

8. Самородов, В. Б. Анализ бесступенчатой трансмиссии тракторов серии Fendt 900 Vario: что скрывается за рекламой? [Текст] / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // «Тракторы и сельхозмашины». — 2012. — № 6. — С. 48–52.
9. Самородов, В. Б. Динамика процессу розгону колісних тракторів серії Fendt 900 Vario [Текст] / В. Б. Самородов, А. І. Бондаренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — Т. 1, № 3(61). — С. 4–11.
10. Чудаков, Д. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля [Текст] / Д. А. Чудаков. — М.: «Колос», 1972. — 384 с.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗГОНА ТРАКТОРА FENDT 939 VARIO

В работе определено влияние законов изменения параметров регулирования гидрообъемной передачи, рабочих объемов гидромоторов на основные параметры трансмиссии и буксование колес трактора при переменной силе тяги на крюке и разгоне на тяговом диапазоне, проведен сравнительный анализ буксования колес трактора Fendt 939 Vario с трактором, который имеет эквивалентные параметры, но механическую трансмиссию. Также в работе рассмотрен и проанализирован разгон трактора при выполнении транспортных работ.

**Ключевые слова:** разгон, колесный трактор, гидрообъемно-механическая трансмиссия, буксование, динамика, тяговый режим.

**Самородов Вадим Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра «Автомобиле- и тракторобудовання», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: vadimsamorodov@mail.ru.  
**Бондаренко Анатолій Ігорович**, кандидат технических наук, кафедра «Автомобиле- і тракторобудовання», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: anatoliybon@rambler.ru.

**Самородов Вадим Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра «Автомобиле- и тракторостроения», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

**Бондаренко Анатолій Ігорович**, кандидат технических наук, кафедра «Автомобиле- и тракторостроения», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

**Samorodov Vadim**, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», e-mail: vadimsamorodov@mail.ru.

**Bondarenko Anatoliy**, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», e-mail: anatoliybon@rambler.ru.

УДК 621.01: 62-882

**Брешев В. Е.,  
Брешев А. В.**

## МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПОРЫ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Предложен метод преобразования аэростатической опоры сложной конструкции к эквивалентной комбинации типовых опор. Обладая равной несущей способностью и жесткостью с исходной опорой, комбинация типовых опор позволяет аналитически выразить интегральные характеристики опоры для ее параметрического синтеза.

**Ключевые слова:** аэростатическая опора, газовая смазка, бесконтактный привод.

### 1. Постановка проблемы

Разработка конструкций бесконтактных аэростатических опор, а также бесконтактных приводов с использованием таких опор является перспективным направлением развития машиностроения. Применение опор на газовой смазке решает задачи максимального увеличения частот вращения, снижения потерь, повышения износостойкости и долговечности, экономичности, снижения себестоимости приводов, обеспечения стабильности их эксплуатационных параметров [1–3]. Совершенствование конструкции опор предполагает использование несущих поверхностей различной формы, аэростатически связанную комбинацию опорных поверхностей различной геометрии (конических, плоских, полусферических и др.), использование несимметричной или неравномерной системы подачи смазки в зазор [4, 5].

Для решения краевой задачи — определения статических характеристик опоры при заданных начальных и граничных условиях, составляется основное уравнение

газовой смазки [6–8]. Для сферической опоры стационарное уравнение Рейнольдса имеет вид:

$$\frac{d}{d\phi} \left( H^3 \frac{dP}{d\phi} \right) + \sin\theta \frac{d}{d\theta} \left( \sin\theta H^3 \frac{dP}{d\theta} \right) = \Lambda \sin^2\theta \frac{d(HP)}{d\phi}, \quad (1)$$

где  $\phi, \theta$  — углы сферической системы координат;  $P$  — относительное давление газовой смазки;  $H$  — безразмерный зазор, который в стационарной постановке является функцией относительных эксцентриситетов  $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z$  и углов  $\phi, \theta$ :

$$H = 1 - \epsilon_X \cos\phi \sin\theta - \epsilon_Y \sin\phi \sin\theta - \epsilon_Z \cos\theta. \quad (2)$$

В такой постановке краевая задача не имеет приближенного аналитического решения, но достаточно точно решается численным интегрированием (1). С другой стороны, для синтеза и анализа новых конструкций

бесконтактных опор и приводов, необходимо решение в аналитическом виде, отражающем функциональные связи между параметрами аэростатической опоры [7].

