

УДК 681.7.054.43; 621.671

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВРАЩЕНИЯ
КОЛЬЦЕВОГО РОТОРА БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР В
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ****Владимир Евгеньевич Брешев¹**, д-р техн. наук,**Юлия Сергеевна Долженко²****Алексей Юрьевич Николаев³**¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, РоссияТел. +79591596616; E-mail: veb_lug@mail.ru

Аннотация: В работе представлены результаты исследований по обеспечению асимптотической устойчивости вращающегося кольцевого ротора в электромагнитном поле. Разработана концепция обеспечения устойчивости вращения и плоскопараллельного движения кольцевого ротора, который может служить рабочим органом или инструментом в машинах различного назначения – динамических насосах и компрессорах, станках резки монокристаллов, сатураторах и др. машинах. Показано решение научно-технической задачи обеспечения асимптотической устойчивости движения кольцевого ротора под действием движущих сил электромагнитной природы. Её решение состоит в особом распределении движущих электромагнитных сил, действующих на ротор, которые в исходном положении ротора приводятся только к крутящему моменту. При возникновении смещения ротора движущие силы перераспределяются и приводятся к крутящему моменту и стабилизирующему главному вектору.

Ключевые слова: кольцевой ротор без механических опор, асимптотическая устойчивость движения, движущие силы, условия устойчивости движения.

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF STABILIZING THE ROTATION OF A
RING ROTOR WITHOUT MECHANICAL SUPPORT IN AN
ELECTROMAGNETIC FIELD****Vladimir. E. Breshev, D. Eng.****Yuliya. S. Dolzhenko,****Alexey. Ju Nikolaev**

Abstract: This paper presents the results of research into ensuring the asymptotic stability of a rotating annular rotor in an electromagnetic field. A concept has been developed for ensuring the stability of rotation and plane-parallel motion of an annular rotor, which can serve as a working element or tool in various machines—dynamic pumps and compressors, single-crystal cutting machines, saturators, and other machines. A solution to the scientific and technical problem of ensuring the asymptotic stability of an annular rotor's motion under the action of electromagnetic driving forces is presented. This solution involves a special distribution of the electromagnetic driving forces acting on the rotor, which in the rotor's initial position are reduced only to torque. When rotor displacement occurs, the driving forces are redistributed and reduced to torque and a stabilizing principal vector.

Keywords: annular rotor without mechanical supports, asymptotic stability of motion, driving forces, and conditions for stability of motion.

Введение

В работах [1-3] были представлены роторные машины, в которых выполняют полезную работу или реализуют целевые техпроцессы кольцевые роторы, совершающие устойчивое вращение под действием электромагнитного поля при отсутствии механических передач, механических опор и электрических контактов. Движение такого, условно «свободного», ротора и выполнение им полезной работы обеспечивается действием на него движущих сил электромагнитной природы, которые особым образом распределены, в зависимости от точки приложения в силовом поле.

В рассматриваемом нами случае твердотельный механический контакт вращающегося кольцевого ротора с деталями и узлами машины заменяется действием движущих электромагнитных сил, газо- или гидродинамических сил сопротивлений и реакций опор. Это позволяет реализовать в таком «бесконтактном» приводе ряд технико-технологических преимуществ перед приводами традиционных конструкций, в которых роторы удерживаются шарикоподшипниками.

Исключение твердотельного механического контакта позволяет минимизировать или полностью исключить износ движущихся деталей и узлов привода, снизить непродуктивные потери, исключить люфт и механический гистерезис, уменьшить массу и количество вращающихся узлов, снизить уровень вибраций и, таким образом, сделать роторные машины высокоскоростными, более надёжными и энергоэффективными [2-6].

С другой стороны, исключение механических опор и механического закрепления вращающегося ротора приводит к необходимости решения сложной научно-технической задачи обеспечения устойчивости его движения и положения в пространстве [1, 3, 7]. До настоящего времени эта задача не решена, не существует обобщённой концепции устойчивости движения кольцевых роторов, вращающихся в электромагнитном силовом поле при отсутствии механических опор и механического закрепления, методики синтеза таких приводов. При этом необходимо подчеркнуть, что речь идёт о пассивном способе обеспечения устойчивости движения кольцевых роторов, который не предусматривает наличие следящей системы с датчиками контроля и регулирования положения ротора электронными устройствами по обратной связи.

