

# Propozycja silnika pneumatycznego wysoko momentowego do napędu urządzeń rozładunkowo załadunkowych pojazdów

Karol Tyszkowski

Przedstawiono koncepcję zastosowania silnika pneumatycznego wysoko momentowego do napędu urządzeń załadunkowo rozładunkowych, które znajdują się na wyposażeniu pojazdów transportowych. Proponowany silnik pneumatyczny jest silnikiem pracującym w cyklu odwrotnym do cyklu sprężarki zębatej jest zasilany powietrzem bezpośrednio z układu hamulcowego. Przeprowadzono dyskusję na temat zalet takiego rozwiązania oraz próbę oszacowania parametrów pracy silnika.

**Słowa kluczowe:** silnik pneumatyczny, sprężarka zębata, urządzenia załadunkowe, pojazdy transportowe

## Wstęp

Pojazdy ciężarowe często wyposażone są w systemy załadunkowo-rozładunkowe np: zasilane hydraulicznie platformy przeładunkowe z krawędzią wysuwną lub wychylną. Takie systemy do poprawnego działania wymagają zasilenia energią elektryczną urządzenia pompującego substancję roboczą do siłowników (np.pompy zębatej). Miejsce zajmowane przez pompę hydrauliczną wraz z silnikiem elektrycznym może zostać zwolnione pod warunkiem zmiany rodzaju napędu urządzenia załadunkowego. Ruch platformy jaki zapewniają linowe siłowniki hydrauliczne może zostać uzyskany za pomocą obrotowego silnika pneumatycznego wraz z użyciem lin, łańcuchów, bądź też przekładni liniowych. Ponadto takie rozwiązanie pozwala na wykorzystanie energii sprężonego powietrza zgromadzonego w zbiorniku akumulacyjnym. Zaproponowana koncepcja zakłada napęd urządzeń załadunkowo-rozładunkowych za pomocą wysoko-momentowego silnika pneumatycznego pracującego w cyklu odwrotnym do cyklu sprężarki zębatej zasilanego powietrzem bezpośrednio z układu hamulcowego pojazdu ciężarowego. Odwrócenie cyklu pracy sprężarki zębatej polega na podłączeniu okna tłoczego do zbiornika z powietrzem o ciśnieniu wyższym od ciśnienia atmosferycznego. Po przeprowadzeniu takiego zabiegu pierwotne okno ssawne sprężarki staje się wylotem powietrza a urządzenie pracuje wtedy jako silnik pneumatyczny.

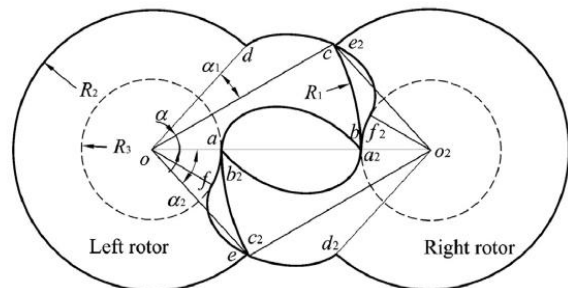
## 1. Budowa i zasada działania silnika pneumatycznego

Sprężarka zębata jest obrotową maszyną umożliwiającą sprężanie przepływającego przez nią płynu [1]. Składa się ona z obudowy w kształcie dwóch złączonych ze sobą cylindrów w której znajdują się wirniki o takim samym zarysie obracające się w przeciwnych kierunkach

sprężone ze sobą za pomocą przekładni zębatej. Zarys wirnika sprężarki zębatej o jednym zębie składa się z sześciu krzywych widocznych na rys. 1:

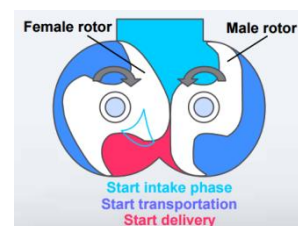
- dwie epitrochoidy - łuki ab i ef
- epicykloidy - łuk cd
- trzy wycinki koła łuki bc, de i fa

Równania matematyczne opisujące zostały przedstawione w pracy [1]. Matematyczny model zakłada że wierzchołek zęba (punkt b) w czasie obrotu zębów wędruje po krzywej  $a_2b_2$ .