В настоящей работе предложен и описан метод получения приближенного аналитического решения для аэростатических опор сложной конструкции посредством приведения их к комбинации типовых опор с известными аналитическими решениями относительно статических характеристик.

## 2. Содержание исследований

Типовыми аэростатическими опорами с известными аналитическими решениями стационарных уравнений Рейнольдса являются радиальная цилиндрическая опора с одной или двумя линиями наддува и кольцевой (или круговой) подпятник с одной линией наддува [8–10]. Реакции конусной опоры можно представить как комбинацию реакций радиальной опоры и подпятника, полусферической — реакциями эквивалентной ей конической, а затем реакции последней через реакции радиальной и подпятника и т. д. Для параметров типовых опор установим соответствие с параметрами исходной опоры:

1. Сохранение термодинамических и технологических параметров газовой смазки —  $t$ ,  $p_s$ ,  $p_a$ ,  $k$ ,  $\mu$ ,  $a_s$ ,  $\rho$  [9–11].

2. Равенство расходов газовой смазки, приведенных к нормальным условиям, через часть опоры  $Q$  [ $\text{м}^3/\text{ч}$ ] и каждой поставленной ей в соответствие типовой опоры  $Q_n$ :

$$Q = Q_1 = \dots = Q_n = \frac{\pi C p_s B n_d N D_d}{12 \mu p_a} \cdot 3600, \quad (3)$$

$$\text{где } B = 12 \mu a_1 \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}.$$

Это условие позволяет определить геометрические и конструктивные параметры  $n_{dn}$ ,  $N_d$ ,  $D_d$ ,  $C$  для производных опор. Расход  $Q$  определяет давление смазки и несущую способность как интегральное свойство, переносимое на производные типовые опоры, создающие составляющие несущей способности.

3. Геометрические параметры  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $R_1$  (для подпятника)  $r$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  (для радиальной опоры) определяют расположение линий наддува, размеры опоры, линейную скорость точек поверхности  $U$  и, главное, площадь несущих поверхностей  $S_i$ , интегрирование по которым дает несущую способность. Рассмотрим криволинейный сегмент несущей поверхности  $\Delta S$ , на сечение которого плоскостью  $YOZ$  действует давление смазки с равнодействующей  $\Delta W$ , а также преобразование опоры, имеющей подобные сегменты (рис. 1).

4. Учет разницы в длине исходной опорной поверхности и производных от нее поверхностей легко сделать приведением ее к промежуточной конической ( $R_H$ ,  $R_B$ ), затем «разворачивая» конус в цилиндр относительно окружности среднего радиуса  $R_1$  с точками  $C$ ,  $D$  (рис. 1, б). При этом усредняется площадь опорной поверхности и линейная скорость  $U$  точек на поверхности, длина линий дренажа газовой смазки, расход и скорость истечения газовой смазки.

Равнодействующая сил  $\Delta W$  давления  $p = f(x, y, z)$ , действующая на линию сечения длиной  $\Delta L$  сегмента  $\Delta S$ ,

всегда может быть разложена на составляющие, каждая из которых поставлена в соответствие опорной поверхностью — проекция с равнодействующими, приложенными в точках  $A$  и  $B$  так, что  $\Delta W^Y = \Delta W^{*Y}$ ;  $\Delta W^Z = \Delta W^{*Z}$  при  $p(x, y, z) \equiv p^*(x, y) \equiv p_B^*(x, y, z)$  [12].

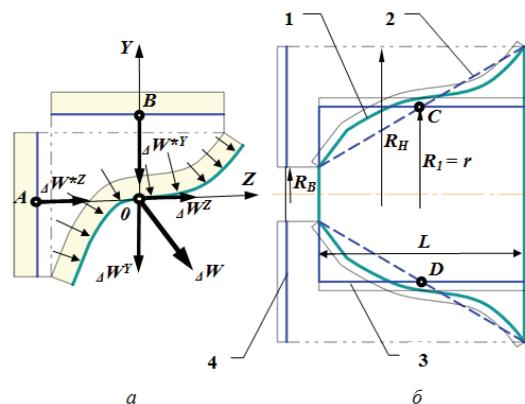


Рис. 1. Преобразование сегмента (а) и опорной поверхности (б):

- 1 — исходная опорная поверхность сложной кривизны;
- 2 — вспомогательная (промежуточная) конусная поверхность;
- 3 — производная радиальная опорная поверхность;
- 4 — производная опорная поверхность кольцевого подпятника

