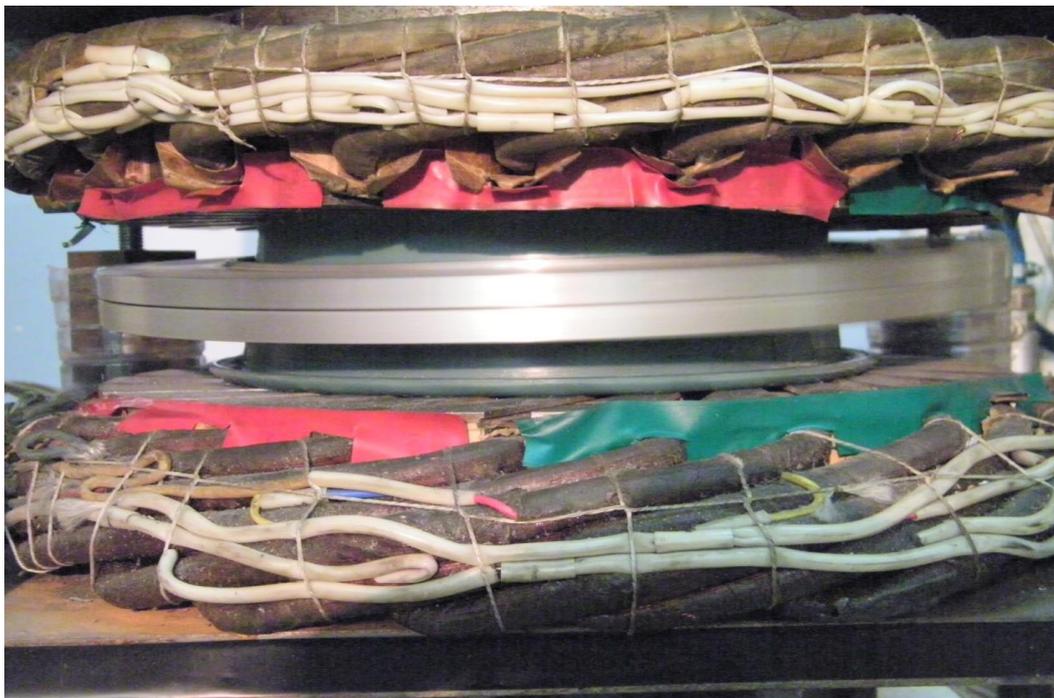


Рис. 8. Положения ротора в рабочем зазоре ДВД при относительном угловом смещении статоров на  $30^\circ$  вправо

Fig. 8. Rotor positions in the working gap DBP with a relative angular displacement of the stators by  $30^\circ$  to the right

ванного» положения. В этом случае над северным полюсом будет северный, а над южным полюсом – южный. Как показывает компьютерное моделирование, силовые линии в рабочем зазоре идут горизонтально к плоскости ротора. Такое направление не создает сил в плоскости ротора, то есть не создается вращающий момент. В этих условиях на ротор действует только вертикальная составляющая сила  $F_z$ . Ротор не вращается.

Таким образом, следуя универсальному принципу природы – движение от простого к сложному – мы пытались показать, что ДВД с открытой магнитной системой имеет простую конструкцию. С экономической точки зрения он не выгоден, так как имеет большие тепловые потери, а значит, малый КПД. ДВД с закрытой магнитной системой благодаря использованию магнитопровода становится более экономичным. Именно по этой схеме нами изготовлен экспериментальный образец узла резки.

Тепловые потери уменьшаются, а мощность привода возрастает, если применить систему двойных индукторов. Технично-экономические показатели такой машины соответствуют серийному электродвигателю.

#### Выводы

1. Перспективное направление совершенствования рабочих машин заключается в совмещении функций рабочих органов и ротора электродвигателя. При этом сокращается количество вращающихся деталей, что способствует повышению надежности, уменьшению массогабаритных характеристик и энергопотребления при снижении себестоимости.

