

М.Р. Ткач, О.С. Митрофанов, А.С. Познанський

## ОСОБЛИВОСТІ КІНЕМАТИКИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГУНА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Наведені загальна будова та принцип роботи роторно-поршневого двигуна нової конструкції 12РПД-4,4/1,75 з регульованим золотниковим розподілом повітря. Конструкція двигуна поєднує переваги поршневих та роторних двигунів, що забезпечує низькі значення питомої витрати робочого тіла й високі значення ККД. Розглянутий роторно-поршневий двигун завдяки своїм техніко-експлуатаційним перевагам має широкий спектр застосування у різних галузях промисловості та у складі енергетичних установок різного призначення, наприклад у схемах комбінованих силових установок транспортних засобів. Досить проста й компактна конструкція при малій вазі запропонованого двигуна забезпечує його невисоку ціну при виготовленні, а також надійність і невибагливість при експлуатації. Роторно-поршневий двигун завдяки рівномірному розміщенню циліндрів у роторі та малій вазі деталей, що рухаються зворотно-поступово, має високу врівноваженість та можливість пуску при будь-якому положенні центрального ротора. Конструкція двигуна, як і для всіх ротаційних двигунів, передбачає відсутність мертвого об'єму. Тобто фактично мертвий об'єм відповідає роботі виштовхування при тиску впуску в компресорному циклі. На відміну від існуючих серійних пневмодвигунів із золотниковим розподілом повітря, розглянута конструкція роторно-поршневого двигуна має можливість регулювати фази газорозподілу та режими роботи двигуна за рахунок ступеня наповнення циліндра. Регулювання фаз газорозподілу в досить широкому діапазоні забезпечується за рахунок повороту центрального регулюючого кулачкового вала. Крім того, центральний регулюючий кулачок дає змогу змінювати напрямок обертання центрального ротора. Розглянута кінематична схема, яка значно відрізняється від класичної схеми кривошипно-шатунного механізму. Проведений кінематичний аналіз схеми руху роторно-поршневого двигуна. Для подальшого розрахунку діючих сил у двигуні запропоновані залежності визначення безрозмірних переміщення, швидкості та прискорення поршня залежно від кута повороту центрального ротора  $\phi$ . Визначені коефіцієнти гармонічного ряду в зазначених залежностях.

**Ключові слова:** роторно-поршневий двигун; пневмодвигун; стиснене повітря; кінематика; переміщення поршня; швидкість поршня; прискорення поршня.

### Вступ

Пневмодвигуни є енергосиловими машинами, дія яких спрямована на перетворення енергії стисненого повітря в корисну механічну роботу. Широкий спектр застосування пневмодвигунів у різних галузях промисловості можливий завдяки таким характеристикам, як різноманітність моделей, простота конструкції, мала вага, вибухобезпечність, великий діапазон частоти обертання.

Відомо використання пневмодвигунів у схемах комбінованих силових енергетичних установок транспортних засобів [1-3]. Ідея такого застосування полягає в тому, щоб на всіх несприятливих режимах роботи двигуна внутрішнього згорання, з точки зору екології та витрати палива, замінити або доповнити роботу установки пневматичним двигуном.

До основних переваг пневматичних двигунів відносять: відносну простоту конструкції та експлуатаційного обслуговування; надійність роботи в широкому діапазоні температури; низькі масогабаритні показники; пожежну і вибухову безпечність; низький рівень робочого шуму.

Недоліки використання пневмодвигунів обумовлені природою робочого тіла – повітря. При стисненні повітря накопичує енергію, яка за певних умов може перетворитися в кінетичну енергію рухомих мас і викликати ударні навантаження. У та-

кому випадку для забезпечення плавності пневмодвигунів виникає потреба в спеціальних додаткових пристроях. Також до недоліків пневмодвигунів відносять низький ККД за рахунок багатократного перетворення енергії, високу витрату стисненого повітря та обмеженість енергоємності заправних балонів.

Для усунення проблем, пов'язаних з недоліками застосування пневмодвигунів у енергетичних установках, необхідне подальше вдосконалення існуючих або створення нових пневмодвигунів.