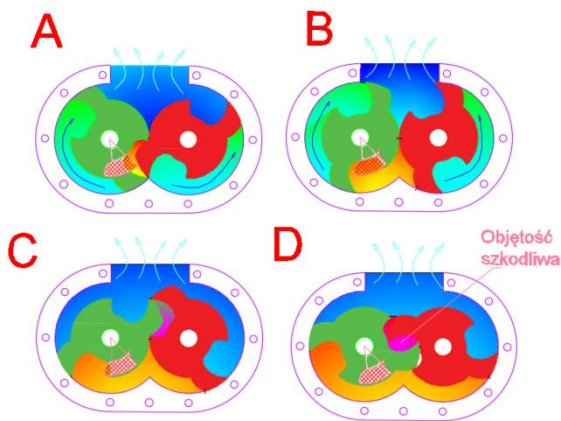


Rys. 1. Geometria zarysów sprzężonych ze sobą wirników sprężarki zębatej [1]

Skomplikowana geometria umożliwia bezkolizyjne obroty wirników z tą samą prędkością. Istnieją także modyfikacje zarysu wirników w celu np. zmniejszenia objętości szkodliwej sprężarek [2]. Obecnie produkowane sprężarki zębate firmy Atlas Copco posiadają wirniki o dwóch zębach przedstawione na rys. 2, różniące się zarysami gdzie odpowiednio profil lewego wirnika jest przystawony do sterowania oknem wlotowym.



Rys. 2. Sprężarka z wirnikami o dwóch zębach i różnych zarysach [3]



**Rys. 3.** Cykl pracy silnika pneumatycznego pracującego w cyklu odwrotnym do cyklu sprężarki zębatej

Modyfikacja budowy polegająca na podłączeniu okna tłocznego do zbiornika ze sprężonym powietrzem jest właściwa również dla sprężarki zębatej z wirnikami o dwóch zębach pozwala zmienić ją w silnik pneumatyczny realizujący odwrotny do niej cykl pracy. Obracające się wirniki zależnie od zajmowanej pozycji dzielą komorę roboczą silnika na dwie lub cztery sekcje, w których odbywa się jednoczesna realizacja poszczególnych faz cyklu. Cykl pracy omawianego silnika jest następujący:

- Początek wlotu sprężonego powietrza przez okno wlotowe rys. 3A. Faza rozpoczyna się z chwilą odsłonięcia przez lewy wirnik okna wlotowego. W sekcjach bocznych odbywa się transport rozprężonego wcześniej w dolnej komorze powietrza. W sekcji górnej powietrze opuszcza przestrzeń górnej sekcji komory roboczej.
- Przysłonięcie częściowe okna wlotowego przez profil lewego wirnika rys. 3B. Dawka sprężonego powietrza zaczyna się rozprężać w dolnej sekcji komory roboczej. Górna sekcja w tym czasie zmniejsza swoją objętość.
- Górne obracające się zęby wirnika zaczynają się zazębiać rys. 3C. Sekcje boczne zostają złączone z sekcją górną. Transportowane w nich powietrze zostaje usunięte do atmosfery. Podczas tej fazy komora robocza silnika jest podzielona tylko na dwie sekcje
- Utworzenie objętości szkodliwej przez zęby wirnika które po przejściu przez to położenie rozdzielają dolną sekcję na dwie boczne sekcje transportowe rys. 3D. Następuje wtedy otwarcie okna wlotowego i początek nowego cyklu.

## 2. Symulacja komputerowa cyklu pracy silnika pneumatycznego

Projektowanie przedstawionej koncepcji silnika pneumatycznego wymaga uwzględnienia warunków jakie panują w komorze silnika w czasie jego pracy. Dlatego pierwszym krokiem który podjęto przy projektowaniu silnika było wykonanie symulacji komputerowej w programie ANSYS która pozwoliła na:

- określenie ciśnień i temperatur jakie panują w komorze roboczej silnika przy danym ciśnieniu zasilania
- przyjęciu odpowiednich rozmiarów komory roboczej (aby zmniejszyć zużycie powietrza i wykluczyć zaprojektowanie silnika o zbyt wielkiej mocy do napędu platformy transportowej)
- dobór luzu pomiędzy wirnikami a obudową
- oszacowanie obciążeń przenoszonych przez silnik, prędkości obrotowej silnika i mocy silnika.