2. Существующие бесконтактные опоры частично решают задачи совершенствования подвижных узлов машин. Замена традиционных подшипников на бесконтактные не исключает из конструкции

вал, который передает крутящий момент на рабочий орган. Если рабочий орган выполнен из парамагнетика и имеет форму тела вращения, он будет устойчиво вращаться в магнитном поле, если выполняется критерий вращения.

3. Нами разработаны опытные образцы центробежных насосов и узел резки алмазным отрезным кругом с внутренней режущей кромкой монокристаллов кремния, которые прошли испытания в промышленных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошник С. А., Ерошин С. С., Брешев В. Е. Применение торцевого асинхронного двигателя для непосредственного привода рабочего колеса центробежного насоса // Тр. МНТК «Физические и компьютерные технологии». Харьков: МНТК ФЭД, 2008. С. 401–403.
2. Ерошин С. С., Победа Т. В., Гречишкина Н. В. Центробежные насосы с рабочим колесом без механических опор // Вестник ЛГУ им. В. Даля. Луганск : РИНЦ ISSN 2522-4905 2021, № 9 (51). С. 19–23.
3. Ерошин С. С., Мирошник С. А. Пристрій для різання монокристалів // Користа модель UA 85247 U, Бюл. № 21, 11.11.2013.
4. Мирошник С. А., Ерошин С. С. Применение торцевого асинхронного двигателя в установке алмазной резки кругами АКВР // Тр. МНТК «Физические и компьютерные технологии». Харьков : ХНПК ФЭД, 2008. С. 169–171.
5. Ерошин С. С., Мирошник С. А. Применение дисковых асинхронных двигателей в станках и приборах с кольцевыми рабочими органами // Труды Луганского отделения Международной Академии информатизации. Луганск : Изд-во ВСУ им. В. Даля, 2011. № 1(23). С. 37–40.

6. Ерошин С. С., Брешев В. Е. Создание ресурсосберегающего оборудования нового поколения для резки монокристаллов алмазным кругом, который движется в магнитном поле и является кольцевым ротором привода // Тр. МНТК «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении». Одесса-Киев: АТМ Украина, 2004. 184 с. С. 52–55.

7. Ерошин С. С. Определение сил, действующую на кольцевую пластинку, находящуюся во вращающемся полем поле // Сборник научных трудов Восточноукраинского государственного университета. Серия Машиностроение. Издательство ВУГУ, Луганск, 1998. С. 13–21.

8. Ерошин С. С., Невзлин Б. И., Брешев В. Е. Исследование условий устойчивого равновесия кольцевого ротора во вращающемся силовом поле // Труды Луганского отделения Международной Академии информатизации. Луганск : Из-во ВСУ им. В. Даля, 2004. № 2(9). С. 81–87.

9. Ерошин С. С., Таращанский М.Т., Мирошник С.А. Исследование движения кольцевого ротора асинхронного торцевого двигателя в режиме холостого хода// Труды Луганского отделения Международной Академии информатизации. Луганск : Из-во ВСУ им. В. Даля, 2008. № 1(16) С. 44–49.

10. Ерошин С. С., Таращанский М. Т., Мирошник С. А. Влияние сил трения на устойчивость дви-

жения кольцевого ротора дискового асинхронного двигателя // Труды Луганского отделения Международной Академии информатизации. Луганск : Изд-во ВСУ им. В. Даля, 2009. № 2(19) С. 58–61.

11. Ерошин С. С., Таращанский М. Т., Мирошник С. А. Исследование критерия устойчивости кольцевого ротора асинхронного торцевого двигателя // Ресурсозберігаючі технології вирівнювання та обробки тиском матеріалів у машиновудуванні. Збірник наукових праць – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. С. 229–234.

12. Ерошин С. С., Мирошников В. В., Махортова Н. В., Победа Т. В. Конструктивные особенности машин с прямым приводом кольцевых рабочих органов. Луганск-Донецк : Изд-во ЛНУ им. В. Даля, ООО НПП «Фолиант», 2019. 116 с.

