

# Symulacja odwróconego cyklu pracy sprężarki zębatej

## Simulation of of an inverted duty cycle of the tooth compressor

KAROL TYSZKOWSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.486

Celem pracy jest określenie warunków występujących w komorze roboczej silnika pneumatycznego pracującego w cyklu odwrotnym do cyklu sprężarki zębatej. Wyniki uzyskano za pomocą symulacji w programie ANSYS CFX poprzez zamodelowanie przepływu powietrza przez komorę roboczą silnika.

**SŁOWA KLUCZOWE:** silnik powietrzny, sprężarka zębata, symulacja komputerowa

*The aim of the study is to determine the conditions in the working chamber of pneumatic engine, which works in inverted duty cycle of the tooth compressor. The results were obtained in ANSYS CFX by modeling the air flow through the working chamber of the engine.*

**KEYWORDS:** air engine, tooth compressor, computer simulation

Sprężarka zębata składa się z dwóch wirników zamkniętych w cylindrycznej obudowie, obracających się w przeciwnych kierunkach. Synchroniczny i bezstykowy ruch wirników zapewnia przekładnia zębata o przełożeniu 1:1. Dokładna zasada działania sprężarek z wirnikami o dwóch zębach omówiona została w [1]. Cykl pracy sprężarek zębatych obejmuje: wlot powietrza do komory silnika, sprężanie oraz wylot. Podczas pierwszej fazy cyklu powietrze jest zasysane do komory silnika tak długo, aż obydwa wirniki zamkną okno ssawne. Wraz z obrotem wirników maleje objętość komory roboczej, w której powietrze zostaje sprężane. W czasie sprężania okno wylotu zostaje przysłonięte przez jeden z zębów wirnika. W tym samym czasie przez wlot w przeciwnej sekcji komory sprężania zasysana jest kolejna porcja powietrza. Wylot powietrza odbywa się, kiedy jeden z wirników odblokuje okno wylotowe, a sprężone powietrze zostaje wyparte z komory przez wirujące zęby wirnika. Cykl pracy takiej sprężarki można odwrócić poprzez wprowadzenie sprężonego powietrza w miejscu okna tłocznego. Okno ssawne sprężarki stanie się wtedy wylotem powietrza. Modyfikacja budowy sprężarki pozwoli jej na pracę jako silnik pneumatyczny. Praca takiego silnika nie wymaga oleju ani smarowania, a substancja robocza nie ulega spalaniu. Budowa silnika nie wymaga użycia zaworów, a jedynie podłączenia okna tłocznego do zbiornika z powietrzem o wyższym ciśnieniu niż atmosferyczne. Silnik jest alternatywą dla tłokowych silników pneumatycznych, takich jak np: silnik Mękarskiego [2]. Przeprowadzona symulacja przepływu strumienia powietrza przez komorę roboczą dostarcza informacji o temperaturach i ciśnieniach występujących w silniku podczas jego cyklu pracy.

### Synchronizacja wirników w symulacji komputerowej

Modelowanie ruchomych części maszyn przepływowych, takich jak zawory oraz wirniki, zawsze sprawia wiele

trudności osobom zajmującym się symulacjami komputerowymi. Niezwykle ciężko jest ustalić zasadę otrzymywania parametrów termodynamicznych w procesie mieszania się gazu w sposób analityczny lub doświadczalny z powodu zmiennej objętości komór roboczych oraz przecieków gazu między obudową a wirnikami [2]. Nowoczesne programy komputerowe do obliczeń numerycznych pozwalają na modelowanie ciała sztywnego w płynie za pomocą warunków brzegowych ciał stałych typu *immersed solid*. Technika ta pozwala na rozwiązywanie równań różniczkowych w złożonych konfiguracjach geometrycznych na prostych siatkach poprzez wprowadzenie warunków wymuszających (np. ciśnień) na powierzchniach odpowiadających fizycznej lokalizacji złożonych granic [3].

Głównym problemem w przeprowadzonej symulacji było zsynchronizowanie ruchu wirników. W układzie, w którym wirniki pracują jako silnik zasilany sprężonym powietrzem o ciśnieniu 0,15 MPa, zastosowano następujące podejście. Lewy wirnik sterujący wlotem powietrza zamodelowano jako bezwładną bryłę sztywną, której ruch zależny jest od przepływającego przez komorę roboczą strumienia powietrza. Prawy wirnik potraktowano jako bryłę sztywną obracającą się wokół osi ze zdefiniowaną stałą prędkością obrotową. Jej wartość ustalono na poziomie 2140 obr/min na podstawie wstępnej symulacji ruchu wirników, z której odczytano czas, w którym lewy wirnik dokonuje pełnego obrotu. Masowy moment bezwładności względem osi obrotu wirnika wynosi: 0,075 kg/m<sup>2</sup>.

