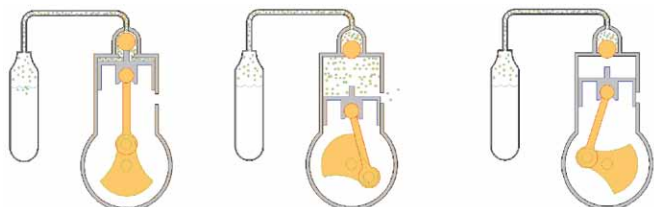


Nowe rozwiązanie konstrukcyjne silnika pneumatycznego

Adam Ilnicki, Mariusz Rząsa

Wstęp

Spośród szerokiej gamy różnych rozwiązań silników służących do napędu maszyn roboczych spore zastosowanie mają silniki pneumatyczne. Podstawową zaletą silników pneumatycznych jest ich niewielka masa w stosunku do mocy oraz możliwość pracy przy bardzo wysokich obrotach. Jednakże rozprężanie sprężonego powietrza powoduje jego oziębienie, które zmniejsza sprawność. Niejednokrotnie wymaga to podgrzewania silnika ciepłem z otoczenia. Historia rozwiązań konstrukcyjnych silników pneumatycznych sięga XVII wieku. W 1687 roku powstała pierwsza na świecie kolej pneumatyczna. Najbardziej dynamiczny rozwój silników pneumatycznych rozpoczął się od wynalazku polskiego inżyniera Ludwika Mękałskiego. W roku 1870 skonstruował on pneumatyczny silnik tłokowy, który znalazł zastosowanie do zasilania lokomotyw w kopalniach oraz do napędu tramwajów jeżdżących we francuskich miastach, takich jak Vichy, Nantes czy Saint-Quentin [2, 14]. Jego zasada działania polegała na zastosowaniu zaworu zwrotnego, którego otwarcie było uruchamiane tłokiem roboczym.



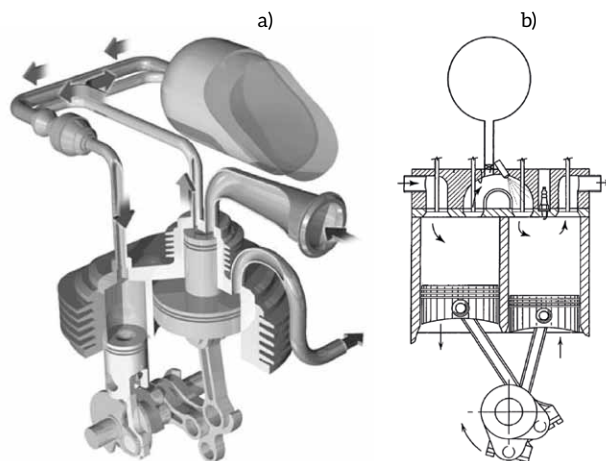
Rys. 1. Cykle pracy silnika pneumatycznego konstrukcji Ludwika Mękałskiego

Znaczącym odkryciem w historii silników pneumatycznych było również opracowanie przez Roberta Hardiego w roku 1892 systemu dynamicznego pompowania zbiorników przy operacji hamowania pojazdu [1]. Wynalazek ten uwzględniał użycie silnika jako sprężarki podczas hamowania, dzięki czemu część zdekompresowanego powietrza była odzyskiwana i ponownie sprężana. Jednym z ostatnich przedwojennych osiągnięć w tej dziedzinie był projekt Johanna Wardeniera, który według doniesień miał być pierwszym silnikiem niewymagającym zasilania paliwem płynnym [1]. W 1991 r. Guy Nègre wynalazł silnik z podwójnym zasilaniem. Zbudowany przez Nègre'a silnik ma dwa cylindry o różnej średnicy tłoka i odmienną konstrukcję korbowodu (rys. 2 a). Tłok w dużym cylindrze został podzielony na dwie części w taki sposób, aby tłok mógł w cyklu swojej pracy wykonywać ruch wychylny. Ma to na celu zatrzymanie tłoka w najwyższej pozycji przez czas potrzebny na wykonanie

