

**Paweł Pistelok, Tomasz Czaja**  
**BOBRME Komel, Katowice**

## **SILNIK KLATKOWY JAKO NAPĘD WENTYLATORA W TRUDNYCH WARUNKACH PRACY**

### **CAGE MOTOR INTENDED FOR THE FAN IN DIFFICULT WORKING CONDITIONS**

**Abstract:** In the article a construction of the squirrel-cage motor was described in difficult working conditions as the drive of the fan in the system of cooling the light military vehicle. A process of selection of the appropriate working point was introduced to the work with adjustment rotation speed. Working conditions for electric motor in this kind of cooling system were discussed. Characteristic of fan and electric motor, in entire rotation speed range, were shown. Mechanical aspects of the body were discussed by reason of the requirement of small dimensions complete motor. Character of the work of electric motor was discussed. The possible heaviest working conditions of system cooling the central driving unit of the vehicle were investigated. Possibilities of the electric motor were discussed in terms of more further possible applications.

#### **1. Wstęp**

Jak powszechnie wiadomo maszynom elektrycznym stawiane są coraz większe wymagania. Ciągła poprawa parametrów przy nowo projektowanych maszynach do zastosowań specjalnych, możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej, powoduje, iż silniki indukcyjne mają coraz większy obszar zastosowań. Jednym z takich przypadków może być zastosowanie silnika indukcyjnego z wirnikiem zalewanym aluminium, do napędu wentylatora pojazdu wojskowego.

#### **2. Wymagania projektowe napędu wentylatora**

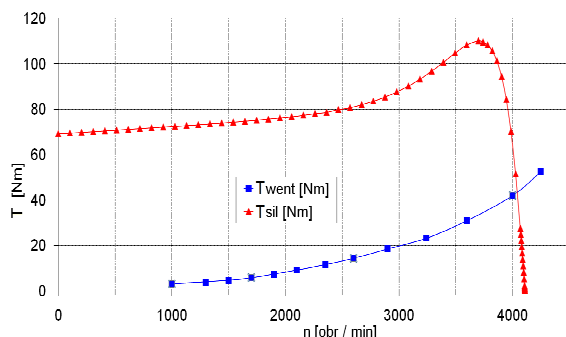
Podstawowym wymaganiem, ze względów ekonomicznych, była minimalizacja kosztów produkcji silnika, dlatego do zaprojektowania obwodu elektromagnetycznego zostały wykorzystane komponenty już produkowanych silników ogólnego zastosowania. Wiadomym jest, iż pojazdy wojskowe są projektowane z wysokimi obostrzeniami w zakresie wydawanego przez nie hałasu, niskiej emisyjności termicznej w terenie, niskich zakłóceń elektromagnetycznych oraz dużej niezawodności ruchowej. Jednym z ważniejszych układów funkcyjnych w pojeździe jest układ chłodzenia centralnej jednostki napędowej. Układ taki, omawiany w niniejszym artykule, pracuje z wykorzystaniem dwóch wentylatorów promieniowych, wirujących w przeciwnych kierunkach. Napęd wentylatorów znajduje się bezpośrednio w kanale wentylacyjnym, co powoduje iż silnik

elektryczny jest intensywnie omywany przez powietrze. Strumień zimnego powietrza najpierw przepływa przez chłodnice odbierając z nich ciepło. Tak ogrzane powietrze trafia do kanału gdzie znajduje się silnik i poprzez odpowiednie ułożenie osłon, jest wyrzucane na zewnątrz (do otoczenia). Silnik pracujący w takim reżimie pracy jest narażony na wysokie temperatury pracy. Przypadek wysokotemperaturowej pracy mógłby wystąpić, gdy jazda odbywa się po pustyni (wysoka temperatura otoczenia), na dodatek z mocą maksymalną głównej jednostki napędowej. Taki stan pracy, prowadziłby do sytuacji w której temperatura powietrza omywającego silnik, może osiągać temperaturę nawet do 80°C. Takie warunki pracy, zaprojektowany w BOBRME KOMEL silnik, jest w stanie spełnić. Równie istotnym wymaganiem było, aby silniki mogły pracować z regulowaną prędkością obrotową, co jest konieczne, gdyż nie zawsze główna jednostka napędowa będzie wysiłona na tyle, aby potrzebne było tak intensywne chłodzenie. Dodatkowo, nowo projektowany silnik był ograniczony dwoma wymiarami gabarytowymi: maksymalną średnicą zewnętrzną oraz możliwie najkrótszą długością po osiową. Dodatkowymi wymaganiami projektowymi była możliwość pracy silnika po krótkotrwałym wystawieniu go na działanie strugi wody. Uzasadnienie takiego wymogu wyjaśnia przypadek, w którym pojazd wojskowy przejeżdża przez rzekę (zanurzenie do połowy wysokości), sadzawki bądź tereny

wodne, na których woda bryzgając może dostać się do podzespołów pojazdu (bez całkowitego zalania). W konstrukcji silnika indukcyjnego rozpylona woda we wszystkich kierunkach nie powoduje zniszczeń. Natomiast w przypadku całkowitego zalania (np. pełne zanurzenie czołgu), silnik po uprzednim wysuszeniu uzwojenia stojana, może z powodzeniem dalej pracować. Fakt ten podnosi niezawodność całej jednostki terenowej. Dodatkowo, aby ograniczyć zakłócenia elektromagnetyczne, jakie występują podczas pracy przekształtnika energoelektronicznego, obydwie silniki, napędzające wentylatory, pracują zasilane z jednego falownika. Taki stan pracy nie jest możliwy w przypadku zastosowania innych silników, co zdecydowało o zaprojektowaniu i wykonaniu specjalnego silnika indukcyjnego.

