

**Брешев В.Е.**

## **РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ БЕСКОНТАКТНЫХ ПРИВОДОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ГЛАВНЫМ ВЕКТОРОМ ДВИЖУЩИХ СИЛ**

**Breshev V.E.**

### **THE ENGINEERING OF ULTRA EFFICIENT NON-CONTACT ROTARY DRIVES WITH A CONTROLLED RESULTANT VECTOR OF DRIVING FORCES**

*Рассмотрены пути совершенствования ресурсосберегающих бесконтактных приводов вращательного движения для применения в машинах различного назначения. Предложено для повышения динамической и статической устойчивости роторов использовать в приводах двигательные устройства, создающие одновременно с вращающим моментом и регулируемый главный вектор движущих сил. Разработаны принцип действия двигательного устройства, создающего регулируемый главный вектор на роторе, методика его расчёта и регулирования. Предложенная силовая схема бесконтактных приводов с регулируемым главным вектором позволяет повысить их динамическую устойчивость и диапазон скоростных режимов.*

**Ключевые слова:** бесконтактный привод, главный вектор движущих сил.

#### **Введение**

Бесконтактные приводы на аэростатических опорах имеют наименьший уровень потерь на трение, максимальную износостойкость опорных узлов без использования масел. Их применение в машинах целесообразно с точки зрения ресурсосбережения, реализации высоких частот вращения, повышения надёжности машин и экологической чистоты производства [1]. Техническое совершенствование бесконтактных приводов направлено на повышение их несущей способности, увеличение частот вращения и динамической устойчивости. Идея разработки и применения в бесконтактных приводах двигательных устройств (ДУ), которые создают не только вращающий момент  $M_{ДВ}$  на роторе, но и главный вектор  $F_{ДВ}$  движущих сил, имеет целью регулирование свойств механических систем приводов для повышения устойчивости вращения роторов и расширения диапазона скоростей.

## Цель

Целью настоящей работы является разработка схемы и принципа действия привода с ДУ, создающим на роторе регулируемый главный вектор  $F_{ДУ}$ , разработка метода его расчёта и регулирования. Исследования развивают концепцию создания кольцевых рабочих органов без механических опор для приводов различного назначения [2 - 4].

## Математическая модель

В предлагаемой силовой схеме бесконтактного привода вторичный элемент (ВЭ) двигательного устройства вращается с ротором в несоосном положении относительно кольцевого силового поля. Это реализуется через фиксированное смещение поля потенциальных движущих сил относительно ВЭ. Смещение приводит к перераспределению движущих сил на ВЭ и возникновению  $F_{ДУ}$  на роторе привода.

Потенциальное поле сил разделено на три области кольцевой формы – внутреннюю от  $R_{CB}$  до  $R_{C1}$ , среднюю от  $R_{C1}$  до  $R_{C2}$  и наружную от  $R_{C2}$  до  $R_{CH}$ . ВЭ всегда располагается внутри этих областей поля сил, а на каждый его элементарный объём  $\Delta V_i$  действует элементарная движущая сила ( $F_{IH}$ ,  $F_{IB}$  или  $F_{IC}$ ), зависящая от той области поля сил, которую он пересекает в данном положении или в данный момент времени. Принимая во внимание однородность и неизменность свойств и геометрии поля сил и ВЭ в осевом направлении (по толщине ВЭ), задачу рассмотрим как поверхностную. Тогда на каждую элементарную площадку поверхности ВЭ площадью  $\Delta S_i$  действует элементарная сила  $F_i$ , которая равна силе, действующей на объём  $\Delta V_i = \Delta S_i \delta$  ( $\delta$  – толщина ВЭ). Представим  $F_i$  как произведение  $\Delta S_i$  на некоторую силовую функцию  $K_i = f(r_i, \varphi_i)$ , по смыслу соответствующую «поверхностной плотности элементарных сил»:

$$\vec{F}_i = K_i \vec{\xi} \Delta S_i = K_i \vec{\xi} \cdot r_i \cdot \Delta r \cdot \Delta \varphi \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициент, определяющий модуль элементарной силы движущей силы  $F_i$ ;

$\vec{\xi}$  – единичный вектор, определяющий направление элементарной движущей силы;

$\Delta S_i$  – площадь  $i$ -ой элементарной площадки;

$r_i, \varphi_i$  – текущие координаты в полярной системе координат.