### Постановка задачі

Сучасний пневмодвигун з великим моторесурсом може бути створений тільки на підставі його числового моделювання. Математичне моделювання дозволяє значно знизити матеріальні витрати на стадії проектування пневмодвигуна та отримати достовірні результати. У пневмодвигунах використовують різні схеми механізмів, зокрема і схеми, схожі на кривошипно-шатунні механізми (КШМ) ДВЗ [4]. Моделювання пневмодвигунів виконується на підставі його кінематичного і динамічного дослідження. Вибір схеми визначається типом двигуна, вимогами, що висуваються до нього, умовами експлуатації та іншими факторами [5].

Мета даної роботи полягає у визначенні та математичному описі закону переміщення поршня

залежно від обертового руху вихідного вала роторно-поршневого двигуна нової конструкції.

**Виклад основного матеріалу**

На машинобудівному підприємстві ТОВ «Мотор-Плюс» для енергетичних установок різного призначення спроектовано зразок роторно-поршневого двигуна нової конструкції 12РПД-4,4/1,75 (рис. 1). При проектуванні та створенні роторно-поршневого двигуна використано досвід підприємства у створенні подібних типів двигунів, а саме патент на винахід України №7592 [6] (автори Волощук О. І., Шабалін Ю. В., Фролов В. К., Тетерев В. С.). У конструкцію нового роторно-поршневого двигуна внесено значний ряд принципів змін та враховано всі недоліки, що підтверджено заявкою на патент, реєстраційний номер № а 2019 02189.

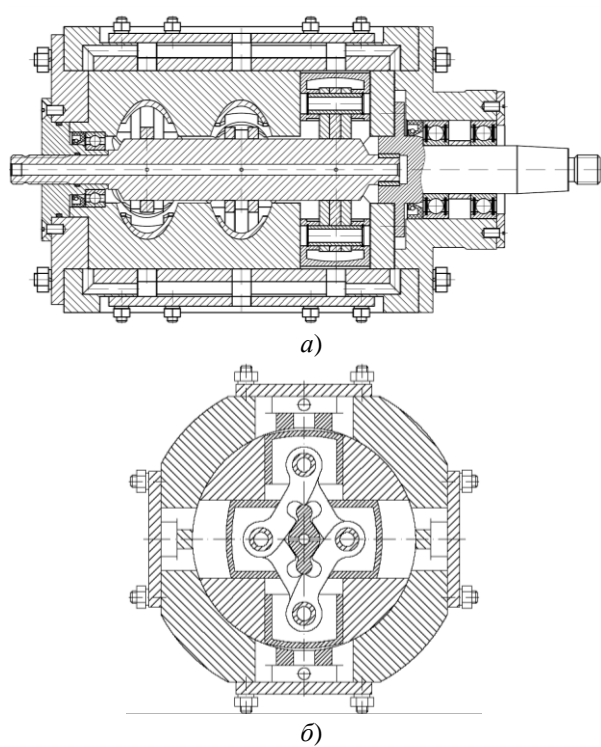


Рис. 1. Роторно-поршковий двигун 12РПД-4,4/1,75:  
а – поздовжній розріз двигуна; б – поперечний розріз двигуна

У корпусі роторно-поршневого двигуна розміщено центральний ротор з радіальними попарно-опозитними дванадцятьма циліндрами, в яких зворотньо-поступово рухаються поршні. Поршні зв'язані між собою за допомогою плаваючих пальців та жорстких ланок таким чином, що утворюють шарнірний чотирикутник. Також у корпусі виконані впускні та випускні ресивери й канали.

При відкритті центральним ротором впускних отворів стиснене повітря з впускного ресивера поступає до робочого циліндра двигуна. У циліндрі стиснене повітря розширюється та передає зусилля на два симетрично розташованих поршні й, відповідно, зв'язаним з ними рухомим ланкам. Поршні, які рухаються до осі ротора, виконують корисну роботу (робочий хід), а зв'язані з ними у шарнірному чотирикутнику протилежні – виштовхують залишки повітря через канали у випускний ресивер (допоміжний хід). За рахунок цього центральний ротор починає обертатися.

У центрі шарнірного чотирикутника розміщено регулюючий кулачок, який дозволяє змінювати кут відкриття органів газообміну і, тим самим, регулювати режими роботи роторно-поршневого двигуна. Також регулюючий кулачок дає змогу змінювати напрямок обертання центрального ротора.

Для перетворення поступального руху поршня в обертовий рух ротора двигуна використовується схема (рис. 2), яка значно відрізняється від класичної схеми КШМ. Тому для розрахунку діючих сил у двигуні потрібно знати закон руху механізму.