Цель исследования – решение задачи обеспечения устойчивости движения кольцевого ротора, вращающегося под действием электромагнитного поля при отсутствии механических опор, механического закрепления и электрических контактов.

1. Постановка задачи и методика исследований

Решение задачи обеспечения асимптотической устойчивости [1, 3, 7] вращающегося кольцевого ротора без механических опор разделим на три последовательных этапа. На первом этапе необходимо сформулировать концепцию обеспечения устойчивости движения кольцевых роторов без механических опор в силовом поле пассивным способом (без применения датчиков и электронных устройств регулирования положения ротора). На втором этапе необходимо разработать математическую модель системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора, включающую аналитические выражения для вращающего момента и главного вектора. Затем, на третьем этапе, исследовать условия устойчивости движения кольцевого ротора через соотношения геометрических параметров ротора и индуктора, силовых параметров – электромагнитной индукции, величины и направления движущих сил.

Достижение устойчивости движения кольцевого ротора на холостом ходу или под действием внешней нагрузки и сил сопротивлений на различных скоростных режимах заключается в сохранении им заданного положения равновесия в рабочем пространстве машины, а при возникновении сколь угодно малых смещений (возмущений) – возвращении к центральному положению равновесия [1, 3, 5, 7].

2. Концепция обеспечения устойчивости движения кольцевых роторов без механических опор в силовом электромагнитном поле

Сформулируем концепцию (от лат. *conceptio* – «система понимания») обеспечения устойчивости движения кольцевых роторов без механических опор и какого-либо механического закрепления, находящихся под действием силового электромагнитного поля. Пусть кольцевой ротор имеет форму осесимметричного диска с внутренним вырезом и изготовлен из однородного парамагнитного материала (например, меди или сплавов алюминия). Тогда переменное электромагнитное силовое поле приведёт к возникновению на роторе пондеромоторных, так называемых «движущих сил», приводящих его во вращение с возможными перемещениями в плоскости вращения. Данные движущие силы являются потенциальными [3, 7, 8], объёмными по характеру действия, а по величине – достаточными для обеспечения устойчивого вращения ротора и выполнения им полезной работы [9, 10]. Сформулируем основные условия и требования для обеспечения устойчивости движения кольцевых роторов без механических опор:

а) в общем случае кольцевой ротор совершает плоскопараллельное движение в плоскости своего вращения под действием движущих сил. Движение ротора имеет две компоненты – вращение вокруг собственного центра масс и перемещение центра масс в плоскости. Устойчивость движения ротора также необходимо рассматривать по двум компонентам – устойчивость вращения (сохранение заданной частоты вращения) и устойчивость положения центра масс кольцевого ротора в плоскости вращения.

б) устойчивость вращательного движения обеспечивается стабильностью и регулируемостью величины крутящего (вращающего) момента $M_{от}$ движущих сил, независимо от положения кольцевого ротора, частоты его вращения и других условий.

в) устойчивость положения центра масс ротора можно рассматривать как устойчивость материальной точки, на которую действуют потенциальные движущие силы и силы сопротивлений. Устойчивому положению равновесия, согласно теореме Лагранжа – Дирихле, соответствует минимум потенциальной энергии, а любое смещение ротора из этого положения возможно при совершении работы против сил поля [3, 7, 8, 10]. Такое смещение сопровождается увеличением потенциальной энергии положения, а при снятии внешнего воздействия стабилизирующая сила (радиальная равнодействующая движущих сил F_r) совершает работу по перемещению ротора в исходное центральное положение равновесия. Стремление ротора с течением времени вернуться к нулевому смещению от положения равновесия соответствует его асимптотической устойчивости. При сколь угодно малом смещении e_x (вдоль оси X) ротора от центрального положения равновесия возникает радиальная равнодействующая движущих сил F_{rx} , направленная против смещения. При этом вращающий момент движущих сил $M_{от}$ продолжает действовать и уравнивает момент сил сопротивления M_c , что обеспечивает равномерное вращение кольцевого ротора с заданной угловой скоростью ω .