Принцип действия ДУ в бесконтактном приводе и характер распределения элементарных движущих сил на его вторичном элементе для приведения к  $M_{ДУ}$  и  $F_{ДУ}$  показан на рис. 1.

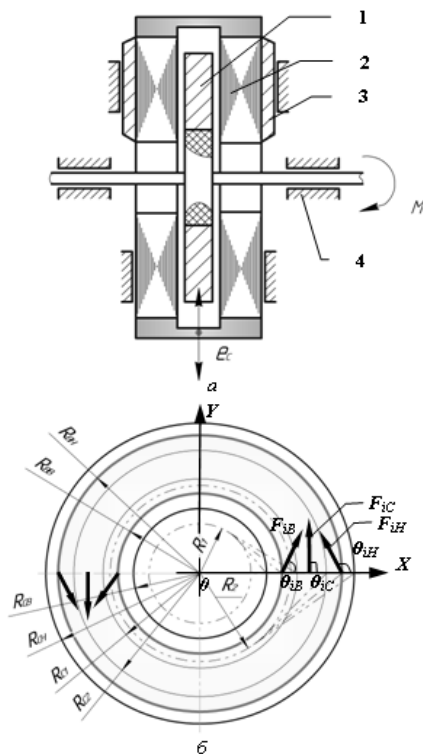


Рис. 1. Двигательное устройство с регулируемым главным вектором - а и распределение движущих сил на его вторичном элементе - б: 1 – вторичный элемент двигательного устройства; 2 – источник поля потенциальных движущих сил; 3 – направляющие для смещения источника силового поля; 4 – опоры привода бесконтактного типа

Скалярная функция  $K_i = f(r_i, \varphi_i)$  определяет модуль вектора элементарной силы  $F_i$ , приложенной в геометрическом центре  $(r_i, \varphi_i)$   $i$ -ой элементарной площадки  $\Delta S_i$ . Направление вектора  $F_i$  задается ортом  $\vec{\xi}$ . В свою очередь направление единичного вектора  $\vec{\xi}$  зависит от  $r_i$  (расстояния от оси вращения) и определяется углами наклона  $\theta_{iH}, \theta_{iC}, \theta_{iB}$ , отсчитываемыми против часовой стрелки от радиального направления, например от оси  $OX$ . На рис. 1. вторичный элемент показан в положении, соосном источнику силового поля (смещение статора  $e_C = 0$ ). В этом положении распределение движущих сил на ВЭ имеет центральную симметрию. Для того, чтобы активные силы на ВЭ не уравнивались, а приводились к равнодействующей  $F_{ДВ}$ , необходимо задать

ему радиальное смещение относительно статора и создаваемого им поля сил. Изменения в распределении сил на ВЭ происходят по причине того, что он по-другому располагается в поле сил, разделенном на 3 области. В пределах каждой кольцевой области углы  $\theta_{iH}$ ,  $\theta_{iC}$ ,  $\theta_{iB}$  могут быть постоянными или изменяться по закону, необходимому для достижения заданной  $F_{ДВ} = f(e_C)$  по условиям статической и динамической устойчивости ротора бесконтактного привода.

Функциональные зависимости  $\theta_{iB,H} = f(r_i, R_{1,2})$ , при условии перпендикулярности сил  $F_{iH}$ ,  $F_{iB}$  касательным к окружностям  $R_1$  и  $R_2$  (см. рис. 1.), определяются из элементарных геометрических построений:

$$\theta_{iB} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_1}{r_i}; \quad \theta_{iH} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{R_2}{r_i} \quad (2)$$

В предлагаемой конструкции двигательного устройства пересечение ВЭ различными областями силового поля приводит к возникновению разных по величине и направлению элементарных сил:

$$\vec{F}_{iH} = K_{iH} \vec{\xi} \Delta S_{iH}; \quad \vec{F}_{iC} = K_{iC} \vec{\xi} \Delta S_{iC}; \quad \vec{F}_{iB} = K_{iB} \vec{\xi} \Delta S_{iB} \quad (3)$$