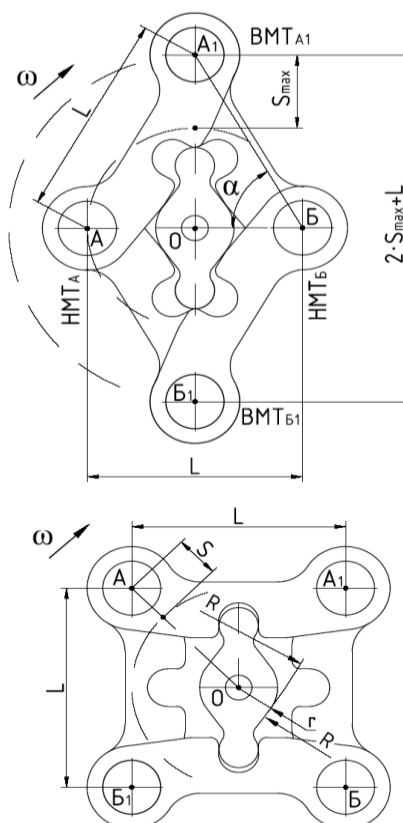


Рис. 2. Кінематична схема механізму руху роторно-поршневого двигуна

Положення механізму визначається кутом повороту ротора  $\varphi$ . Початком відліку є положення

поршня у нижній або верхній мертвій точці (НМТ і ВМТ). Причому відстань між центрами ланок у положенні протилежних поршнів у НМТ (АВ) дорівнює міжцентровій відстані окремої ланки, тобто  $AB = L$ . Відстань між центрами ланок у положенні протилежних поршнів у ВМТ (А<sub>1</sub>Б<sub>1</sub>) дорівнює сумі міжцентровій відстані окремої ланки та двох максимальних ходів поршня, тобто  $A_1B_1 = 2S_{\max} + L$ .

Кутова швидкість та частота обертання ротора при кінематичних і динамічних розрахунках приймаються сталими:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \approx 0,105n, \text{ с}^{-1}.$$

Якщо в момент початку відліку поршень знаходиться у ВМТ, тобто  $\tau = 0, \varphi = 0$ , то положення ротора у будь-який момент часу ( $\tau, \text{ с}$ ) може бути знайдено за формулою рівномірного руху

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \omega \tau = b \nu \tau.$$

Переміщення поршня  $S$  від його положення у ВМТ напряму залежить від зміни кута  $\alpha = 30 \dots 60^\circ$  (рис. 3) у прямокутному трикутнику  $\Delta A_1OB$  та визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} S(\alpha) &= \frac{(A_1B_1 - L)}{2} = \frac{(2 \cdot A_1O - L)}{2} = \\ &= \frac{(2 \cdot L \cdot \sin \alpha - L)}{2} = L \cdot (\sin \alpha - 0,5). \end{aligned}$$

Максимальне переміщення поршня  $S_{\max}$ , яке напряму залежить від міжцентрової відстані ланки  $L$ , відповідає куту  $\alpha = 60^\circ$ :

$$S_{\max}(60^\circ) = A_1O - L/2 = L \left( \sqrt{\frac{3}{4}} - \frac{1}{2} \right) \approx 0,366L.$$

Безрозмірним називається переміщення поршня, віднесене до максимального переміщення  $S_{\max}$ , та визначається за формулою

$$s(\varphi) = \frac{S(\varphi)}{S_{\max}}.$$

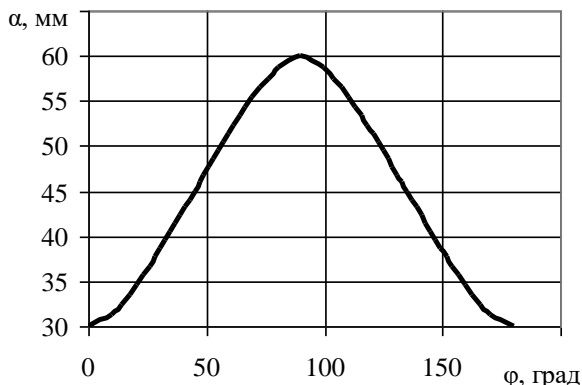


Рис. 3. Зміна кута положення ланки  $\alpha$  відносно кута повороту ротора  $\varphi$

Безрозмірне переміщення поршня  $s$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$  (рис. 4) можливо подати у вигляді гармонічного ряду та визначити за формулою

$$s(\varphi) = a_0 - \left[ a_1 \cos(2\varphi) + a_2 \cos(4\varphi) - a_3 \cos(6\varphi) + a_4 \cos(8\varphi) \right],$$

де  $a_0 = 5328,6726 \cdot 10^{-4}$ ;  $a_1 = 0,5$ ;  $a_2 = 334,3203 \cdot 10^{-4}$ ;  $a_3 = 5,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $a_4 = 152,3437 \cdot 10^{-7}$  – коефіцієнти гармонічного ряду.