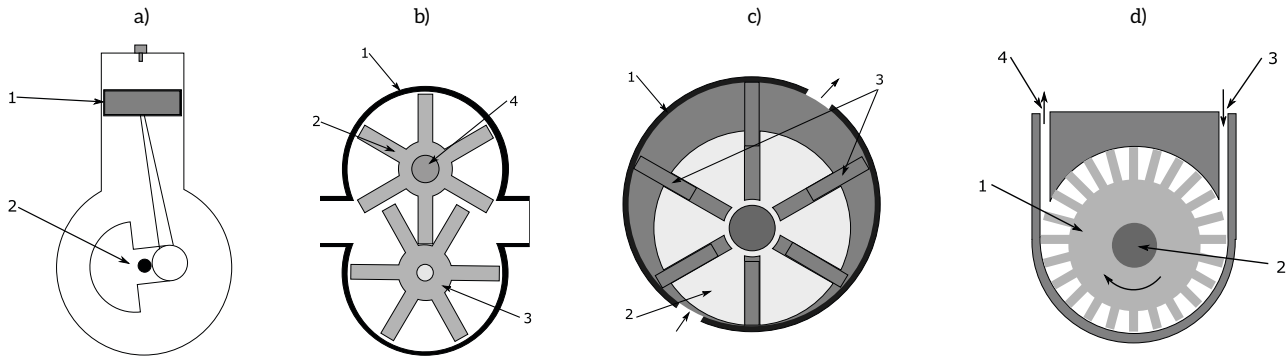
Streszczenie: Celem pracy jest opisanie nowego polskiego wynalazku silnika pneumatycznego według patentu PL 214371. W pracy przedstawiono budowę oraz zasadę działania, opisano stanowisko badawcze, wstępne wyniki pomiarów oraz wyznaczono podstawowe kierunki dalszych prac badawczych.

Abstract: The aim of this thesis is to describe a new, Polish pneumatic engine invention according to patent nr PL 214371. The construction, principals of functionality, the inspection facility, were described in the thesis. Initial measurement results and main directions of further research were also provided.

przez wał korbowy obrotu o 70°, celem lepszego sprężenia włączanego powietrza. Tłok w małym cylindrze pracuje w sposób tradycyjny, zapewniając napęd w okresie bezczynności większego tłoka, poruszającego się szybciej w górę niż w dół. W kolejnych latach powstawały modyfikacje opisanego wynalazku [10]. Jeden z nich polegał na tym, że duży tłok wykonuje cykl ssania i sprężania, dodatkowo wprowadzono komorę spalania o stałej objętości, z której następuje rozprężenie w komorze z małym tłokiem [15]. Kolejna modyfikacja polegała na wprowadzeniu wtrysku paliwa do sprężonego i ogrzanego powietrza, wstępnej komorze dodatkowo zasilonego ze zbiornika ciśnieniowego. Spalanie mieszanki i praca następuje w komorze z mniejszym tłokiem (rys. 2).



Rys. 2. Silnik spalinowy ze wspomaganie pneumatycznym | a) konstrukcji Nègre'a [17]; b) z wtryskiem paliwa [9]



Rys. 3. Typowe rozwiązania silników pneumatycznych: a) tłokowy; b) zębatkowy; c) łopatkowy; d) turbinowy

Obecnie silniki pneumatyczne są używane do rozruchu silników spalinowych w samochodach wyścigowych. Małe silniki pneumatyczne są powszechnie używane do napędu narzędzi ręcznych, takich jak wiertarki, młoty udarowe, szlifierki, klucze itp. Niemniej nie słabnie zainteresowanie szerszym wykorzystaniem silników pneumatycznych [12, 13]. Zainteresowanie dotyczy również zastosowania silników pneumatycznych do napędu pojazdów [11].

Typowe rozwiązania konstrukcyjne silników pneumatycznych przedstawiono na rys. 3. W silnikach tłokowych organem roboczym jest tłok (1) (rys. 3 a). Zasada działania jest oparta na rozwiązaniu zaproponowanym przez Mękałskiego. Ruch posuwisto-zwrotny tłoka jest zamieniany na ruch obrotowy przez zastosowanie wału korbowego (2). Równomierną pracę uzyskuje się przez współpracę kilku tłoków z wałem. Silniki tłokowe są stosowane w zakresie mocy od 1,5 do 20 kW, a uzyskiwane obroty wynoszą do 5000 obr/min, przy ciśnieniu zasilania do 6 barów.