г) для достижения асимптотической устойчивости движения кольцевого ротора, действующие на него движущие силы должны отвечать следующим условиям [3]:

- при вращении кольцевого ротора без смещения, движущие потенциальные силы должны приводиться только к крутящему (вращающему) моменту $M_{от}$, который приводит ротор во вращение и уравнивает момент сил сопротивления M_c ;
- при возникновении возмущения и смещения ротора от центрального положения равновесия в любом направлении, дополнительно к крутящему моменту $M_{от}$, должен возникать главный вектор F элементарных движущих сил с радиальной составляющей F_r , которая направлена в противоположную смещению сторону и пропорциональна ему. Действие равнодействующей силы F_r будет приводить к возвращению кольцевого ротора в положение равновесия и обеспечивать устойчивость его движения;
- движущие элементарные силы dF должны быть направлены в плоскости вращения под некоторым переменным углом ψ к радиальному направлению силового электромагнитного поля, чтобы формировать как тангенциальные составляющие dF_τ (создающие вращающий или главный момент движущих сил $M_{от}$), так и радиальные составляющие dF_r (создающие радиальную составляющую F_r главного вектора F);
- угол наклона ψ элементарной движущей силы dF должен быть переменным, что обеспечит перераспределение элементарных движущих сил и их равнодействующих при смещении кольцевого ротора от положения равновесия в любом направлении;
- параметры кольцевого ротора и электромагнитного поля должны обеспечивать при любом смещении необходимую величину вращающего момента $M_{от}$ и достаточную для устойчивости движения величину радиальной составляющей F_r главного вектора F ;
- внешние силы сопротивления и технологической нагрузки должны иметь распределение, близкое к центрально симметричному, чтобы они приводились только к моменту сопротивления M_c ;
- при не симметричном распределении сил сопротивления и технологической нагрузки также достижима устойчивость движения кольцевого ротора и выполнение им полезной работы. В этом случае равнодействующая сил сопротивлений должна уравниваться радиальной составляющей F_r главного вектора F движущих сил, что возможно только при смещении кольцевого ротора от центрального положения равновесия, поэтому его устойчивое вращение будет происходить исключительно в смещённом положении.

3. Математическое моделирование системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора

В математической модели исследовалось действие движущих сил, которые возникают на кольцевом роторе в силовом электромагнитном поле и приводят его к устойчивому вращательному движению. Границы силового поля определяются размерами статора (или индуктора). R_{CH} и R_{CB} – наружный и внутренний радиусы статора, а R_{PH} , R_{PB} – наружный и внутренний радиусы кольцевого ротора, их центры при отсутствии смещения совпадают с центром вращения O . Элементарная движущая сила dF действует на элементарную площадку $abcd$ ротора в точке M под углом ψ . Сила dF возникает при протекании тока в обмотках статора (1 – фрагмент обмотки в пазу статора). Согласно концепции обеспечения устойчивости движения dF представлена суммой тангенциальной dF_τ и радиальной dF_r составляющих (рисунок 1).

Получено выражение для элементарной электромагнитной движущей силы dF :

$$dF = \frac{(\omega_c - \omega_p)}{4\rho_{yo}} \delta B^2 \rho^2 d\rho d\varphi \quad \text{или} \quad dF = CB^2 \rho^2 d\rho d\varphi, \quad (1)$$

