

УДК 255:29.1

### ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПНЕВМАТИЧНОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОЧОЇ КАМЕРИ

**М. М. Яцина**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: JacinaKoljan@mail.ru

Розглянута концепція впливу системи основного спряження пневмодвигуна роторного типу на енергоефективність його роботи. Обґрунтовано нове конструктивне рішення, що безпосередньо впливає на енергоефективність пневмодвигуна. Даний процес спостерігається за рахунок кривизни пелюстка, а точніше, вплив цієї кривизни на енергоефективність пневмодвигуна та зміну основних характеристик: витрати стиснутого повітря, потужність та крутний моменту. Дану зміну основних характеристик визначено на основі розрахунку основного спряження, що показано як вузол підшипника ковзання. Таким чином, вивчення елемента спряження пневмодвигуна, яка є основним елементом формування робочої камери показало, що на вплив енергоефективність пневмодвигуна безпосередньо впливає форма його елемента притискання, що виражається геометрією контактних точок в даному спряженні. Визначена залежність основних характеристик пневмодвигуна від радіусу кривизни прижимного елемента.

**Ключові слова:** основне спряження, енергоефективність, пневмодвигун, елемент притискання, робоча камера, кільцевий ротор, пелюсток.

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ

**М. М. Яцина**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: JacinaKoljan@mail.ru

Рассмотрена концепция влияния системы основного сопряжения пневмодвигателя роторного типа на энергоэффективность его работы. Обосновано новое конструктивное решение, что непосредственно влияет на энергоэффективность пневмодвигателя. Данный процесс формируется за счет кривизны лепестков, а точнее – влияние этой кривизны на энергоэффективность пневмодвигателя и изменение основных характеристик, а именно: расход сжатого воздуха, мощность и крутящий момент. Данное изменение основных характеристик определено на основе расчета основного сопряжения, что представлено как узел подшипника скольжения. Таким образом, изучение элемента сопряжения пневмодвигателя, который является основным элементом формирования рабочей камеры, показало, что влияние на энергоэффективность пневмодвигателя непосредственно оказывает форма его элемента прижима, что выражается геометрией контактных точек в данном сопряжении. Определена зависимость основных характеристик пневмодвигателя от радиуса кривизны прижимного элемента.

**Ключевые слова:** основное сопряжение, энергоэффективность, пневмодвигатели, элемент прижима, рабочая камера, кольцевой ротор, лепестки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Для збільшення ККД пневмодвигуна необхідно забезпечити максимальну ефективність основного спряження кільцепелюсток, що забезпечує герметичне відокремлення робочих камер. В даній системі кільце виступає як підшипник ковзання, а пелюсток – як вал, що дає можливість проводити розрахунок системи основного спряження на базі розрахунку підшипника ковзання. Однак, саме конструкція пневмодвигуна, в якій пелюсток (лопатка) знаходить не в роторі, а в корпусі пневмодвигуна, дає можливість застосовувати такий метод розрахунку герметичності та основних характеристик пневмодвигуна.

Метою даної роботи є визначення залежності основних характеристик пневматичного двигуна від геометричної форми елемента притискання основного спряження.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Необхідно розглянути конструкцію зазначеної системи в пластинчастому пневмодвигуні (рис. 1). Ротор представляє собою блок, в якому знаходяться притиснуті до корпусу пластини з силою  $R$ . Сила тертя  $N$  викликає силу протидії  $G$ , що призводить до виник-

нення небезпечних зон найбільшого навантаження, що призводить до подальшого зношування на лише поверхні корпусу а й зниженню герметичності робочих камер пневмодвигуна, що в подальшому призводить до зниження його енергоефективності.