Силы  $F_{iH}$  и  $F_{iB}$  имеют тангенциальные  $F_{iH}^c$ ,  $F_{iB}^c$  и радиальные  $F_{iH}^r$ ,  $F_{iB}^r$  составляющие, выражаемые через тригонометрические функции углов  $\theta_{iH}$  и  $\theta_{iB}$ , а  $F_{iC} = F_{iC}^c$ . Радиальные составляющие элементарных сил тех площадок, которые находятся во внешней и внутренней областях поля сил направлены навстречу и стремятся удерживать ротор в среднем положении. При отсутствии смещения силового поля относительно ВЭ ( $e_C = 0$ ) распределение элементарных сил на ВЭ изменяется в радиальном направлении, но обладает центральной симметрией относительно начала координат. Радиальные составляющие в любом радиальном направлении уравниваются, а тангенциальные составляющие сил на противоположных элементарных площадках образуют пары сил относительно оси и приводятся к  $M_{ДВ}$ .

### Результаты исследований

Принципиальным отличием рассматриваемого ДУ является возможность создание на его вторичном элементе (а значит и роторе) главного вектора  $F_{ДВ}$  заданной величины и направления. Для этого источник поля сил необходимо сместить на  $e_C$ . Так как при  $e_C = 0$  силовое поле и ВЭ обладают центральной симметрией относительно начала координат  $O$ , совпадающего с осью вращения, смещение статора в любом из радиальных направлений равносильны. На рис. 2. показано смещение поля сил на  $e_C$  в направлении, противоположном оси  $OY$ .

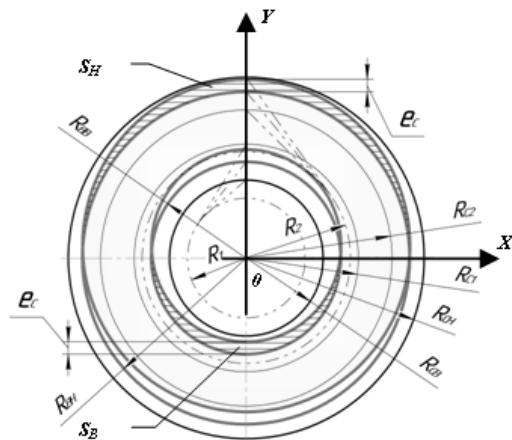


Рис. 2. Относительное смещение вторичного элемента и поля сил

Смещение  $e_c$  приводит к изменению пересечения ВЭ с областями силового поля, что хорошо видно в проекции на плоскость  $OXY$ . Пересечение с внутренней областью увеличилось на заштрихованную часть площадью  $S_B$  со стороны наименьшего расстояния до геометрического центра поля сил, и уменьшилась на  $S_B$  с противоположной. Пересечение ВЭ с внешней областью поля сил изменилось в обратном порядке, только на серповидную часть площадью  $S_H$ .

Сопоставляя данные изменения с распределением элементарных сил на площадках ВЭ, соответствующих пересечению с различными областями (рис. 1.) видим, что радиальные составляющие элементарных сил  $F_{iH}$  и  $F_{iB}$  в образованных при смещении заштрихованных частях серповидной формы направлены по вектору смещения статора и не могут быть уравновешены, а потому приводятся к главному вектору  $F_{ДВ}$ .

Для определения величины  $F_{ДВ}$  необходимо выразить площади  $S_B$  и  $S_H$  через геометрические параметры ВЭ и  $e_c$ , по которым затем выполнить интегрирование или суммирование проекций элементарных сил  $F_{iH}^Y$  и  $F_{iB}^Y$ . Геометрические построения смещённого ВЭ и элементарные математические преобразования позволяют определить:

$$S_H = 2R_{BH}^2 \arcsin \frac{e_c}{2R_{BH}}; \quad S_B = 2R_{BB}^2 \arcsin \frac{e_c}{2R_{BB}}. \quad (4)$$

На каждую элементарную площадку  $\Delta S_i$  рассматриваемых участков  $S_B$  и  $S_H$  действует соответственно элементарные силы  $F_{iB}$  и  $F_{iH}$ ,

которые приводятся к главному вектору  $F_{ДУ} \neq 0$  при  $e_C \neq 0$  Модуль  $F_{ДУ}$  равен сумме проекций сил  $F_{iB}$  и  $F_{iH}$  на ось, коллинеарную заданному смещению  $e_C$ , в данном случае ось  $OY$ .