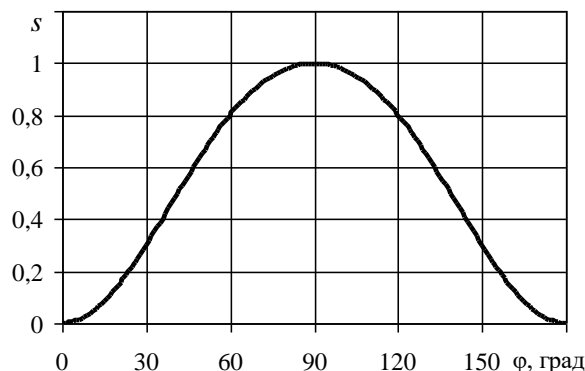


Рис. 4. Залежність безрозмірного переміщення поршня  $s$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$

Швидкість поршня при постійній кутовій швидкості обертання ротора не постійна. Середнє значення швидкості дорівнює  $c_m = Sn/15$  м/с. Швидкість  $V$  та прискорення  $J$  поршня визначаються послідовним диференціюванням залежності безрозмірного переміщення поршня. Їх безрозмірні величини пов'язані з дійсними співвідношеннями

$$v(\varphi) = \frac{V(\varphi)}{S_{\max} \omega}; \quad j(\varphi) = \frac{J(\varphi)}{S_{\max} \omega^2}.$$

Безрозмірна швидкість поршня  $v$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$  (рис. 5) визначається за формулою

$$\begin{aligned} v(\varphi) &= 2a_1 \sin(2\varphi) + 4a_2 \sin(4\varphi) - \\ &- 6a_3 \sin(6\varphi) + 8a_4 \sin(8\varphi). \end{aligned}$$

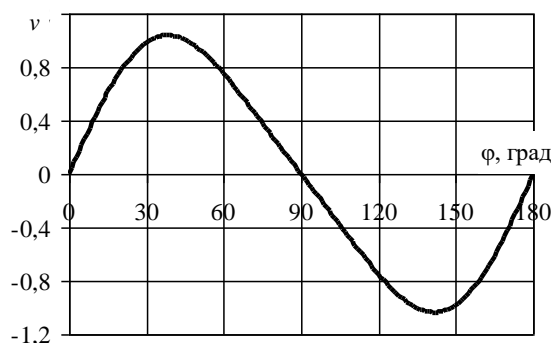


Рис. 5. Безрозмірна швидкість поршня  $v$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$

Безрозмірне прискорення поршня  $j$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$  (рис. 6) визначається за формулою

$$j(\varphi) = 4a_1 \cos(2\varphi) + 16a_2 \cos(4\varphi) - 36a_3 \cos(6\varphi) + 64a_4 \cos(8\varphi)$$

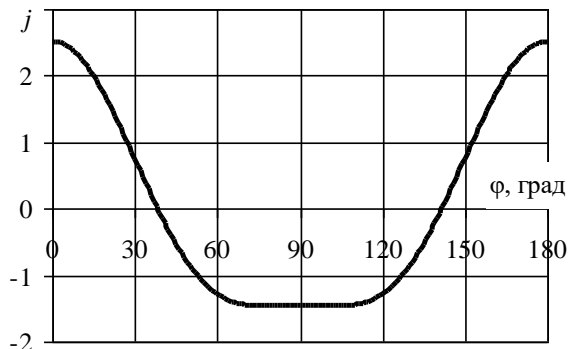


Рис. 6. Безрозмірне прискорення поршня  $j$  залежно від кута повороту ротора  $\varphi$

Виконання кінематичних розрахунків з точністю, що перевищує значення точності вихідних даних, які визначаються неточністю виготовлення та збирання, непостійністю розмірів у зв'язку з наявністю пружних і температурних деформацій, а також непостійністю кутової швидкості обертання ротора, що залежить від властивостей споживача енергії, двигуна і його регулятора, є недоцільним. Тому для практичних розрахунків (з трьома-чотирма значущими цифрами) використання запропонованих залежностей є цілком прийнятним.