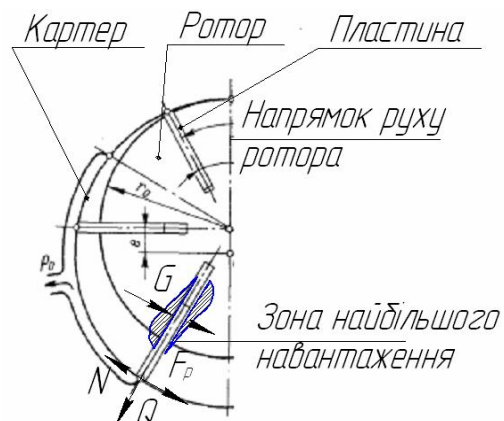


Рисунок 1 – Навантаження пелюстків у пластинчастому пневмодвигуні

Для вирішення цієї проблеми необхідно впроваджувати нові конструктивні рішення контактної пари. Визначено, що найбільш прийнятним являється розташування прижимних елементів не в роторі, а в корпусі пневмодвигуна, що зменшує складність при виготовленні ротора. Однак, головним конструктивним рішенням є не розташування прижимного елемента, а його геометрична форма [1]. Рух пластини відбувається в одній робочій площині, що й призводить до унеможливлення зменшення навантажень на робочий орган, однак запропонована циліндрична форма пелюстка збалансовує систему пелюсток-кільце за рахунок роботи не в одній площині, а по колу, тим самим постійно змінюючи напрям вектора притисної сили.

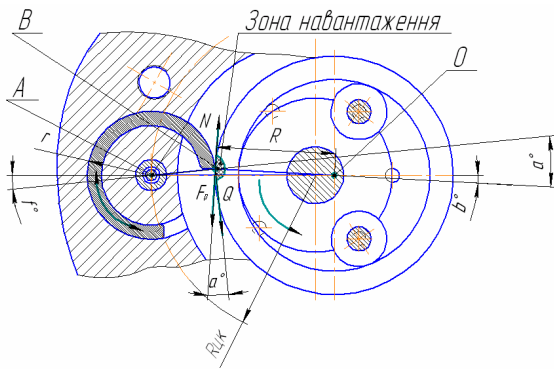


Рисунок 2 – Навантаження пелюстків у пластинчастому пневмодвигуні

На рис. 2 зображено вектори сил, що діють в зоні головного спряження, що визначають і зону навантаження поверхні кільця. Тому сумарне значення навантажуючих сил, що діють в точці В будуть виражені із наступного виразу:

$$F_H = F_P + Q \cdot \cos(a^\circ) - N, \quad (1)$$

де  $Q$  – сила притисання пелюстка до кільця;  $F_P$  – рушійна сила;  $N$  – сила тертя.

З виразу (1) видно, що сила притисання пелюстка до кільця співнаправлена з рушійною силою, сила тертя направлена в протилежному напрямку. Таким чином кут  $a^\circ$  змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , тому максимальне значення  $F_H$  буде становити при  $a^\circ = 0^\circ$ , а при  $a^\circ = 90^\circ$  мінімальне і буде мати вигляд рівнянь для пелюсткового пневмодвигуна, що доводить ефективність циліндричної форми пелюстка.

Однак не лише вираз (1) доводить ефективність такого конструктивного рішення.

Основною характеристикою поперечного перерізу циліндра є радіус його основи  $r$ . Тому можна виразити пластину пластинчастого пневмодвигуна як циліндр з дугою основи  $r = \infty$ . Звідси постає задача виразити  $a^\circ$  через  $r$ .

Розглянемо рис. 3 на якому представлена розрахункова схема залежності кута нахилу притисної сили пелюстка від радіуса пелюстка.

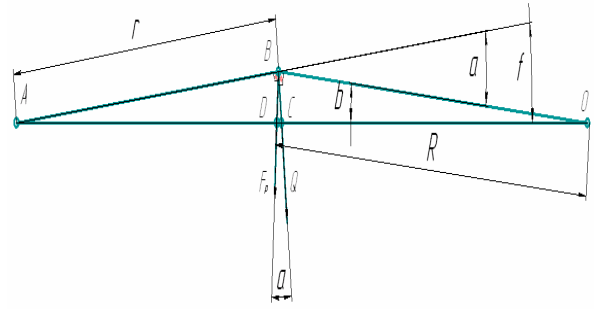


Рисунок 3 – Розрахункова схема залежності сили пелюстка від радіуса пелюстка

На рис. 3 зображено два прямокутні трикутники  $\triangle ABC$  і  $\triangle DBO$ . Кут між катетами  $BD$  та  $BC$  виразимо через значення катета  $AB=r$ , при цьому треба зазначити, що  $\angle ACB = (90 - f)^\circ$ , а  $\angle ODB = (90 - b)^\circ$ . Першочергово визначимо значення  $BD$  та  $BC$  за допомогою теореми Піфагора. Так, було визначено значення кута  $b$  за допомогою основних властивостей кутів прямокутного трикутника:

$$\sin(90 - b)^\circ = \frac{r \cdot \operatorname{tg}(f^\circ) \cdot \sin(90 - f)^\circ}{R \cdot \operatorname{tg}(b^\circ)}. \quad (2)$$