Для практических целей определим упрощенный метод расчета  $F_{ДУ}$  по средним величинам силовой функции  $K_{iB} = f(r_i, \varphi_i)$  для  $S_B$  и  $K_{iH} = f(r_i, \varphi_i)$  для  $S_H$ . Принимая допущение, что ввиду малой величины  $e_C$  в пределах  $S_B$  и  $S_H$  модуль векторов элементарных сил остаётся постоянным ( $K_{iH} = const$  и  $K_{iB} = const$ ), найдём средние значения для углов наклона  $\theta_H$  и  $\theta_B$  элементарных движущих сил. При равномерном изменении  $\theta_H$  и  $\theta_B$  в радиальном направлении от  $R_{BH} - e_C$  до  $R_{BH}$  и от  $R_{BB}$  до  $R_{BB} + e_C$  в соответствии с (2) получаем для средних значений:

$$\theta_A = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{R_I}{R_{BB} + \frac{e_C}{2}} \right); \quad \theta_I = \frac{\pi}{2} + \arcsin \left( \frac{R_2}{R_{BH} - \frac{e_C}{2}} \right). \quad (5)$$

В (5) все параметры известны, они задаются при конструировании и установкой  $e_C$  в соответствии с режимами (условиями) эксплуатации. Легко показать с помощью геометрических построений, что при

$$\theta_H = \frac{\pi}{4}$$

точки с максимальной и нулевой величинами проекций расположены симметрично относительно оси  $OY$ . В этом случае влияние координатного угла  $\varphi$  на величину проекций элементарных сил по всей площади  $S_H$  компенсируется, а расчёт равнодействующей по среднему значению  $\theta_H$  становится наиболее точным. При  $\theta_H < \frac{\pi}{4}$  получаемый

результат завышается и наоборот. Аналогичные зависимости характерны и для внутреннего участка площадью  $S_B$ . Учитывая, что в разрабатываемых и патентуемых нами конструкциях  $40^\circ < \theta_H < 50^\circ$ , предложенная методика позволяет обеспечить погрешность расчета не превышающую 10%. Учитывая вышесказанное, а также выражения (4) и (5), окончательная формула для расчета величины главного вектора  $F_{ДУ}$  движущих сил на роторе, при смещении поля активных сил на  $e_C$  относительно вторичного элемента, принимает вид:

$$F_{ДУ} = K_H \cos \theta_H S_H + K_B \cos \theta_B S_B \quad (6),$$

или

$$F_{ДУ} = 2K_H \cos \theta_H R_{BH}^2 \arcsin \frac{e_C}{2R_{BH}} + 2K_B \cos \theta_B R_{BB}^2 \arcsin \frac{e_C}{2R_{BB}} \quad (7),$$

где  $K_H$ ,  $K_B$  – величины, определяющие модуль элементарной силы, действующей на единичную площадь и зависящие от конструкции и типа двигательного устройства;

$\theta_H$  и  $\theta_B$  – усреднённые согласно (5) величины углов наклона сил;

$R_{BH}$  и  $R_{BB}$  – наружный и внутренний радиусы ВЭ.

Пример расчета  $F_{ДУ}$  по среднему значению угла наклона элементарных движущих сил и среднему значению функции  $K_{iB} = f(r_i, \varphi_i)$  приведен в работе [5]. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями (расхождение 5...12%) и могут использоваться при проектировании бесконтактных приводов с регулируемым главным вектором движущих сил.