13. ELCUT Компьютерная программа/  
[https://elcut.ru/feat\\_r.htm](https://elcut.ru/feat_r.htm)

14. Пляхов Н. Д., Стоцкая А. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Научное приборостроение. 2012. Том 22. № 4. С. 5–18. ISSN 0868–5886 .

15. Голоскоков Д. П. Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. Учебник для вузов. СПб. : Питер, 2004. 539 с.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Мирошников Вадим Владимирович** – доктор техн. наук, профессор, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (291034, Луганская Народная Республика, г. о. город Луганск, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), e-mail: prorectormvv@mail.ru

**Ерошин Сергей Сергеевич** – доктор техн. наук, профессор, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (291034, Луганская Народная Республика, г. о. город Луганск, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), e-mail: sergey.eroshin@gmail.com

**Гречишкина Наталья Владимировна** – старший преподаватель, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (291034, Луганская Народная Республика, г. о. город Луганск, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), e-mail: natalisha.grech@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Мирошников В. В. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; выводы.

Ерошин С. С. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Гречишкина Н. В. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## DISC TYPE ASYNCHRONOUS MOTOR WITHOUT TRADITIONAL SUPPORTS



## Article info

Received:

19 July 2024

Accepted for publication:

15 October 2024

Accepted:

24 October 2024

Published:

31 October 2024

**Keywords:** disk asynchronous motor; steady rotation of the rotor; criterion of rotation stability; magnetic field; mechanical supports; magnetic system; stator; magnetic circuit; inductor; symmetry.

**Abstract.**

*Disk asynchronous motors (DAM) are used in electromechanical assemblies in which the transverse size (diameter) is significantly larger than the longitudinal (axial) one. The working body is most often located in close proximity to the electric rotor or even is part of it. It can perform two functions. First of all, it is an electric rotor of an electric machine, and secondly, a working organ that performs useful technological work. As an example, impellers of centrifugal, vortex or disc pumps can be used. As a rule, they have a symmetrical shape, and the applied load is the same on all surfaces. The second example is circular saws that rotate in an axisymmetric magnetic field and are used for processing semiconductor single crystals. The processing is carried out by a diamond cutting wheel with an inner cutting edge, which is an axisymmetric part. The rotor must be made of metal with low internal resistance. The dimensions of the rotor must be consistent with the parameters of the magnetic field in magnitude and direction. They must meet the criterion of steady rotation discussed below. The advantages and disadvantages of motors with an open and closed magnetic system, as well as with two inductors, are shown. The implementation of design solutions with a non-winding massive rotor, which does not have traditional supports, and therefore does not have a shaft, is demonstrated. Using the ELCUT program, the distribution of magnetic flux lines is shown depending on the engine layout. The controlled movement of the rotor in the axial direction in the working gap of the DAM has been experimentally confirmed.*

**For citation:** Miroshnikov V.V., Eroshin S.S., Grechishkina N.V. Disc type asynchronous motor without traditional supports. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 4(174):37-45 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-37-45, EDN: PKYYYU

## REFERENCES

1. Miroshnik S.A., Eroshin S.S., Breshev V.E. Application of an end asynchronous motor for direct drive of the impeller of a centrifugal pump. *Tr. ISTK "Physical and computer technologies"*. Kharkiv: MNTK FED; 2008.
2. Eroshin S.S., Pobeda T.V., Grechishkina N.V. Centrifugal pumps with impeller without mechanical supports. *Bulletin of LSU named after V.Dahl*. Lugansk. RSCI ISSN 2522-4905. 2021;9 (51):19–23.
3. Eroshin S.S., Miroshnik S.A. Priestry for rizannya monocrystals. Korista model UA 85247 U, Bul. No. 21, 11.11.2013.
4. Miroshnik S.A., Eroshin S.S. The use of an end asynchronous motor in a diamond cutting machine with AKVR circles / S.A. Miroshnik, S.S. Eroshin. *Tr. MNTC "Physical and computer technologies"*. Kharkiv: KHNPk FED; 2008.
5. Eroshin S.S., Miroshnik S.A. The use of disc asynchronous motors in machine tools and devices with ring working bodies. *Proceedings of the Lugansk*

*branch of the International Academy of Informatization*. Lugansk: Publishing House of the VSU named after V. Dahl; 2011; 1(23):37–40.