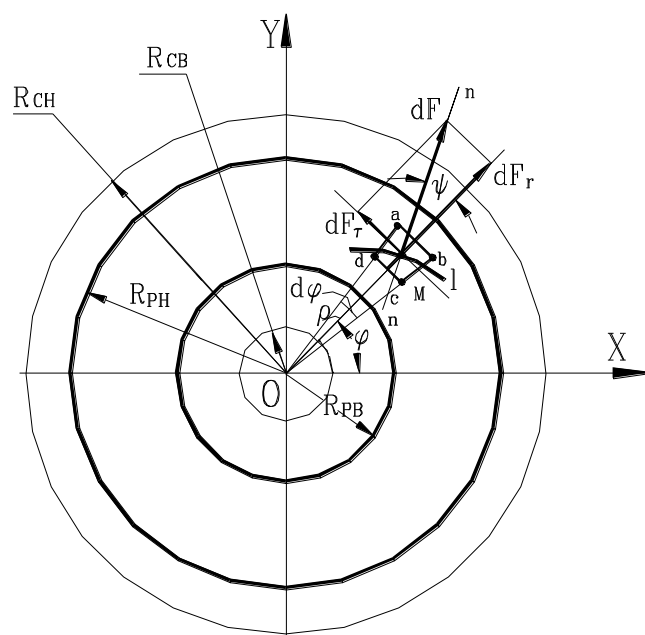


Рисунок 1. Расчётная схема математической модели

Где ω_c – угловая скорость вращения силового электромагнитного поля;

ω_p – угловая скорость вращения кольцевого ротора;

ρ_{vd} – удельное сопротивление материала кольцевого ротора;

 δ – толщина кольцевого ротора;

B – модуль вектора магнитной индукции (силовая характеристика вращающегося электромагнитного поля [9, 10];

φ – угловая координата центра M элементарной площадки кольцевого ротора;

ρ – радиус-вектор центра M элементарной площадки ротора (см. рисунок 1);

C – комплексный коэффициент.

При отсутствии смещения кольцевого ротора ($e_x = 0$) осесимметричная система элементарных движущих сил dF (1) приводится только к вращающему (крутящему) моменту $M_{o\tau}$, а главный вектор F и его проекции на оси координат F_x, F_y, F_{rx}, F_{ry} равны нулю, что показывает интегрирование по поверхности кольцевого ротора:

$$M_{or} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_\tau B^2 \rho^3 d\rho d\varphi \quad \text{или} \quad M_{or} = \frac{\pi}{2} C_\tau B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4); \quad (2)$$

$$F_x = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_0^{R_{PR}} C_r B^2 \rho^2 \sin \phi d\rho d\phi = 0; \quad F_y = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_0^{R_{PR}} C_r B^2 \rho^2 \cos \phi d\rho d\phi = 0;$$

$$F_{rx} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \cos \varphi d\rho d\varphi = 0; \quad F_{ry} = \int_0^{2\pi R_{PH}} \int_{R_{PB}} C_r B^2 \rho^2 \sin \varphi d\rho d\varphi = 0,$$

где C_r – коэффициент радиальной жёсткости электромагнитной опоры кольцевого ротора $C_r = C \cdot \cos \psi$;

C_τ – коэффициент тангенциальной жёсткости электромагнитной опоры кольцевого ротора $C_\tau = C \cdot \sin \psi$;

ψ – угол наклона элементарной движущей силы dF к радиусу (см. рисунок 1).

При элементарном смещении e_x кольцевого ротора от центрального положения равновесия, вызванном некоторым возмущением, происходит перераспределение элементарных движущих сил. Оно приводит к возникновению, наряду с вращающим моментом $M_{o\tau}$, главного вектора F , имеющего тангенциальную F_τ и радиальную F_r составляющие. Действие F_r , согласно концепции устойчивости, должно приводить к вращению кольцевого ротора в центральное положение равновесия. Предположим, что положение центра ротора не совпадает с центром вращения силового поля (точка 0 на рисунке 1), а e_x является элементарным смещением кольцевого ротора.

С учётом смещения e_x получаем следующее выражение для радиус-вектора ρ центра элементарной площадки кольцевого ротора (см. рисунок 1) – точки M :

$$\rho = e_x \cdot \cos \varphi + \sqrt{R^2 - e_x^2 \cdot \sin^2 \varphi}. \quad (3)$$

Для радиус-векторов внутреннего (ρ_1) и внешнего (ρ_2) контуров кольцевого ротора в соответствии с (3) получаем выражения:

$$\rho_1 = e_x \cdot \cos \varphi + \sqrt{R_{PB}^2 - e_x^2 \cdot \sin^2 \varphi}, \quad \rho_2 = e_x \cdot \cos \varphi + \sqrt{R_{PH}^2 - e_x^2 \cdot \sin^2 \varphi}. \quad (4)$$