### Выводы

Ресурсосберегающие бесконтактные приводы на аэростатических опорах обладают рядом технических преимуществ, но характеризуются недостаточной динамической устойчивостью. Предложенная в работе силовая схема бесконтактного привода, в которой двигательное устройство создает на роторе наряду с вращающим моментом и главный вектор движущих сил, имеет целью регулирование динамических свойств привода. Разработанный метод расчета и регулирования главного вектора движущих сил позволяет повысить устойчивость бесконтактного привода на переходных режимах, расширить диапазон его скоростных режимов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Космынин, А.В. Шпиндели на газовых опорах – перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов / А.В. Космынин, М.Р.Петров // Современные проблемы науки и образования. – 2006. – №6 – С. 47–48.
2. Єрошин С.С. Концепція створення машин і приладів з прямим приводом робочих органів без механічних опор / Єрошин С.С. // машинознавство. – 2007. – №2 (116). – С. 27–32.
3. Nosko P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose / P. Nosko, V. Breshev, P. Fil // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. VIIIA. – Lublin, 2008. – P. 126–133.
4. Брешев В.Е. Развитие технологии бесконтактных опор и переход к ресурсосберегающей технологии бесконтактного привода / В.Е. Брешев, А.В. Брешев // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. – С. 153–159.
5. Nosko P. Multiparameter synthesis of non-contact machine drive / Nosko P., Breshev V., Fil P. // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. IX. – Lublin, 2009. – P. 172–180.

### REFERENCES

1. Kosmynin A.V., Petrov M.R. Shpindeli na gazovyh oporah – perspektivnyj put' razvitiya vysokoskorostnoj obrabotki metallov. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2006, №6, pp. 47–48.

2. Eroshin S.S. Koncepciya stvorenniya mashin i priladiv z pryamym privodom robochih organiv bez mehanichnih opor. Mashinoznavstvo, 2007, №2 (116), pp. 27–32.
3. Nosko P., Breshev V., Fil P. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose. Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. VIIIA, Lublin, 2008, pp. 126–133.
4. Breshev V.E., Breshev A.V. Razvitie tehnologii beskontaktnih opor I privodov k resursosberegaushei tehnologii beskontaktnogo privoda. Resursozberigauchi tehnologii virobniactva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: Book of scientific papers. Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Lugansk, 2010, pp. 153–159.
5. Nosko P., Breshev V., Fil P. Multiparameter synthesis of non-contact machine drive. Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. IX, Lublin, 2009, pp. 172–180.

***Брешев В.Е. Розробка ресурсозберігаючих безконтактних приводів з регульованим головним вектором рушійних сил.***

*Розглянуті шляхи вдосконалення ресурсозберігаючих безконтактних приводів обертового руху для застосування в машинах різного призначення. Запропоновано для підвищення динамічної та статичної стійкості роторів використовувати в приводах рухові пристрої, які створюють одночасно з обертовим моментом і регульований головний вектор рушійних сил. Розроблені принцип дії рухового пристрою, який створює регульований головний вектор на роторі, методика його розрахунку та регулювання. Запропонована силова схема безконтактних приводів з регульованим головним вектором дозволяє підвищити їх динамічну стійкість і діапазон швидкісних режимів.*

***Ключові слова:*** безконтактний привод, головний вектор рушійних сил.

***Breshev V.E. The engineering of ultraefficient non-contact rotary drives with a controlled resultant vector of driving forces.***

*Modernized designs of ultra efficient non-contact rotary drives for different types of machines have been considered. Due to load and dynamic analysis a new loading pattern of air-bearing drive for rotating stability improving of rotor has been suggested. Its propulsion unit makes a torque and resultant vector of driving forces on a rotor. Due to mathematical modeling allocation of elementary forces and integral characteristic, i.e. resultant vector have been determined.*

*An operating principle of propulsion unit, which makes controlled resultant vector on rotor, its design and controlling procedure have been designed.*

*The new approach of analytical method of dynamics resultant vector has been designed due to parameters averaging and transforming volume elementary forces to surface ones for secondary cell. Loading pattern of non-contact drives with controlled resultant vector, which allows improve dynamic stability and expend range of speeds has been suggested.*

***Keywords:*** non-contact drive, resultant vector of driving forces.

Брешев В.Е. – докторант Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля, г. Луганск, Украина.  
e-mail: vev\_lug@mail.ru