На основі функції подвійного кута, вираз (1) отримує вигляд:

$$\operatorname{tg}(b^\circ) \cdot \cos(b^\circ) = \frac{r \cdot \operatorname{tg}(f^\circ) \cdot \cos(f^\circ)}{R}. \quad (3)$$

Звідси:

$$\sin(b^\circ) = \frac{r \cdot \sin(f^\circ)}{R}. \quad (4)$$

Однак, на меті було визначення саме  $\angle a^\circ$  через радіус кільця  $r$ , тому з рис. 3.6 видно, що  $a^\circ = (180^\circ - (90^\circ - f^\circ) - (90^\circ - b^\circ)) = f^\circ + b^\circ$ .

Звідси,  $b^\circ = a^\circ - f^\circ$ . Тому вираз 2 буде мати вигляд:

$$\sin(a^\circ - f^\circ) = \frac{r \cdot \sin(f^\circ)}{R}. \quad (5)$$

Визначимо синус різниці двох кутів:

Таким чином,

$$a^\circ = \arctg \left( \operatorname{tg} f^\circ \cdot \left( 1 + \frac{r}{R} \right) \right). \quad (6)$$

Тому, вираз (1) отримає наступний вигляд:

$$F_H = F_P + Q \cdot \cos \left( \arctg \left( \operatorname{tg} f^\circ \cdot \left( 1 + \frac{r}{R} \right) \right) \right) - N. \quad (7)$$

На основі виразу (7) можна зробити висновки, що сила  $F_H$  безпосередньо залежить від геометричних параметрів деталей основного спряження, а

також значення кута  $f^\circ$  визначається з урахуванням умови запобігання затискання пелюстка кільцем, і водночас зберігання високої енергоефективності системи. Однак, треба зазначити, що радіус пелюстка буде знаходитись в полі від  $r = R_{цк} - R + e$ , де  $R_{цк}$  - радіус центра пелюстка (рис. 2), до  $r = \infty$ , що відповідає радіусу дуги пластини.

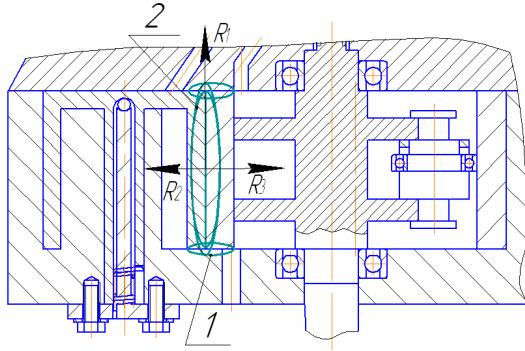


Рисунок 4 – Зони спряження контактуючих елементів

На рис. 4 виділено дві основні зони головного спряження: 1 – нерухома зона; 2 – рухома зона. Розглянемо сили, що діють в спряженні. Сила  $R_3$  виникає в результаті притискання пружиною пелюстка до кільця,  $R_2$  – реакція опору поверхні,  $R_1$  – сила, що діє при розкручуванні пружини в осьовому напрямку. За рахунок сили  $R_1$  виникають зони 1, що також впливають на статичний розрахунок основних деталей пневмодвигуна. Тому розрахунок даного спряження проводиться на основі розрахунку підшипника скользяння [4, 5] з урахуванням особливості робіт даної системи.

У системі основного спряження (рис. 4) приймаємо кільце як підшипник ковзання, на який діє радіальне навантаження  $p$  визначаємо із виразу [4]:

$$p = \frac{F}{D \cdot l}, \quad (8)$$

де  $F$  – сила, що діє на кільце;  $D$  – діаметр кільця;  $l$  – висота кільця.

Розглянемо силу  $F$ , як суму сил в усіх робочих камерах:

$$F = \sum_{i=1}^n G_i, \quad (9)$$

де  $n$  – кількість робочих камер;  $G_i$  – сила, що діє на кільце в  $i$ -й камері.