6. Eroshin S.S., Breshev V.E. Creation of resource-saving equipment of a new generation for cutting single crystals with a diamond circle, which moves in a magnetic field and is an annular drive rotor. *Tr. MNTK "New and non-traditional technologies in resource and energy saving"*. Odessa-Kiev: ATM Ukraine; 2004. Pp. 52–55.

7. Eroshin S.S. Determination of forces acting on an annular plate located in a rotating field. *Collection of scientific papers of the East Ukrainian State University*. The Mechanical Engineering series. Publisher of VUGU, Lugansk, 1998. Pp. 13–21.

8. Eroshin S.S., Nevzlin B.I., Breshev V.E. Investigation of the conditions of stable equilibrium of an annular rotor in a rotating force field. *Proceedings of the Lugansk branch of the International Academy of Informatization*. Lugansk: From the AFU named after V. Dahl; 2004; 2(9):81–87.

9. Eroshin S.S., Tarashchanasky M.T., Miroshnik S.A. Investigation of the motion of the annular rotor of an asynchronous end motor in the idle mode. *Proceedings of the Lugansk branch of the International Academy of Informatization*. Lugansk: Publishing House of the VSU named after V. Dahl; 2008; 1(16):44–49

10. Eroshin S.S., Tarashchanasky M.T., Miroshnik S.A. The influence of friction forces on the stability of motion of the annular rotor of a disk asynchronous motor. *Proceedings of the Lugansk branch of the International Academy of Informatization*. Lugansk: Publishing House of the VSU named after V. Dahl; 2009; 2(19):58–61.

11. Eroshin S.S., Tarashchanasky M.T., Miroshnik S.A. Investigation of the stability criterion of the annular rotor of an asynchronous end motor. *Resource-saving technologies of production and pressure treat-*

*ment of materials in Mechanical Engineering. Collection of scientific papers*. Luhansk: VNU publishing house named after him. V. Dahl; 2008. Pp. 229–234.

12. Eroshin S.S., Miroshnikov V.V., Makhortova N.V., Pobeda T.V. Design features of machines with direct drive of ring working bodies. Lugansk-Donetsk: Publishing House of V. Dahl LNU, NPP Foliant LLC; 2019.

13. ELCUT Computer Program/  
[https://elcut.ru/feat\\_r.htm](https://elcut.ru/feat_r.htm)

14. Plyakhov N.D., Stotskaya A.D. Review of the practical application of active magnetic bearings. *Scientific instrument engineering*. 2012; 22(4)5–18. ISSN 0868–5886 .

15. Goloskokov D.P. Equations of mathematical physics. Solving problems in the Maple system. Textbook for universities. St. Petersburg: Peter; 2004.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

*About the author:*

**Vadim V. Miroshnikov** – Dr. Sc. in Engineering, Professor, Lugansk State University named after Vladimir Da la (291034, Lugansk People's Republic, Lugansk city, Lugansk, Molodezhny sq., 20a), e-mail: proectormvv@mail.ru

**Sergey S. Eroshin** – Dr. Sc. in Engineering, Professor, Lugansk State University named after Vladimir Dahl (291034, Lugansk People's Republic, city of Lugansk, Lugansk, Molodezhny sq., 20a), - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sergey.eroshin@gmail.com

**Natalia V. Grechishkina** – senior lecturer, Lugansk State University named after Vladimir Dahl (291034, Luhansk People's Republic, city of Lugansk, Lugansk, Molodezhny sq., 20a), e-mail: natalisha.grech@mail.ru

*Contribution of the authors:*

Vadim V. Miroshnikov – formulation of a research task; scientific management; conceptualization of research; conclusions.

Sergey S. Eroshin – setting a research task; scientific management; review of the relevant literature; conceptualization of research; writing text, data collection and analysis; conclusions.

Natalia V. Grechishkina – scientific management; review of relevant literature; data collection and analysis.

*Authors have read and approved the final manuscript.*