### Висновки

Наведені загальна будова, принцип роботи та кінематична схема роторно-поршневого двигуна нової конструкції. Проведений кінематичний аналіз схеми руху двигуна.

Запропоновані залежності для визначення переміщення, швидкості та прискорення поршня залежно від кута повороту вихідного вала ротора. Визначені коефіцієнти гармонічного ряду в кінематичних залежностях. Отримані рівняння дозволяють визначити закон змінення об'єму циліндра для подальшого розрахунку робочого циклу та динаміки двигуна.

**Ткач Михайло Романович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua.

**Митрофанов Олександр Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mitrofanov.al.ser@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-3460-5369.

**Познанський Андрій Станіславович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: andreypoznansky@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-4351-7504.

### Список літератури:

1. Абрамчук Ф. И. О достоинствах и целесообразности применения поршневого пневмодвигателя в составе автомобильной гибридной установки [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. И. Воронков, И. Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ. – 2010. – Вып. 48. – С. 200–205.
2. Соколовский Д. Надули – и поехали! [Электронный ресурс] / Д. Соколовский // Научно-технический журнал «Двигатель». – 2005. – № 1 (37). – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru>.
3. О выборе параметров поршневого пневмодвигателя, работающего в составе гибридной энергоустановки автомобиля [Текст] / А. Н. Туренко, В. А. Богомолов, Ф. И. Абрамчук, А. И. Харченко, А. И. Шилов // Автомобильный транспорт : сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. – Вып. 22. – С. 7–16.
4. Зеленецкий С.Б. Ротационные пневматические двигатели [Текст] / С.Б. Зеленецкий, Е.Д. Рябков, А.Г. Микеров. – Л.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
5. Конструирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мяжков. – М.: Машиностроение, 2008. 496 с.
6. Пат. на винахід України №7592. Поршнева машина [Текст] / Волощук О.І., Шабалін Ю.В., Фролов В.К., Тетєрьєв В. С. ; Український науково-дослідний інститут технології суднобудування ; 4345140/SU ; 29 вересня 1995 р. – Бюл. № 3.

### Bibliography (transliterated):

1. Abramchuk, F.I., Voronkov, A.I., Nikitchenko, I.N. (2010), «On the merits and feasibility of using a piston air motor as part of an automotive hybrid installation», *KhNADU Bulletin: collection of scientific tr.*, [«O dostoinstvah i tselesoobraznosti primeneniya porshnevoogo pnevmodvigatelya v sostave avtomobilnoy gibridnoy ustanovki», *Vestnik HNADU: sb. nauchn. tr.*], № 48, pp. 200-205.
2. Sokolovskij, D. (2005), «Cheated - and go!», *Scientific and technical journal «Engine»*, [«Naduli – i poehali», *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Dvigatel»*], № 1, <http://engine.aviaport.ru>.
3. Turenko, A. N., Bogomolov, V. A., Abramchuk, F. I., Harchenko, A. I., Shilov, A. I. (2008), «On the choice of parameters of a piston air motor operating as part of a hybrid power plant car», *Automobile transport: a collection of scientific papers*, [«O vyibore parametrov porshnevoogo pnevmodviga-telya, rabotayuschego v sostave gibridnoy energoustanovki avtomobilya», *Avtomobilnyy transport: sb. nauch. tr. HNADU*], № 22, pp. 7-16.
4. Zelenetskiy, S.B., Ryabkov, E.D., Mikerov, A.G. (1976), *Rotary Pneumatic Motors, [Rotatsionnyye pnevmaticheskie dvigateli]*, *Mashinostroenie, Leningrad*, 240 p.
5. Chajnov, N. D., Ivashenko, N. A., Krasnokutskij, A. N., Myagkov, L. L. (2008), *Construction of internal combustion engines, [Konstruirovanie dvigatelej vnutrennego sgoraniya]*, *Mashinostroenie, Moscow*, 496 p.
6. Voloshchuk, O.I., Shabalin, Yu.V., Frolov, V.K., Tietieriev, V. S. (1995), *Patent on vinahid Ukrainy №7592. Porshnev car, Ukrainian National Research Institute, Institute of Technology court-to-law, [Pat. na vynahid Ukrainy №7592. Porshneva mashyna; Ukrainskiy naukovo-doslidnyi instytut tekhnolohii sudnobuduvannia]; 4345140/SU; 29 veresnia 1995 r. – Biul. № 3.*

Надійшла до редакції 07.06.2019 р.

## ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

*М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский*

Приведены общее строение и принцип работы роторно-поршневого двигателя новой конструкции 12РПД-4,4/1,75 с регулируемым золотниковым распределением воздуха. Конструкция двигателя объединяет преимущества поршневых и роторных двигателей, обеспечивает низкие значения удельного расхода рабочего тела и высокие значения КПД. Рассмотренный роторно-поршневой двигатель благодаря своим технико-эксплуатационным преимуществам имеет широкий спектр применения в различных отраслях промышленности и в составе энергетических установок различного назначения, например в схемах комбинированных силовых установок транспортных средств. Достаточно простая и компактная конструкция при малом весе предложенного двигателя обеспечивает его невысокую цену при изготовлении, а также надёжность и неприхотливость в эксплуатации. Роторно-поршневой двигатель благодаря равномерному размещению цилиндров в роторе и малому весу деталей, которые двигаются возвратно-поступательного, имеет высокую уравновешенность и возможность пуска при любом положении центрального ротора. Конструкция двигателя, как и для всех ротационных двигателей, предполагает отсутствие мертвого объема. То есть фактически мертвый объем соответствует работе выталкивания при давлении выпуска в компрессорном цикле. В отличие от существующих серийных пневмодвигателей с золотниковым распределением воздуха, рассматриваемая конструкция роторно-поршневого двигателя имеет возможность регулировать фазы газораспределения и режимы работы двигателя за счет степени наполнения цилиндра. Регулирование фаз газораспределения в достаточно широком диапазоне обеспечивается за счет поворота центрального регулирующего кулачкового вала. Кроме того, центральный регулирующий кулачок позволяет менять направление вращения центрального ротора. Рассмотрена кинематическая схема, которая значительно отличается от классической схемы кривошипно-шатунного механизма. Проведен кинематический анализ схемы движения роторно-поршневого двигателя. Для дальнейшего расчета действующих сил в двигателе предложены зависимости определения безразмерных перемещения, скорости и ускорения поршня в зависимости от угла поворота центрального ротора  $\varphi$ . Определены коэффициенты гармонического ряда в указанных зависимостях.

**Ключевые слова:** роторно-поршневой двигатель; пневмодвигатель; сжатый воздух; кинематика; перемещение поршня; скорость поршня; ускорение поршня.

## THE SPECIFICITIES OF KINEMATICS OF ROTOR-PISTON ENGINE FOR A NEW CONSTRUCTION

*M. R. Tkach, O. S. Mytrofanov, A. S. Poznanskyi*

The general structure and principle of operation of the rotary-piston engine of the new design 12RPE-4,4/1,75 with adjustable spool air distribution are given. The design of the engine combines the advantages of piston and rotor engines, provides low values of the specific consumption of the working fluid and high values of efficiency. Considered a rotary-piston engine due to its technical and operational advantages has a wide range of applications in various industries and as part of power plants for various purposes, for example, in the schemes of combined power plants of vehicles. A fairly simple and compact design with a low weight of the proposed engine ensures its low price in manufacturing, as well as reliability and simplicity in operation. The rotor-piston engine due to the uniform placement of the cylinders in the rotor and the low weight of parts that move back and forth gradually, has high balance and the ability to start at any position of the central rotor. The design of the engine, as for all rotary engines, implies the absence of dead volume. That is, a virtually dead volume corresponds to the push operation at the intake pressure in the compressor cycle. In contrast to the existing serial air motors with a spool air distribution, the considered design of a rotary-piston engine has the ability to adjust the valve timing and engine operating conditions due to the degree of filling of the cylinder. Regulation of the valve timing over a fairly wide range is ensured by turning the central adjusting camshaft. In addition, the central adjusting cam allows you to change the direction of rotation of the central rotor. The kinematic scheme is considered, which differs significantly from the classical scheme of a crank mechanism. A kinematic analysis of the rotor-piston engine motion pattern is carried out. For further calculation of the acting forces in the engine, the dependencies of the definition of dimensionless displacement, velocity and acceleration of the piston depending on the angle of rotation of the central rotor  $\varphi$  are proposed. The coefficients of the harmonic series in these dependencies are determined.

**Key words:** rotor-piston engine; pneumatic engine; compressed air; kinematics; displacement of the piston; piston velocity; acceleration of the piston.