Вираз (3) визначає навантаження цапфи підшипника ковзання на кут  $180^\circ$ , тому при розрахунку кільця даний вираз буде мати наступний вигляд:

$$p = 2 \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{D \cdot l} \quad (10)$$

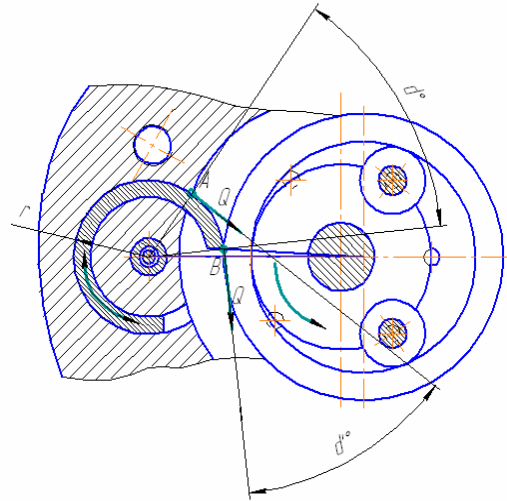


Рисунок 5 – Система спряжень основних деталей

На основі розрахункової схеми (рис. 5) навантаження в  $i$ -й робочій камері можна представити як вираз:

$$G_i = P_i + Q_i \cdot \sin d_i^\circ, \quad (11)$$

де  $P_i$  – навантаження від стиснутого повітря в  $i$ -й робочій камері, що направлена до центра кола кільця;

$d_i^\circ$  – кут сегмента пелюстка  $i$ -й робочої камери, що виходить із зачеплення з картером;

$Q_i$  – сила притискання пелюстка до кільця в  $i$ -й робочій камері.

Притискання пелюстка до кільця відбувається за допомогою кручення, що змінюється від кута повороту ротора в межах від  $P_{max}$  в точці В до  $P_{max} + Fnp$  в точці А (рис. 5). Це обумовлене тим, що в крайньому положенні пелюстка (точки В) сила притискання повинна забезпечувати герметичність камер, таким чином протидіє максимальному тиску. При подальшому русі пелюстка, сила притискання збільшується до максимального значення (точка А).

Значення сили притискання можна виразити у наступному вигляді:

$$Q_i = P_{max} + Fnp_i. \quad (12)$$

Як зазначено вище, пелюсток рухається від точки А до точки В. Таким чином кут  $d_i^\circ$  в процесі руху постійно змінюється. При цьому сила  $Q$  дотична до дуги пелюстка, що відповідно перпендикулярно до радіуса пелюстка  $r$ ,  $d_i^\circ = d_i'^\circ$ .

Таким чином, після ряду перетворень, виконаних на основі геометричних властивостей сектора кола, отримуємо вираз:

$$G_i = P_i + (P_{max} + Fnp_i) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot 360^\circ}{2\pi r}\right), \quad (13)$$

де  $k$  – довжина дуги сектора.

Необхідно врахувати, що під час роботи пневмодвигуна із кільцевим ротором відбувається постійна зміна тиску в робочих камерах тому, цей момент

необхідно враховувати у визначенні загального навантаження:

Тоді загальний вираз по визначенню навантаження буде мати наступний вигляд:

$$p = 2 \frac{\sum_{i=1}^n \left( P_i + (P_{\max} + Fnp_i) \cdot \sin \left( \frac{k \cdot 360^\circ}{2\pi r} \right) \right)}{D \cdot l} \quad (14)$$

На основі цього виразу проводяться подальші розрахунки на міцність в залежності від геометричних параметрів деталей пневмодвигуна для отримання необхідних технічних характеристик.

У попередньому розділі було проведено розрахунок параметрів зовнішньошвидкісної характеристики. Тому, на основі вище викладеного матеріалу проведемо розрахунок основних характеристик пневмодвигуна з кільцевим ротором, а саме: крутного моменту  $M_{kp}$ , потужності  $N$  та витрати повітря  $Q$ , з урахування стохастичних процесів, що обумовлені особливістю конструктивних елементів даної моделі, а саме, вираження зазначених характеристик через радіус пелюстка  $r$ .