С учётом пределов интегрирования, задаваемых согласно (4), вращающий момент от элементарных движущих сил определяется интегрированием:

$$M_{o\tau} = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} C_\tau B^2 \rho^3 d\rho d\varphi. \quad (5)$$

$$M_{o\tau} = \frac{C_\tau B^2 R_{PH}^2}{4} \int_0^{2\pi} \left(\sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PH}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi - \frac{C_\tau B^2 R_{PB}^2}{4} \int_0^{2\pi} \left(\sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^4 d\varphi. \quad (6)$$

Пренебрегая в (6) малой величиной $\frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi$ получаем окончательно:

$$M_{o\tau} = \frac{\pi}{2} C_\tau B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4) + \pi C_\tau B^2 (R_{PH}^2 - R_{PB}^2) e_x^2. \quad (7)$$

Сравнение выражений (2) и (7) показывает, что при смещении кольцевого ротора на e_x , вращающий момент $M_{от}$ незначительно возрастает что способствует устойчивости его вращательного движения. Также двойным интегрированием определяем проекции главного вектора F движущих сил при смещении кольцевого ротора на e_x от центрального положения равновесия [3, 11]. Проекция тангенциальной составляющей на оси координат:

$$F_{\tau y} = C_{\tau} B^2 \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 \cos \varphi d\varphi d\rho = \frac{C_{\tau} B^2}{3} \int_0^{2\pi} (\rho_2^3 - \rho_1^3) \cos \varphi d\varphi. \quad (8)$$

После подстановки в (8) ρ_1 и ρ_2 из (4) получаем:

$$F_{\tau y} = \frac{C_{\tau} B^2 R_{PH}}{3} \int_0^{2\pi} \left(\sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PH}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PH}} \cos \varphi \right)^3 \cos \varphi d\varphi - \\ - \frac{C_{\tau} B^2 R_{PB}}{3} \int_0^{2\pi} \left(\sqrt{1 - \frac{e_x^2}{R_{PB}^2} \sin^2 \varphi} + \frac{e_x}{R_{PB}} \cos \varphi \right)^3 \cos \varphi d\varphi. \quad (9)$$

$$F_{\tau y} = C_{\tau} B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2); \quad F_{\tau x} = -C_{\tau} B^2 \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 \sin \varphi d\varphi d\rho = 0. \quad (10)$$

Проекция радиальной составляющей главного вектора F на оси координат:

$$F_{ry} = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} C_r B^2 \rho^2 \sin \varphi d\rho d\varphi = 0; \\ F_{rx} = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} C_r B^2 \rho^2 \cos \varphi d\rho d\varphi = C_r B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2). \quad (11)$$

Составляющие $F_{\tau y}$ и F_{rx} главного вектора F не равны нулю. При этом первая играет дестабилизирующую роль, так как направлена перпендикулярно смещению e_x , а вторая обеспечивает устойчивость движения кольцевого ротора в соответствии с пунктом 2) концепции устойчивости движения кольцевого ротора.

4. Исследование условий устойчивости движения кольцевого ротора под действием движущих сил электромагнитной природы

Исследуем условия устойчивости кольцевого ротора в зависимости от соотношения геометрических параметров кольцевого ротора и индуктора, а также силовых параметров – электромагнитной индукции, величины и направления движущих сил (рисунок 2).