### Struktura siatki modelu

Aby zasymulować dławienie powietrza pomiędzy obudową a łopatką wirnika, przyjęto wymiar szczeliny 0,5 mm. Przy ścianie obudowy siatka modelu została zagęszczona warstwami siatki pryzmatycznej. Na potrzeby symulacji wydzielono kolejny obszar siatki pomiędzy rdzeniami wirników zbudowany z zagęszczonej siatki w stosunku do siatki pokrywającej resztę obszaru komory roboczej. Miało to na celu skrócenia czasu obliczeń wykonywanych przez solver oraz zasymulowanie przepływu powietrza pomiędzy rdzeniami wirników. Struktura modelu numerycznego jest przedstawiona na rys. 1. Wymiary silnika (tablica) i geometrię przyjęto na podstawie prototypu sprężarki opisanej w pracy [4]. Temperaturę powietrza na wlocie oraz początkową temperaturę wnętrza komory roboczej ustalono na poziomie 293 K. Rozprężające się w komorze silnika powietrze zamodelowano za pomocą modelu fizycznego gazu doskonałego, którego gęstość w temperaturze odniesienia 20°C wynosi: 1,129 kg/m<sup>3</sup>.

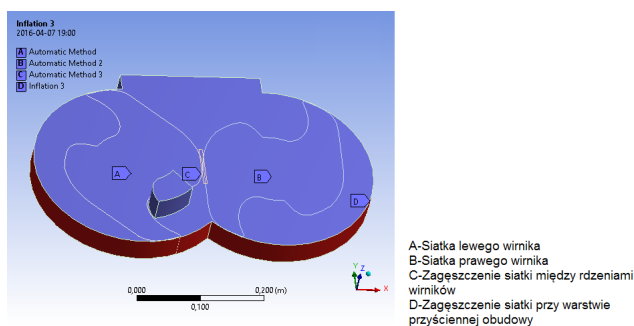
TABLICA. Podstawowe wymiary silnika

Maksymalny promień wirnika $R$ , mm°	158
Promień kół tocznych wirników $r_p$ , mm	112
Luz między rdzeniami wirników $s_1$ , mm	0,5
Luz między zębem wirnika a obudową $s_2$ mm	0,5

\* Mgr inż. Karol Tyszkowski (tyk3@wp.pl) – Politechnika Gdańska

## Wyniki

Rezultatem wykonanej symulacji jest pole ciśnień (rys. 3) i temperatur (rys. 2) w płaszczyźnie przekroju silnika dla całego cyklu pracy. Wlot powietrza do komory roboczej silnika odbywa się tuż po odstąpieniu okna ssawnego przez lewy wirnik. Na początku cyklu temperatura gwałtownie wpływającego strumienia powietrza wzrasta do 308 K. Przepływ powietrza przez okno ssawne jest zatrzymywany na powierzchni czołowej lewego wirnika, powodując spadek temperatury powietrza wlatującego do komory roboczej o 9 K. Temperatura powietrza rozprężającego się w komorze roboczej w chwili zamknięcia wlotu nie przekracza 299 K. Strumień powietrza, rozprężając się, obniża swoją temperaturę do 291 K. Kiedy wylot zostanie odblokowany przez ząb lewego wirnika, w komorze roboczej spadnie ciśnienie, a powietrze pozostające w komorze roboczej zostanie zassane do atmosfery (rys. 4).

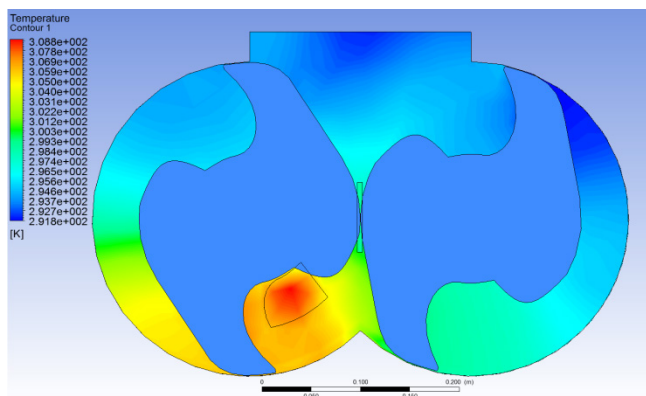


Rys. 1. Model siatki wirników

Zbliżoną wartość minimalnej temperatury w komorze roboczej można otrzymać, korzystając z równania politropy, podstawiając analitycznie wyznaczony dla silnika wykładnik:  $m = 1,8$ .