Крутний момент можемо виразити у вигляді добутку сумарної сили  $F_{kp}$ , що діє на кільце в робочій камері, на плече, яким є ексинтриситет кільця  $e$  [2, 3].

$$M_{kp} = F_{kp} \cdot e \quad (15)$$

Сила  $F_{kp}$  для створення крутного моменту діє в робочій камері лише в тактах наповнення та розширення, в яких тиск повітря змінюється від атмосферного  $P_0$  до максимального значення  $P_{\max}$ . Враховуючи дані параметри тиску, запишемо вираз для обчислення сили, що створює крутний момент на роторі.

Після проведення всіх перетворень, формула (15) прийме вигляд:

$$M_{kp} = e \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (P_{\max}^2 + P_0^2) + \left( \int_0^{Fnp} (P_{\max} + Fnp) dFnp \right) \cdot \left( \sin \int_0^k \left( \frac{k \cdot 360^\circ}{2\pi r} \right) dk \right) \right] \quad (16)$$

Підставивши значення крутного моменту з виразу у вираз для визначення потужності [2], отримуємо вираз для стохастичного визначення потужності пневмодвигуна з кільцевим ротором:

$$N = \omega \cdot e \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (P_{\max}^2 + P_0^2) + \left( \int_0^{Fnp} (P_{\max} + Fnp) dFnp \right) \cdot \left( \sin \int_0^k \left( \frac{k \cdot 360^\circ}{2\pi r} \right) dk \right) \right] \quad (17)$$

Останньою характеристикою з визначеного переліку є витрата повітря, яку визначаємо за формулою:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot R' \cdot l \cdot (R' - R) \cdot n \cdot \lambda \quad (18)$$

де  $R'$  – радіус полості картера;  
 $l$  – висота кільця;  $n$  – частота ротора;  
 $\lambda$  – ступінь стискання.

Виразивши частоту обертання ротора, через кутову швидкість отримуємо:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot R' \cdot l \cdot (R' - R) \cdot \lambda \cdot \frac{\omega}{2\pi} \quad (19)$$

Визначимо кутову швидкість з виразу (17) з метою введення у розрахунковий процес витрати повітря значення радіуса пелюстка  $r$ .

Звідси випливає, що остаточний вираз з визначення витрати повітря має наступний вигляд:

$$Q = \frac{2R' \cdot l \cdot (R' - R) \cdot \lambda \cdot N}{e \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (P_{\max}^2 + P_0^2) + \left( \int_0^{Fnp} (P_{\max} + Fnp) dFnp \right) \cdot \left( \sin \int_0^k \left( \frac{k \cdot 360^\circ}{2\pi r} \right) dk \right) \right]} \quad (20)$$

Для кожного пневматичного двигуна, можна зобразити графік, що показує залежність крутного моменту  $M_{kp}$  і потужності  $N$ , а також споживання стисненого повітря  $Q$ , від швидкості обертання  $\omega$  (приклад розміщено на малюнку праворуч).

Для пневмодвигуна з пелюстками циліндричного типу картина буде дещо іншою ніж у пластинчатих, що пов'язано з зазначеним у виразах (16), (17) та (20) кутом нахилу вектора сили притискання пелюстка до кільця, який виражається через радіус циліндра кільця  $g$ .

Розрахунок основних технічних характеристик пневмодвигуна виконується в процентному відношенню за допомогою програми MatCad. За результатами розрахунку, будемо графік зміни основних технічних характеристик пневмодвигуна від зміни радіуса пелюстка (рис. 8).

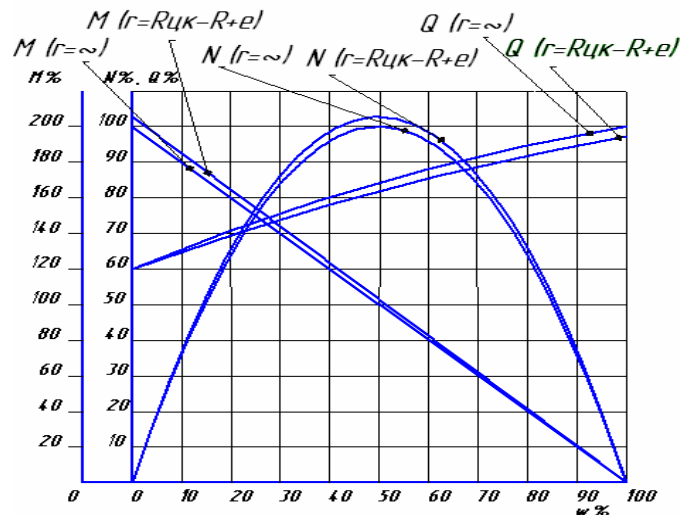


Рисунок 8 – Графік зміни основних технічних характеристик пневмодвигуна від зміни радіуса пелюстка