Próbę oszacowania warunków jakie panują w komorze roboczej silnika pneumatycznego podjęto w [4]. Jednak aby ograniczyć zużycie powietrza przez silnik zdecydowano się wykonać symulację silnika o mniejszych wymiarach.

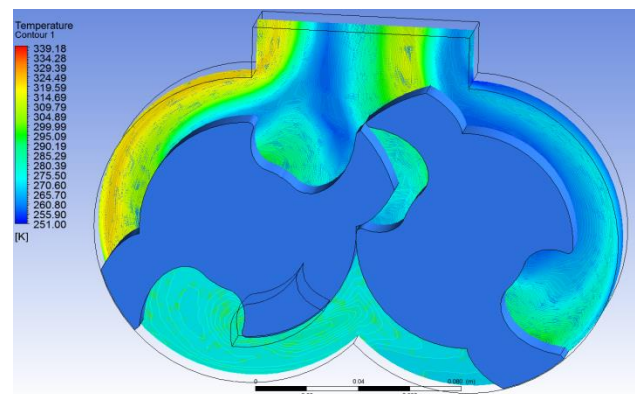
Podstawowe wymiary silnika to:

- Objętość komory roboczej -  $V_k=0,0005$  [m<sup>3</sup>] (bez objętości wirników)
- Średnica zewnętrzna zęba -  $D_z=120$  [mm]
- Średnica toczna -  $D_{rdz}=85$  [mm]
- Luz między obudową a zębem wirnika  $S_o=0,05$  [mm]
- Luz między średnicami tocznymi wirników  $S_{rdz}=0,05$  [mm]
- Szerokość wirników  $B_w=30$  [mm]

Wprowadzone parametry wejściowe:

- Temperatura na wlocie -  $T_{wlot}=284$  [K]
- Temperatura początkowa powietrza wewnątrz komory  $T_{kom}=284$  [K]
- Ciśnienie powietrza na wlocie -  $P_{wlot}=0,5$  [MPa] (ciśnienie powietrza w układzie hamulcowym pojazdu ciężarowego [5])
- Ciśnienie powietrza na wylocie -  $P_{wylot}=1$  [0,1MPa]
- Prędkość obrotowa wirników -  $n=1000$  [obr/min]
- Czas symulacji -  $t_{sym}=0,06$  [s]
- Krok czasowy -  $t_{krok}=2 \cdot 10^{-5}$

Jako rezultat symulacji otrzymano pole temperatur widoczne na rys. 4 oraz pole ciśnień komory roboczej w każdym kroku czasowym symulacji.



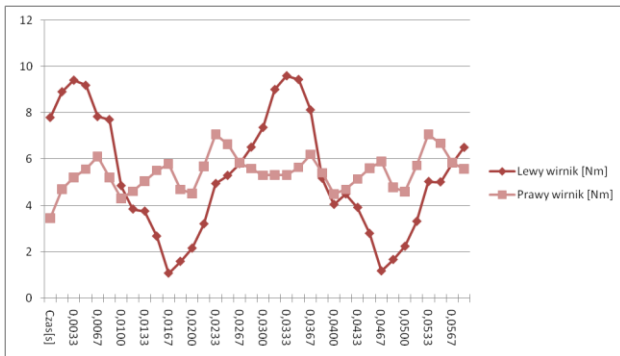
**Rys. 4.** Pole temperatur w przekroju komory roboczej silnika pneumatycznego

Strumień powietrza o temperaturze 284 K wlatuje do komory roboczej aż do całkowitego zamknięcia okna wlotowego. Strumień powietrza rozpręża się i tym samym temperatura powietrza ulega gwałtownemu ochłodzeniu do 265 K. Znajomość temperatur w cyklu silnika pneumatycznego jest ważna przy doborze luzów między elementami silnika.