Тогда для производных (преобразованных) опорных поверхностей состоящих из  $n_A$  (подпятник)  $n_B$  (радиальная опора) сегментов, имеющих площади  $\Delta S_A$  и  $\Delta S_B$  соответственно, относительные жесткости  $\bar{K}_Z^e$  и  $\bar{K}_{XY}^e$ :

$$W_A^Z = \sum_1^{n_A} \iint_{\Delta S_A} p(x, y) ds = \bar{K}_Z^e \varepsilon_z \pi (R_H^2 - R_B^2) p_s;$$

$$W_B^{XY} = \sum_1^{n_B} \iint_{\Delta S_B} p(x, y, z) ds = \bar{K}_{XY}^e \varepsilon_{XY} 4 \lambda r^2 p_s. \quad (4)$$

5. Опорные поверхности являются телами вращения, поэтому для их сравнения достаточно рассмотреть сечение плоскостью, проходящей через ось вращения ( $OZ$ ). Если линия сечения является непрерывной неубывающей или невозрастающей функцией  $y = f(z)$ , то опорная поверхность имеет максимальный  $R_{\max}$  и минимальный  $R_{\min}$  радиусы в крайних точках —  $z_{\min}$  и  $z_{\max}$  (на рис. 1 соответственно  $R_H$  и  $R_B$ ), и преобразуется через одну вспомогательную конусную поверхность с радиусами  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $R_1 = \frac{R_H + R_B}{2}$  и длиной  $L = z_{\max} - z_{\min}$ . Геометрические преобразования дополнительно ограничим выполнением условия:

$$\frac{(R_H + R_B)(z_{\max} - z_{\min}) - 2 \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} y(z) dz}{2 \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} y(z) dz} \leq K. \quad (5)$$

Коэффициент  $K$  определяет точность преобразования, устанавливается в пределах 0,01...0,1 — в зависимости от требуемой точности исследований. Если условие не выполняется, то необходимо скорректировать геометрические параметры конуса. В случае, когда  $R_{\max}$  или  $R_{\min}$  не совпадают с торцевыми границами опоры, ее поверхность необходимо условно разделить на несколько частей с новыми границами, соответствующими  $R_{\max}$

или  $R_{min}$ , и алгоритм преобразования повторить для каждой из частей.

В работах [7, 13] данный метод применен для исследования и расчета характеристик конических аэро-статических опор, а его точность (до 10 %) проверена численными методами. Пример представления бесконтактной опоры сложной конструкции как комбинации нескольких типовых опор для получения общего аналитического решения показан на рис. 2.

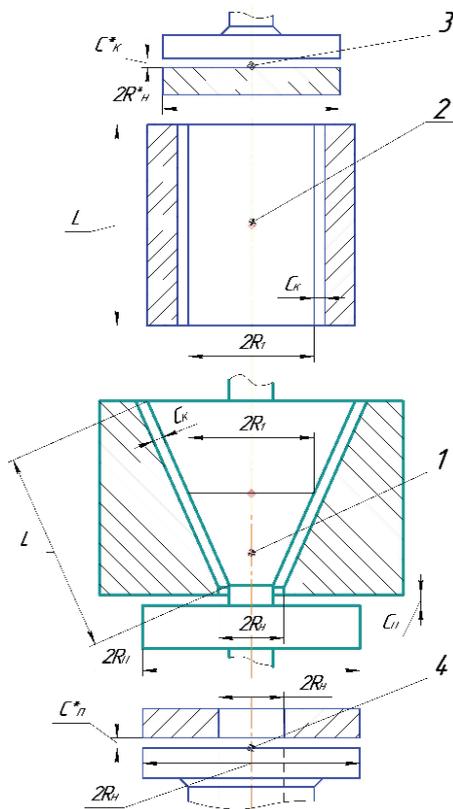


Рис. 2. Схема разделения исследуемой опоры на типовые:

- 1 — исходная бесконтактная опора сложной конструкции;
- 2 — типовой радиальный подшипник, поставленный в соответствие конусной части опоры;
- 3 — круговой подпятник, производный от конусной части опоры;
- 4 — кольцевой подпятник, поставленный в соответствие упорной части исходной бесконтактной опоры

### 3. Выводы

Совершенствование аэро-статических опор связано с использованием в них несущих поверхностей переменной кривизны, неравномерной подачи смазки в зазор и т. д. Усложнение конструкции и распределения параметров в смазочном слое затрудняет получение приближенного аналитического решения уравнения Рейнольдса, необходимого для параметрического синтеза бесконтактных опор. Предложенный метод позволяет получить аналитическое решение приведением исходной опоры к эквивалентной комбинации типовых опор с известными решениями относительно интегральных характеристик.