На рис. 8 видно, що при такому конструктивному рішенні значення потужності та крутячого моменту пневмодвигуна зростає, а витрата повітря зменшується [1].

**ВИСНОВКИ.** Циліндрична форма пелюстка дає можливість збалансувати систему пелюсток–кільце та зменшити навантаження на робочий орган без зниження герметичності робочої камери.

На відміну від пневмодвигунів пластинчастого типу, пневмодвигун із кільцевим, як було зазначено вище, ротором має характерні відмінності та особливості конструкції, зокрема у формуванні робочих камер і динаміці роботи контактної системи. Вибрана циліндрична форма пелюстка вносить в систему корективи по визначенню напрямку вектора притискної сили та вводить нові параметри при її оцінюванні, а саме, кут дії робочого циклу пелюстка  $d$ , та радіус циліндра пелюстка  $r$ .

Таким чином, дане конструктивне рішення дає можливість не лише покращити технічні характери-

стики, а й його експлуатаційні властивості та збільшити ремонтпридатність на відміну від інших типів роторних пневмодвигунів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Герц Е.В. Методы синтеза и анализа пневматических систем машин. – В кн.: Теория машин-автоматов и пневмогидропривода. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 166–176.
2. Гришкевич А.И. Автомобиль. Теория. – М.: Машиностроение, 1986. – 127 с.
3. Солтус А.П. Теория эксплуатационных vlastivostey avtomobilya. – Київ, 2006. – 176 с.
4. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин. – М.: Высшая школа, 1978. – 217 с.
5. Кожевников С.Н. Аппаратура и механизмы гидро-, пневмо- и электроавтоматики металлургических машин. – М.: Машгиз, 1961. – 550 с.

#### INCREASE OF POWER EFFICIENCY PNEUMATIC ENGINE ON BASIS OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF ELEMENTS OF WORKING CHAMBER

**M. Yatsyna**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: JacinaKoljan@mail.ru

The conception of influence of the system of the main conjugation of pneumodrive for rotor type onto energy-efficiency of it's work has been examined. The new constructive decision, which directly influences the energy-efficiency of pneumodrive has been proved. The mentioned process is observed because of curvature of petals, moreover, the influence of it's curvanness onto the energy-efficiency and changing of main characteristics, so as: expenditure of compressed air, power and torque. The mentioned changing of main characteristics if defined on the basement of calculations with chief conjugation, what is represented as the knot of sliding bearing. Thus, the exploring of conjugation element of pneumodrive, which appears as the main elements of forming of working chamber, showed that the energy-efficiency of pneumodrive is being influenced with the shape of clasping element, what has been expressed by the geometry of contact points in this conjugation. Also, the dependence of main characteristics of pneumodrive from the radius of curving of clasping element has been defined.

**Key words:** main conjugation, energy-efficiency, pneumodrive, clasping element, working chamber, petals, annular rotor.

#### REFERENCES

1. Hertz, E. (1970), «Methods of synthesis and analysis of pneumatic systems of machines» [Metodi sinteza i analiza pnevmaticheskikh system mashin], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
2. Grishkevich, A. (1986) «Car. Theory» [Avtomobil. Teoriya], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
3. Soltus, A. (2006), [Teoriya ekspluatatsiynih vlastivostey avtomobilya], Kyiv, Ukraine.
4. Dunaev, P. (1978) «Design of components and machine parts» [Конструирование узлов и деталей машин], Vishaya shkola, Moscow, Russia.
5. Kozhevnikov, S. «Equipment and machinery hydraulic, pneumatic and elektroavtomatiki metallurgical machines» [Aparatura i mehanizmi gidro-, pnevmo- i elektroavtomatiki metallurgicheskikh mashin], Mashgiz, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 16.08.2013.