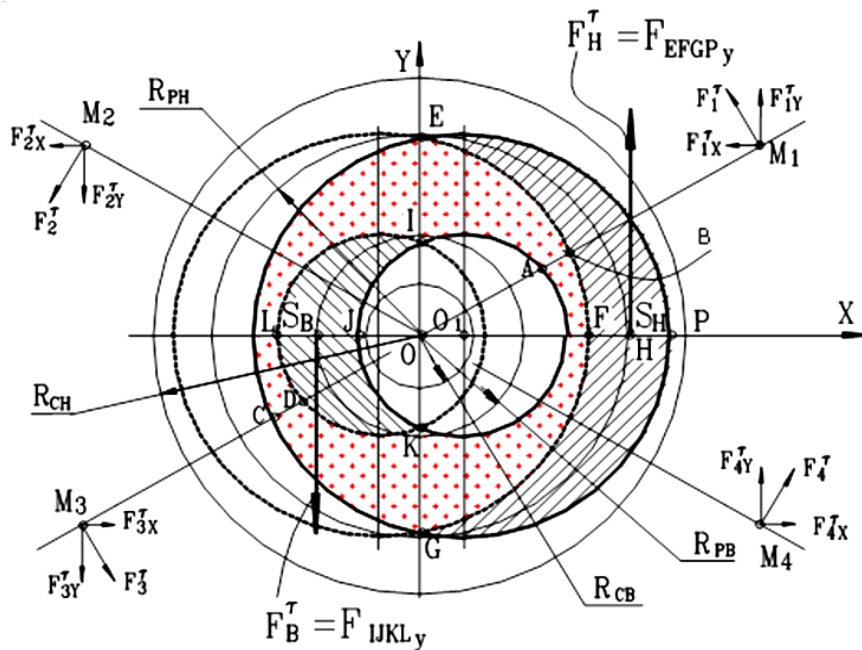


Рисунок 2. Схема для расчёта сил при смещении на e_x от положения равновесия

Предположим, что $e_x \ll R_{PB}$ и что в пределах серповидных областей S_H и S_B характеристика силового поля B постоянна, и если $B_B \neq B_H$, то на основании (10) условие равенства нулю дестабилизирующей силы F_τ , а следовательно, и условие равновесия или устойчивости вращения кольцевого ротора принимает вид:

$$B_B^2 R_{PB}^2 = B_H^2 R_{PH}^2, \quad (12)$$

где B_B, B_H – модуль вектора магнитной индукции на внутреннем и наружном контурах кольцевого ротора соответственно.

Если допустить, что фигуры S_H и S_B имеют разную ширину e_B и e_H , тогда и они войдут в условие (12) равенства нулю дестабилизирующей силы F_τ :

$$B_B^2 e_B R_{PB}^2 = B_H^2 e_H R_{PH}^2. \quad (13)$$

На основе (12) и (13) были проанализированы различные соотношения между геометрическими и силовыми параметрами привода с кольцевым ротором без механических опор, при которых дестабилизирующая составляющая главного вектора F_τ приводится к нулю. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Для получения устойчивого вращения ротора необходимо, чтобы его смещение e в плоскости вращения не приводило к появлению дестабилизирующей силы F_τ (условия приведены в таблице 1), но вызывало радиальную равнодействующую силу F_r .

Таблица 1. Условия приведения к нулю дестабилизирующей тангенциальной составляющей F_τ для достижения устойчивости движения кольцевого ротора

№ п/п	Соотношение между внутрен- ними радиусами	Соотношение между внешними радиусами	Дополнительные условия	Условие устойчивости движения ($F_\tau = 0$)
1	$R_{PB} - R_{CB} > e$	$R_{CH} = R_{PH}$	$B = const, e_B = 2e_H$	$R_{PB}\sqrt{2} = R_{PH}$
2	$R_{CB} - R_{PB} > e$	$R_{CH} = R_{PH}$	$B = const, e_B = 2e_H$	$R_{CB}\sqrt{2} = R_{CH}$
3	$R_{PB} - R_{CB} > e$	$R_{CH} - R_{PH} > e$	$B_B \neq B_H, e_B = e_H$	$R_{PB}B_B = R_{PH}B_H$
4	$R_{CB} - R_{PB} > e$	$R_{PH} - R_{CH} > e$	$B_B \neq B_H, e_B = e_H$	$R_{CB}B_B = R_{CH}B_H$
5	$R_{CB} - R_{PB} > e$	$R_{CH} - R_{PH} > e$	$B_B \neq B_H, e_B = e_H$	не существует
6	$R_{CB} = R_{PB}$	$R_{PH} - R_{CH} > e$	$B = const, e_H = 2e_B$	не существует
7	$R_{CB} = R_{PB}$	$R_{CH} - R_{PH} > e$	$B = const, e_H = 2e_B$	не существует
8	$R_{PB} - R_{CB} > e$	$R_{PH} - R_{CH} > e$	$B_B \neq B_H, e_B = e_H$	не существует