### Литература

1. Pavel Nosko. The concept of creating non-contact drive for working bodies in machines of various purpose [Текст] / 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.

2. Космынин, А. В. Шпиндели на газовых опорах — перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов [Текст] / А. В. Космынин, М. Р. Петров // Современные проблемы науки и образования. — 2006. — № 6. — С. 47–48.
3. Технология прямого привода. IDAM, INA — Drives & Mechatronics [Электронный ресурс] Schaeffler Group Industrial. — Режим доступа: [http://www.directdrives.de/en/download/IDAM\\_Image\\_080515\\_russisch.pdf](http://www.directdrives.de/en/download/IDAM_Image_080515_russisch.pdf). — Заголовок с экрана.
4. Pavel Nosko. Structural synthesis and design variants for non-contact machine drives [Текст] / Pavel Nosko, Vladimir Breshev, Pavel Fil, Grigory Boyko // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization in agriculture. Vol. XB. — Lublin, 2010. — P. 77–86.
5. Крайнев, А. Ф. Идеология конструирования [Текст] / Крайнев А. Ф. — М.: Машиностроение. — 1, 2003. — 384 с.
6. Krzysztof Czolczynski Rotordynamics of gas-lubricated journal bearing system [Текст] / Krzysztof Czolczynski — Mechanical engineering series, Springer Verlag New York, Inc., 1999.
7. Pavel Nosko. Analysis of design and calculation of parameters of non-contact drive single-support system [Текст] / Pavel Nosko, Aleksey Breshev, Pavel Fil, Vladimir Breshev // Polish Academy of sciences in Lublin TEKA Commission of motorization and power industry in agriculture. Vol. XIB. — Lublin, 2011. — P. 102–110.
8. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор [Текст] / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. — М.: Наука, 1982. — 265 с.
9. N. S. Grassam Gas Lubricated Bearings [Текст] / N. S. Grassam, J. W. Powell. — Butterworths, London, 1964.
10. J. W. Powel Design of Aerostatic Bearings [Текст] / J. W. Powel. — The Machinery Publishing Co. Lt., London, UK, 1970.
11. Константинеску, В. И. Газовая смазка [Текст] / Константинеску В. И.; пер. с рум. Г. П. Махо; под ред. М. В. Коровчинского. — М.: Машиностроение, 1968. — 709 с.
12. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг; пер. с нем. Г. А. Вольперта; под ред. Л. Г. Лойцянского. — М.: Наука, 1974. — 390 с.
13. Брешев, А. В. Разработка установки и методики экспериментальных исследований бесконтактного привода на конических аэро-статических опорах [Текст] : зб. наук. пр. / А. В. Брешев // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. — 2012. — № 1(13). — С. 309–314.

### МЕТОД ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПОРИ СКЛАДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Запропоновано метод перетворення аеростатичної опоры складної конструкції до еквівалентної комбінації типових опор. Маючи однакову несучу здатність та жорсткість з початковою опорою, комбінація типових опор дозволяє аналітично виразити інтегральні характеристики опоры для її параметричного синтезу.

**Ключові слова:** аеростатична опора, газова смазка, безконтактний привід.

**Брешев Владимир Евгеньевич**, кандидат технических наук, докторант кафедры «Машиноведение», Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, e-mail: [oevnu@mail.ru](mailto:oevnu@mail.ru).

**Брешев Алексей Владимирович**, аспирант кафедры «Машиноведение», Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, e-mail: [abreshev@gmail.com](mailto:abreshev@gmail.com).

**Брешев Володимир Євгенович**, кандидат технічних наук, докторант кафедри «Машинознавство», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Дала.

**Брешев Олексій Володимирович**, аспірант кафедри «Машинознавство», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Дала.

**Breshev Vladimir**, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, e-mail: [oevnu@mail.ru](mailto:oevnu@mail.ru).

**Breshev Aleksey**, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, e-mail: [abreshev@gmail.com](mailto:abreshev@gmail.com).