Rysunek 3 b przedstawia silnik zębatkowy. W korpusie (1) znajdują się dwa koła zębate (2) i (3), z których koło (2) jest sprzęgnięte z napędzanym wałkiem (4), a koło (3) jest kołem współpracującym. Kierunek obrotów wałka (4) zależy od kierunku doprowadzenia sprężonego powietrza. W silnikach zębatych moment obrotowy powstaje w wyniku siły działającej na powierzchnię zębów dwóch współpracujących ze sobą kół zębatych. Wartość siły, jaka działa na koła zębate, zależy od ciśnienia gazu dolotowego, a jego obroty od strumienia gazu. Silniki te znajdują zastosowanie w napędach o dużych mocach, powyżej 40 kW.

Typowy silnik łopatkowy (rys. 3 c) zbudowany jest z cylindra (1) oraz wirnika (2) z łopatkami (3) umieszczonymi w szczelinach wzdłużnych. Czoła wirnika uszczelnione są za pomocą pokryw (4) i (5), w których ułożony jest wirnik. Wirnik (2) zamontowany jest mimośrodowo w stosunku do osi cylindra (1), co powoduje, że pomiędzy ścianką wewnętrzną cylindra, łopatkami oraz wirnikiem powstają komory robocze o zmieniającej się objętości. Sprężone powietrze wprowadzane jest pomiędzy dwie sąsiadujące łopatki. Wskutek różnicy ciśnień przed i za łopatką wirnik zostaje wprowadzony w ruch obrotowy. Powietrze, które znajduje się pomiędzy łopatkami, ulega rozprężaniu na skutek zwiększania się objętości przestrzeni między łopatkami. Mimośrodowość i średnicę wirnika

dobiera się w taki sposób, aby siła działająca na łopatki była stała w całym cyklu pracy silnika. Jest to możliwe, gdyż wraz z obniżaniem się ciśnienia wzrasta powierzchnia łopatek. Podczas pracy łopatki dociskane są do powierzchni wewnętrznej cylindra siłą odśrodkową, zapewniając w ten sposób efektywne uszczelnienie. Silniki tego typu pracują przy obrotach od kilku tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy obrotów na minutę. Liczba łopatek w silniku zawiera się od 3 do 10. Mniejsza liczba łopatek zwiększa sprawność silnika, ale utrudnia jego rozruch.

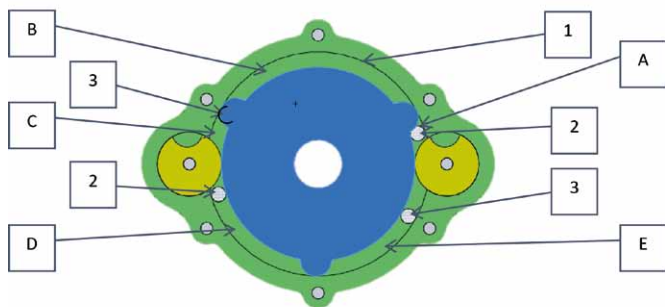
W silnikach turbinowych (rys. 3 d) w korpusie umieszczone jest koło łopatkowe (1) napędzające wałek (2). Zasilanie silnika odbywa się przez otwór wlotowy (3), a rozprężenie gazu występuje na wylocie (4). Ruch obrotowy wałka (2) wymusza strumień gazu przepływającego przez silnik. Silniki tego typu są stosowane przy małych obciążeniach, mogą natomiast osiągać bardzo duże obroty (nawet do 500 000 obr/min), na przykład w napędach wiertarek dentystycznych.