Следовательно, закон изменения проекции элементарной силы dF_τ вдоль радиуса не должен совпадать с законом изменения силы dF_r (см. рисунок 1). Это может быть достигнуто за счёт изменения угла наклона ψ элементарной движущей силы, от которого зависят коэффициенты C_r и C_τ в выражениях (8) – (11). То есть, коэффициенты C_{rH} и $C_{\tau H}$ наружной серповидной фигуры S_H не должны быть равны соответствующим коэффициентам внутренней фигуры S_B . В силу того, что смещение e_x мало, будем считать эти коэффициенты постоянными внутри S_H и S_B , тогда, в соответствии с (11) и (12) получаем:

$$F_\tau = C_{\tau H} B^2 e_H \pi R_{PH}^2 - C_{\tau B} B^2 e_B \pi R_{PB}^2; \quad (14)$$

$$F_r = C_{rH} B^2 e_H \pi R_{PH}^2 - C_{rB} B^2 e_B \pi R_{PB}^2. \quad (15)$$

Если $B = const, e_B = 2e_H = 2e_x$, а геометрические размеры ротора и области действия сил соответствуют условиям строки 1 таблицы 1, тогда на основании (15) получим следующее условие равенства нулю дестабилизирующей силы F_τ :

$$C_{\tau H} R_{PH}^2 = 2C_{\tau B} R_{PB}^2 \quad \text{или} \quad R_{PH}^2 \sin \psi_H = 2R_{PB}^2 \sin \psi_e. \quad (16)$$

Последнее возможно, если $\psi_B < \psi_H$. С учётом условия $R_{PB}\sqrt{2} = R_{PH}$ (см строку 1 таблицы 1) и после элементарных преобразований получаем:

$$\operatorname{tg}^2 \psi_H = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 16 \operatorname{tg}^2 \psi_B (1 + \operatorname{tg}^2 \psi_B)}. \quad (17)$$

Задаваясь величиной ψ_B , мы можем найти ψ_H , определить размеры кольцевого ротора и получить удобное выражение для вычисления стабилизирующей радиальной силы F_r :

$$F_r = CB^2 e_x \pi R_{PH}^2 \frac{1}{\cos \psi_H} \left(1 - 2 \frac{\cos \psi_H}{\cos \psi_B}\right). \quad (18)$$

В качестве примера рассмотрим $\operatorname{tg} \psi_B = 0,25$ ($\psi_B = 14^\circ$), тогда по формуле (17) найдём $\operatorname{tg} \psi_H = 0,476$ ($\psi_H = 25^\circ$). Пусть внутренний радиус ротора R_{PB} будет равен 235 мм. Пользуясь формулой (16), по заданным $\operatorname{tg} \psi_B$ и R_{PB} , определяем $R_{PH} = 251,61$ мм. В итоге получаем, что в соответствии с (18), возвращающая и стабилизирующая радиальная равнодействующая сила будет равна $F_r = -0,963CB^2 e_x \pi R_{PH}^2$.

В результате выполненных условий дестабилизирующая составляющая F_τ приводится к нулю, а радиальная составляющая F_r главного вектора F движущих сил обеспечивает асимптотическую устойчивость движения кольцевого ротора. Если магнитная индукция $B \neq \text{const}$ и будет возрастать при приближении к центру силового поля, то это позволит в более широком диапазоне изменять углы наклона элементарных движущих сил ψ_H и ψ_B , увеличивая устойчивость движения ротора.

Заключение

1. Разработана концепция обеспечения устойчивости движения кольцевых вращающихся роторов без механических опор в силовом электромагнитном поле. Устойчивость движения обеспечивается без применения датчиков и электронных устройств регулирования за счёт перераспределения движущих сил при сколь угодно малом смещении кольцевого ротора от центрального положения равновесия.