Głównym celem symulacji było oszacowanie obciążeń jakie jest w stanie przenieść silnik przy zadanej prędkości obrotowej oraz zadanym ciśnieniu powietrza zasilającego. Średni moment możliwy do przeniesienia w czasie jednego obrotu wynosi:

- 5,30 [Nm] dla lewego wirnika
- 5,41 [Nm] dla prawego wirnika]
- 10,71 [Nm] dla obu wirników

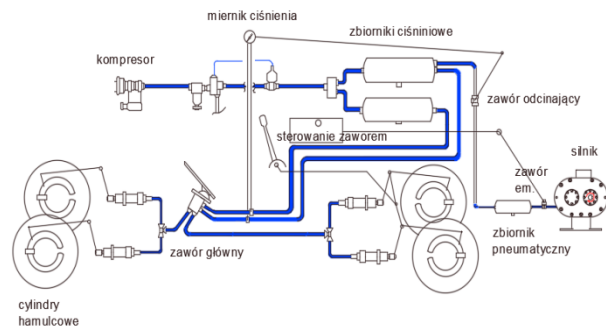
Szczegółowy teoretyczny rozkład momentów które przenosi silnik w czasie jednego obrotu znajduje się na rys. 5



Rys. 5. Rozkład momentów przenoszonych przez silnik zasilany powietrzem o ciśnieniu 0,5 MPa

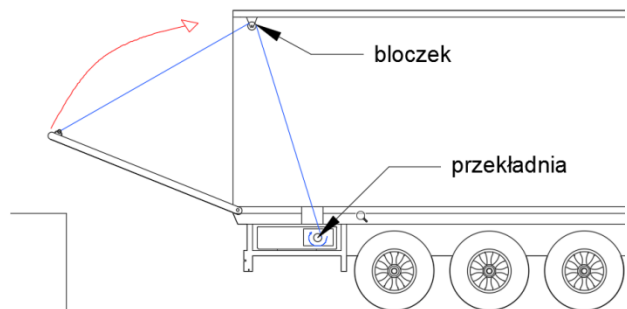
### 3. Zastosowanie silnika do zasilania urządzeń załadunkowo- rozładunkowych oraz sposób podłączenia do układu hamulcowego

Na podstawie badania symulacyjnego obliczono wartość mocy silnika pneumatycznego wynoszącą  $P_{sil} = 1 \text{ kW}$ . Moc silników elektrycznych napędzających pompy układów hydraulicznych platform załadunkowo rozładunkowych waha się w przedziale  $1 \div 1,5 \text{ kW}$  [6]. Aby ograniczyć straty silnika pneumatycznego wynikające z nieszczelności między wirnikami a obudową oraz zwiększyć obciążenie możliwe do przeniesienia przez pneumatyczny zespół napędowy należy połączyć silnik z przekładnią która umożliwi wysokie obroty silnika oraz zapewni odpowiednią prędkość wału do napędu platform rozładunkowo załadunkowych (około 10 obr/min). Na rys. 6 znajduje się przykładowe połączenie silnika pneumatycznego z dwuobwodowym układem hamulcowym pojazdu ciężarowego, w którym mniejszy zbiornik pneumatyczny połączony jest ze zbiornikiem wypełnionym sprężonym powietrzem. Instalacja zasilania silnika pneumatycznego powinna zostać wyposażona w zawór odcinający sprzężony z miernikiem ciśnienia w zbiornikach zasilających układ hamulcowy aby uniemożliwić zasilanie układu hamulcowego powietrzem o zbyt niskim ciśnieniu. Sterowanie silnikiem pneumatycznym odbywa się w tym układzie za pomocą zaworu elektromagnetycznego otwieranego za pomocą interfejsu w kabinie kierowcy. Zamknięcie zaworu następuje automatycznie za pośrednictwem wyłącznika krańcowego.



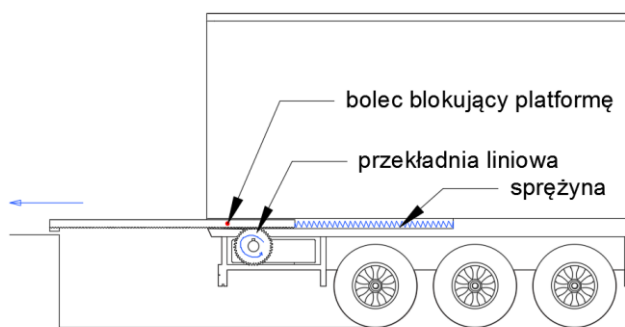
Rys. 6. Połączenie silnika pneumatycznego z dwuobwodowym układem hamulcowym pojazdu ciężarowego

Pierwsza zaproponowana koncepcja napędu zakłada grawitacyjne opadanie mostku rozładunkowego oraz jego podnoszenie za pośrednictwem liny nawijanej na wał wyjściowy zespołu pneumatycznego rys. 7. Podniesieniu platformy towarzyszy uderzenie krawędzi platformy o wyłącznik krańcowy powodujący odcięcie silnika od zasilania powietrzem. Konstrukcja napędu powinien być uzupełniona o ręczny napęd korbowy platformy transportowej, którego operator mógłby użyć w razie awarii silnika pneumatycznego