W pracy zaproponowano rozwiązanie oparte na zasadzie wirującego tłoka, podobnie jak to ma miejsce w silnikach przepływowych, jednak sposób uszczelnienia wirnika z powierzchnią cylindra stanowi nowatorskie rozwiązanie według patentu nr PL 214371 [6]. Uszczelnianie jest oparte na rozwiązaniu podobnym do uszczelnienia stosowanego w silnikach łopatkowych, jednak do doszczelnienia układu nie wykorzystuje się siły odśrodkowej.

Budowa SILNIKA pneumatycznego nowej konstrukcji

Budowę silnika przedstawiono na rysunku 4. Składa się on z cylindra (1), w którym znajdują się dwa otwory wlotu sprężonego powietrza (2) i dwa otwory wylotowe (3). Elementem roboczym jest obrotowy tłok (4) w kształcie walca z trzema wypustami usytuowanymi symetrycznie na jego obwodzie. Dodatkowo w obudowie umieszczone są dwa obracające się uszczelniacze cylindrowe (5), o kształcie dopasowanym do wypustów tłoka. Uszczelniacze te są zaosioowane w obudowie, a ich obroty są zsynchronizowane z obrotami tłoka poprzez zewnętrzne koła zębate tak, że prędkość obrotowa tłoka do prędkości obrotowej uszczelniaczy wynosi 1/3.

W czasie pracy można wyodrębnić pięć dynamicznie zmieniających się komór silnika, jakie tworzą obudowa, tłok wraz ze swoimi wypustami oraz uszczelniacze. Przy dostarczaniu do komory A sprężonego powietrza, powstaje siła powodująca



Rys. 4. Budowa silnika pneumatycznego

obrót tłoka. W komorze B panuje jedynie podwyższone ciśnienie, a wszystkie siły z tym związane się równoważą. W komorze C następuje dekompresja poprzez otwór wylotowy (3). Analogiczne zjawiska mają miejsce w komorach D i E. Praca, jaka jest wykonywana przez układ, odbywa się jednocześnie w dwóch komorach A i D.

W silniku tego typu na wartość momentu obrotowego głównie ma wpływ wartość ciśnienia roboczego. Prędkość obrotowa zależy głównie od strumienia powietrza, jakie przepływa przez silnik. Na podstawie znajomości tych parametrów oblicza się moc silnika PM [W] według zależności:

$$P_M = \frac{2\pi}{60} nM \quad (1)$$

gdzie:

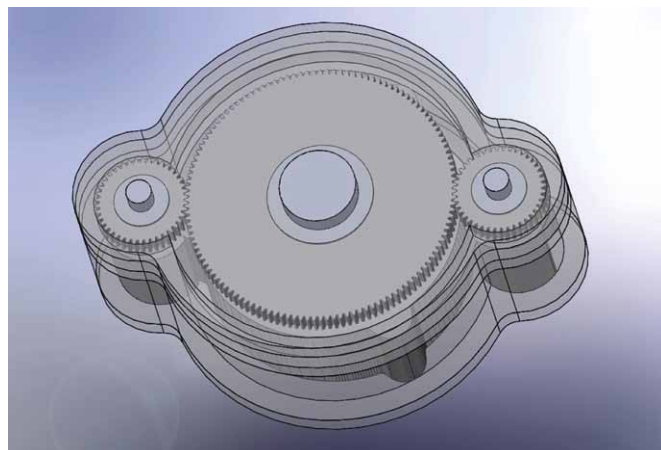
n – prędkość obrotowa wału silnika [obr/min];

M – moment na wale silnika [Nm].