2. Разработана математическая модель системы движущих сил электромагнитной природы, создающих устойчивое движение кольцевого ротора, которая включает аналитические выражения для вращающего момента и главного вектора движущих сил. Модель показывает, как происходит перераспределение элементарных движущих сил при смещении и образуется стабилизирующая радиальная сила, действующая против смещения и обеспечивающая устойчивость движения кольцевого ротора.

3. Исследованы условия устойчивости движения кольцевого ротора через соотношения геометрических и силовых параметров кольцевого ротора и индуктора, при которых дестабилизирующая составляющая F_τ приводится к нулю, а радиальная составляющая F_r главного вектора F движущих сил обеспечивает асимптотическую устойчивость движения кольцевого ротора при отсутствии механических опор.

4. Решение задачи устойчивости движения в электромагнитном поле кольцевых роторов без механических опор позволяет разрабатывать высокоскоростные, производительные и энергоэффективные роторные машины различного назначения – станки резки, динамические насосы, компрессоры, сатураторы и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брешев, В. Е. Концепция создания бесконтактных приводов вращения и их применение в машинах различного назначения / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2025. – Вып.2(89) – С. 19–26.

2. 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.

3. 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.
4. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012. – 334 p.
5. Брешев, В. Е. Синтез бесконтактных приводов рабочих машин и исследование их параметров и характеристик / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. – №12(48). – С. 12–22.
6. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.
7. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин. – 4-е изд. стер. – СПб.: Лань, 2003. – 304 с.
8. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики: В 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Луиц, Д. Р. Меркин. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2002. – 736 с.
9. Теоретические основы электротехники: учебник в 3 т. / К. С. Демирчян [и др.] – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – Т.1. – 463 с.
10. Мартыненко, Ю. Г. Движение твёрдого тела в электрических и магнитных полях / Ю. Г. Мартыненко – М.: Наука, 1988. – 368 с.
11. 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. – 2025. – №1(46). – С. 58–73.

REFERENCES

1. Breshev, V. E. The concept of creating contactless rotary drives and their application in machines for various purposes / V. E. Breshev, Y. S. Dolzhenko // Advanced technologies and mechanical engineering systems. – 2025. – Release.2(89) – P. 19–26.
2. Eroshin, S. S. Increasing the efficiency of machines by using working bodies without mechanical supports / S. S. Eroshin, V. E. Breshev // East European Journal of Advanced Technologies. – 2005. – №5(17). – P. 82–85.
3. Breshev, V. E. Drives of machines with ring working bodies without mechanical supports: monograph / V. E. Breshev, S. V. Shevchenko – Lugansk: Publishing house of LNU named after. V. Dalia, 2017. – 186 p.
4. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012. – 334 p.
5. Breshev, V.E. Synthesis of contactless drives of working machines and study of their parameters and characteristics / V. E. Breshev, Y. S. Dolzhenko // Transport engineering. – 2025. – №12(48). – P. 12–22.
6. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.
7. Merkin, D. R. Introduction to the Theory of Stability of Motion / D. R. Merkin. – 4th ed. reprinted – St. Petersburg: Lan, 2003. – 304p.
8. Бутенин, Н. В. Course of theoretical mechanics: In 2 volumes / N. V. Butenin, Ja.L. Lunc, D. R. Merkin. – 2nd ed. – St. Petersburg: Lan, 2002. – 736 p.
9. Theoretical foundations of electrical engineering: textbook in 3 volumes / K. S. Demirchjan [I dr..] – 4th ed. – St. Petersburg: Piter, 2003. – V.1. – 463 p.

10. Martynenko, Ju. G. Motion of a rigid body in electric and magnetic fields / Ju. G. Martynenko – М.: Nauka, 1988. – 368p.

11. Breshev, V. E. Multiparameter synthesis of contactless drives with ring rotors for working machines / V. E. Breshev // Resource-saving technologies for the production and pressure processing of materials in mechanical engineering. – 2025. – №1(46). – P. 58–73.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Contributions of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 16.02.2026; принята к публикации 27.02.2026

The article was submitted February 5, 2026; approved after reviewing February 16, 2026; accepted for publication February 27, 2026.