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^m \approx 285 \text{ K}$$

gdzie:  $T_2$  – temperatura powietrza w chwili, kiedy komora robocza osiągnie maksymalną objętość,  $T_1$  – temperatura na wyjściu z okna ssawnego,  $p_1$  – ciśnienie powietrza na wlocie do komory roboczej,  $p_2$  – ciśnienie rozprężonego powietrza w komorze roboczej,  $m$  – wykładnik politropy wyznaczony analitycznie.

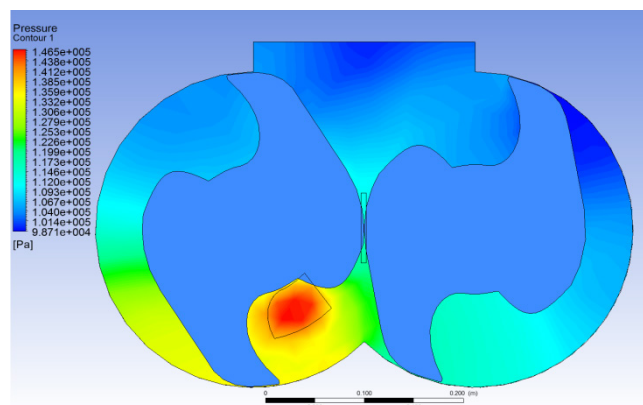


Rys. 2. Pole temperatur w przekroju silnika w momencie wlotu strumienia powietrza do komory roboczej

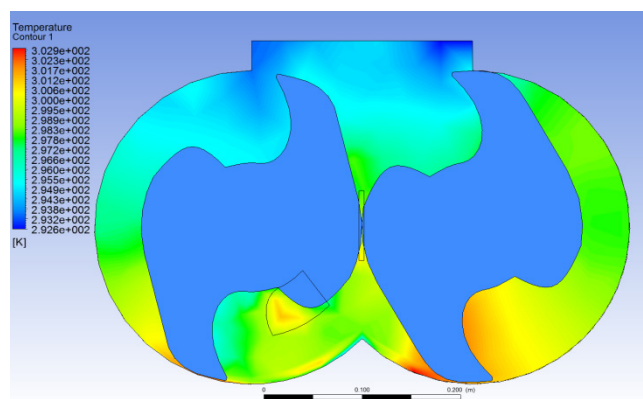
## Podsumowanie

Symulacja uwzględnia projekt silnika zasilanego sprężonym powietrzem o niewielkim ciśnieniu. Miarą funkcjonal-

ności jest różnica temperatur powietrza na wlocie i wylocie. Należy pamiętać, że strumień powietrza przepływający przez komorę roboczą silnika ulega bardzo gwałtownemu ochłodzeniu. Stąd przy projektowaniu tego typu urządzeń symulacja pozwala stwierdzić, czy będzie ono pracować bez dodatkowego ogrzewania, a jedynie przy udziale wymiany ciepła z otoczeniem. Kolejnym problemem staje się termiczna rozszerzalność elementów silnika, która również nie może zostać zaniedbana. Aby sprawdzić poprawność przeprowadzonych obliczeń numerycznych, należałoby zbudować prototyp urządzenia, a następnie zdiagnozować obiekt techniczny ze względu na wymianę ciepła za pomocą termografii [6]. Zbadanie temperatur możliwe będzie tylko przy ścianie obudowy, dlatego po zweryfikowaniu wyników badaniami empirycznymi symulacja zostanie narzędziem monitoringu ciśnień i temperatur w komorze roboczej silnika.



Rys. 3. Pole ciśnień w momencie wlotu strumienia powietrza do komory roboczej



Rys. 4. Pole temperatur w momencie odstąpienia przez lewy wirnik wylotu

## LITERATURA

1. „Atlas Copco compressed air manual 8th edition”. Wilrijk: Atlas Copco Airpower NV. 2015.
2. Rogula J., Rochala P. „Pojazdy zasilane sprężonym powietrzem. Ekologiczny transport miejski”. *Hydraulika i pneumatyka*. R. 80, nr 1 (2015): s. 8–9.
3. Iaccarino G., Verzicco R. „Immersed boundary technique for turbulent flow simulations”. *Appl Mech Rev*. Vol. 56, No. 3 (2003): pp. 331–347.
4. Kneba Z. „Badanie odkształceń wirników sprężarki zębatej”. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 1994.
5. 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): pp. 66–77.
6. Wernik J., Wołosz K., Grabowski M. „Numeryczne i termograficzne badanie przewodzenia ciepła przez ozebrowaną obudowę silnika elektrycznego”. *Mech Mies Nauk Tech*. R. 88, nr 7 (2007): s. 544–546.