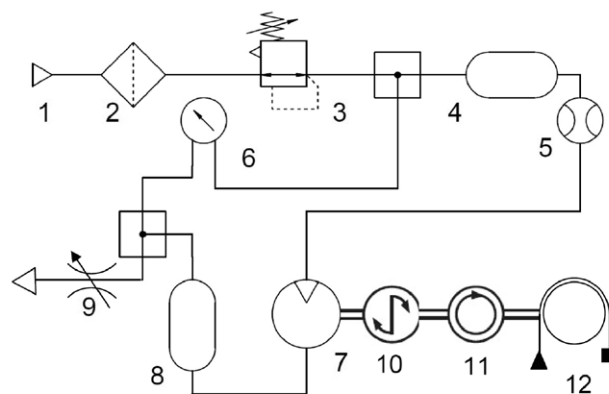
Stanowisko badawcze

W celu sprawdzenia poprawności założeń konstrukcyjnych zbudowano silnik pneumatyczny zgodnie z opisaną konstrukcją (rys. 5). Silnik posiada wymiary zewnętrzne 250 × 186 × 70 mm. Wszystkie elementy silnika wykonano ze stali stopowej EN AW-7075. Wewnętrzna średnica cylindra wynosi 146 mm. Tłok obrotowy posiada średnicę bez wypustów 126 mm, a jego szerokość wynosi 50 mm. Synchronizację obrotów tłoka z uszczelniaczami zapewnia przekładnia zębata składająca się z trzech kół zębatach.

Założono, że maksymalne ciśnienie robocze nie przekroczy 6 barów. W celu określenia sprawności silnika zbudowano stanowisko laboratoryjne (rys. 6). Stanowisko jest zasilane z sieci pneumatycznej (1) o stałym ciśnieniu roboczym 6 barów. Powietrze z sieci jest kierowane do filtra cząstek stałych (2) i smarownicy sprężonego powietrza 2 a. Ciśnienie robocze na badanym silniku pneumatycznym jest nastawiane za pomocą reduktora ciśnienia (3). W celu uniknięcia wpływu pulsacji ciśnienia zasilania silnika na wyniki pomiaru zastosowano zbiornik wyrównawczy (4) o pojemności 70 cm³. Powietrze ze zbiornika wyrównawczego podawane jest na prototypowy silnik pneumatyczny (7). Strumień powietrza mierzony jest przepływomierzem Delta HD2103.2. (5). Wylot powietrza kierowany jest do zbiornika wyrównawczego o pojemności 2 dm³ z zaworem dławiącym umożliwiającym regulowanie strumienia



Rys. 5. Prototyp silnika pneumatycznego



Rys. 6. Stanowisko badawcze silnika

powietrza przepływającego przez silnik. Za zbiornikiem wyrównawczym znajduje się kanał mierniczy połączony z czujnikiem różnicy ciśnień Thermokon DPL6/V (6). Obciążenie na wale silnika jest regulowane za pomocą hamulca taśmowego (12), zamontowanego na wspólnym wale z silnikiem momentomierzem Megatron DFM2X (10) i miernikiem obrotów Wobit MOK40-200/1224/BZ/K (11). Wyniki pomiaru są rejestrowane na komputerze wyposażonym w kartę pomiarową LabJack U12.

Wyniki badania momentu obrotowego

Przeprowadzono badania prototypowego silnika pneumatycznego. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Δp	Q	M	n	η
[Pa]	[m ³ /min]	[Nm]	[obr/min]	[%]
200 000	1,85 × 10 ⁻³	1,57	140	6,2
200 000	1,44 × 10 ⁻³	1,88	214	14,6
200 000	1,03 × 10 ⁻³	2,1	216	23,1
160 000	1,75 × 10 ⁻³	2,44	133	12,1

Sprawność silnika obliczono na podstawie stosunku mocy ciśnienia do mocy na wale silnika.

$$\eta = \frac{p_M}{p} 100\% = \frac{2\pi nM}{\Delta p \cdot Q} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

Δp – spadek ciśnienia na silniku [Pa];

Q – strumień powietrza [m^3/s].

Jak wynika z przeprowadzonych badań, sprawność silnika rośnie wraz ze zwiększaniem obciążenia. Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że na całkowitą moc pobieraną przez silnik składa się moc na wale oraz moc strat. Po uwzględnieniu tego równanie 2 przyjmuje postać:

$$\eta = \frac{p_M}{p_M + p_S} 100\% = \frac{1}{1 + \frac{p_S}{p_M}} 100\% \quad (3)$$