Rys. 7. Schemat ideowy napędu platformy wychylnej za pomocą silnika pneumatycznego

Druga koncepcja zakłada napęd platformy wysuwnej za pomocą przekładni liniowej. Jeden z końców platformy połączony jest z podwoziem pojazdu ciężarowego za pomocą sprężyny. Taka konstrukcja napędu wymaga aby silnik pneumatyczny dodatkowo pokonywał opory sprężyny. Po osiągnięciu maksymalnego wychylenia pozycja platformy zostaje zablokowana przez bolce sterowane elektromagnetycznie. Zwolnienie blokady powoduje powrót platformy do pozycji wyjściowej, może ono następować na życzenie kierowcy lub też np. po spełnieniu określonego warunku np: rozpędzenie pojazdu do określonej prędkości. Takie rozwiązanie może zapobiec sytuacji w której po rozładunku pojazd odjeżdża z wysuniętą platformą. Schemat ideowy przedstawionego układu napędowego widoczny jest na rys. 8.



**Rys. 8.** Schemat ideowy napędu platformy wysuwnej za pomocą silnika pneumatycznego

## Wnioski

W artykule przedstawiono koncepcje zastosowania silnika pneumatycznego pracującego w cyklu odwrotnym do cyklu sprężarki zębatej, wykorzystanego do napędu platform rozładunkowo załadunkowych. Badania symulacyjne jasno wskazują że zaprezentowany silnik pneumatyczny zasilany powietrzem z układu hamulcowego będzie dysponował odpowiednią mocą. Kombinacja silnika z przekładnią zębatą jest w stanie zapewnić odpowiedni moment obrotowy oraz właściwą prędkość na wale wyjściowym zespołu pneumatycznego do napędu platform załadunkowo- rozładunkowych. Właściwe zastosowanie przedstawionych koncepcji w praktyce pozwoli na zastąpienie hydraulicznych napędów platform z użyciem istniejących instalacji sprężonego powietrza układu hamulcowego. Kolejnym etapem badań jest wykonanie prototypu silnika pneumatycznego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych np. badań termograficznych potwierdzających poprawność przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Należy pamiętać przy tym że zbadanie temperatur możliwe będzie tylko przy ścianie obudowy, dlatego nawet po zweryfikowaniu wyników badaniami empirycznymi, symulacja pozostanie głównym narzędziem monitoringu ciśnień i temperatur w komorze roboczej silnika.

## Bibliografia

1. Jun Wang, Yongxing Song, Xitong Jiang, Dong Cui, Yan Qu. „An analytical model of claw rotor profiles and working process model with the mixing process for claw vacuum pumps”. *Vacuum*, Vol. 114, No. 27 (2014), s. 66÷77.
2. Kneba Z. „Badanie odkształceń wirników sprężarki zębatej”, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 1994.
3. „Atlas Copco compressed air manual 8th edition”, Wilrijk: Atlas Copco Airpower NV., 2015.
4. Tyszkowski K.: „Symulacja odwróconego cyklu sprężarki zębatej”, *Mechanik.*, nr. 11 (2016), s.1674-1675
5. „Commercial Driver License Manual”, The Alabama department of Public Safety, 2015
6. <http://www.assaabloyentrance.pl/pl/aaes/assaabloyentrancepl/produkty/systemy-przeadunkowe/platformy-przeadunkowe/>

## Autorzy:

**Karol Tyszkowski** - Politechnika Gdańska, ul Narutowicza 11/12, Polska, 80-233 Gdańsk ,e-mail:tyk3@wp.pl

## The concept of high torque pneumatic engine for propelling unloading -loading equipment of heavy vehicles

*The concept of using a high torque pneumatic motor to drive the loading and unloading equipment installed on transport vehicles is presented in this paper. The proposed pneumatic motor is an engine that operates in reversed cycle to the tooth compressor supplied by the air directly from the brake system. A discussion of the advantages of such a solution is presented and an attempt of estimating engine performance parameters .*

**Key words:** pneumatic engine, tooth compressor, transport vehicles, unloading devices