Stąd, gdy nie ma obciążenia na wale silnika, moment jest równy zero i tym samym moc na wale równa się zero. W takim przypadku wyrażenie 3 zmierza do zera. Cała moc pobierana przez układ jest równa mocy strat. Na moc strat mają wpływ głównie opory tarcia oraz nieszczelności. Wraz ze wzrostem momentu obrotowego rośnie sprawność silnika. Nie należy jednak sądzić, że sprawność będzie rosła w nieskończoność. Spowodowane jest to tym, że wraz ze wzrostem momentu konieczne jest zwiększanie ciśnienia roboczego silnika. Wraz ze wzrostem ciśnienia zwiększa się ilość powietrza, jaka przedostaje się przez nieszczelności, tym samym zwiększając moc strat. Należy zatem domniemać, że istnieje pewna graniczna wartość sprawności silnika. Określenie tej liczby oraz wyznaczenie charakterystyk sprawności silnika będzie tematem kolejnych prac badawczych.

Podsumowanie

Badania empiryczne potwierdziły wcześniej zadaną hipotezę o niskiej mocy emitowanej przez silnik w badanym zakresie ciśnień. Należy podkreślić, że przeprowadzone testy mają charakter orientacyjny. Potwierdzają one, że kinematycznie model jest sprawny i działający, a biorąc pod uwagę stosunkowo niskie nakłady finansowe tego przedsięwzięcia, można to uznać za swoisty sukces. Badania wykazały zależność sprawności od ciśnienia, której dokładne wyznaczenie będzie tematem dalszych badań.

Przypuszczalnie największe straty mocy występują na uszczelnieniu tłoka i dennic zamykających komory silnika. Z tego powodu dalsze badania będą dotyczyły szczególnie tego zagadnienia. Prognozuje się, że sposobem na poprawę sprawności jest zwiększenie proporcji szerokości tłoka do jego średnicy oraz opracowanie dynamicznego docisku pokryw do zespołu tłok – uszczelniacze. Wymaga to jednak przeprowadzenia badań w zakresie zastosowania różnych rodzajów uszczelnień tłok – obudowa zarówno pod względem doboru materiałów, jak i kształtu elementów. Innym kierunkiem przyszłych ba-

dań będzie wykorzystanie oleju hydraulicznego jako medium roboczego.

Literatura

- [1] SCHLAGER N., WEISBLATT J.: *Alternative Energy, three volumes: Volume I*.
- [2] WOŁOSZCZUK D.: *Historia komunikacji miejskiej w Szczecinie*. 8 stycznia 2009.
- [3] HUSAIN I.: *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. 2003
- [4] <http://www.engineair.com.au/>
- [5] www.guynegre.net
- [6] <http://www.uprp.pl/polski>
- [7] KURMAZ L.: *Podstawy konstrukcji maszyn. Projektowanie*. Warszawa 1999.
- [8] FELD M.: *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
- [9] Opis patentowy WO 2011/115874 A1, International Application Published Under The Patent Cooperation Treaty, 22 september 2011.
- [10] NÈGRE G.: Opis patentowy US 6,311,486 B1, 6 november 2001.
- [11] SZPICA D., SZOKA W.: *Modelowanie procesu wymiany powietrza w silniku spalinowym pracującym jako silnik pneumatyczny*, „Pneumatyka” 2(79)/2011.
- [12] LAL A.: *Design and Dynamic Analysis of Single Stroke Compressed Air Engine*. International Journal of Renewable Energy Reserch, Vol. 3, No. 2, 2013.
- [13] HUANG C., HU C., YU C., SUNG C.: *Experimental Investigation on the Performance of a Compressed-Air Driven Piston Engine*. Energies 6/2013, pp 1731–1745, DOI: 10.3390/en6031731.
- [14] SZOKA W., SZPICA D.: *Adaption of Classic Combustion Engines to Compressed Air Supply*. Acta Mechanica et Automatica, Vol. 6, No. 1, 2012.
- [15] NÈGRE G.: Opis patentowy, PL 183942 B1, 14 kwiecień 1997.
- [16] http://www.final-yearproject.com/2012/12/mechanical-project-compressed-air-engine.html#.VvkW_e9WEUE
- [17] <http://contest.techbriefs.com/2013/entries/sustainable-technologies/3097>
- [18] SZENAJCH W.: *Napęd i sterowanie pneumatyczne*, Wydawnictwo WNT, Październik 2013.