### 3. Obliczenia obwodu elektromagnetycznego silnika

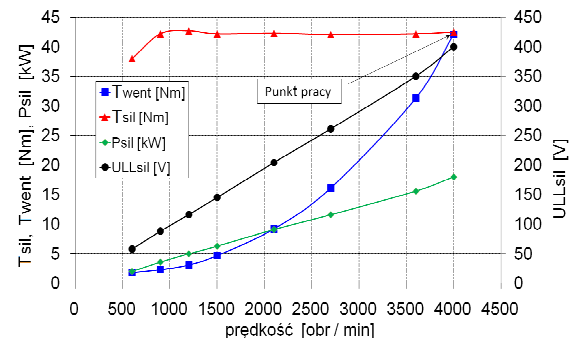
Projektując silnik indukcyjny kierowano się głównie obostrzeniami w obszarze gabarytowym. W celu uzyskania końcowych parametrów silnika zgodnych z wymaganiami klienta, ostatecznie dopuszczalną długość rdzenia dobrano na poziomie 70 mm. Z tak przedstawionych ograniczeń (gabarytów obwodu elektromagnetycznego) należało uzyskać moc 18 kW, przy prędkości 4000 obr/min. Jest to punkt pracy silnika, w którym występuje największe zapotrzebowanie na moc mogące wystąpić w układzie chłodzenia. Z uwagi na możliwość wystąpienia różnych konfiguracji układu chłodzenia pojeździe wojskowym, silnik został zaprojektowany tak, iż w znamionowym punkcie pracy posiada znaczny zapas momentu (rys.1).



Rys. 1. Przebieg momentu wytwarzanego przez silnik oraz moment obciążenia wentylatora

Ze względu na wentylatorową charakterystykę obciążenia silnika (rys.1) oraz na napięcie zasilania, które wynosi 400 V, silnik został odpowiednio zaprojektowany, aby maksymalna wartość napięcia zasilania (przy sterowaniu  $U/f=const.$ ) wystąpiła przy ok. 4000 obr/min.

Tak przyjęte założenie projektowe pozwala na sterowanie silnikiem ze stałym momentem w niższych zakresach prędkości obrotowej (mniejszych od 4000 obr/min.). Zakres prędkości w której pracuje silnik napędzający wentylator przedstawiono na rysunku 2. Oczywiście, w niższych zakresach prędkości obrotowej, dla obciążenia wentylatorowego, nie jest potrzebny tak duży moment. Natomiast przy opracowywaniu prototypu, może wystąpić sytuacja w której dotychczasowy wentylator zostanie zastąpiony innym, o bardziej stromej charakterystyce (ten sam moment przy mniejszej prędkości). W takim przypadku omawiany silnik jest w stanie spełnić nowe wymagania.



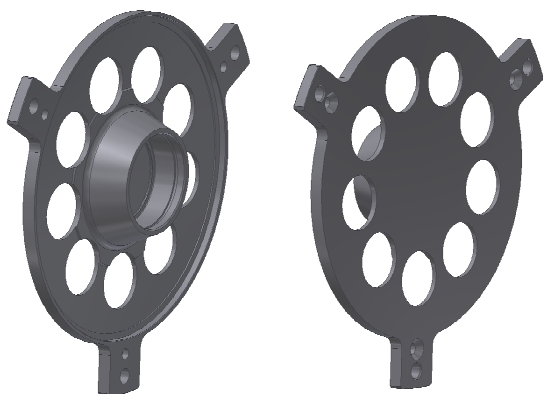
Rys. 2. Charakterystyki silnika w całym zakresie jego pracy

Z przedstawionych charakterystyk (rys.1 i 2) wynika, iż punkt znamionowy jest ostatnim punktem w całym dopuszczalnym zakresie pracy silnika. Być może po zamontowaniu silników w docelowym układzie chłodzenia okaże się, iż wstępnie określone zapotrzebowanie na moc jest za duże. Wówczas można zoptymalizować silnik napędowy (obwód elektromagnetyczny) tak, aby uzyskać odpowiednią moc przy mniejszych wymiarach. Taki zabieg spowoduje zwiększenie wydatku czynnika chłodzącego w kanale (mniejszy gabaryt silnika), obniżenie masy silników, a także poprzez ograniczenie maksymalnej prędkości obrotowej, zmniejszy emitowany hałas wentylatorów.

### 4. Prototyp silnika

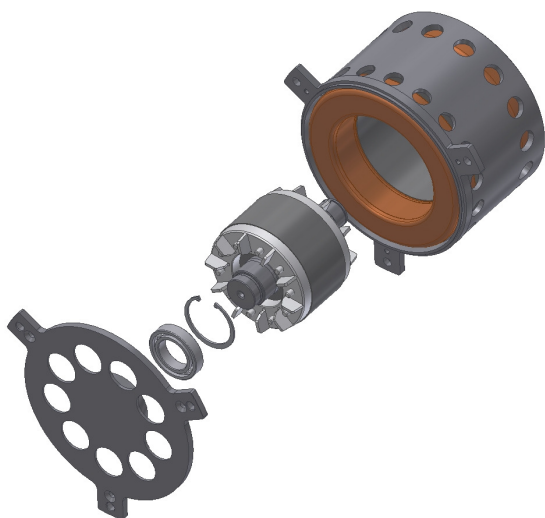
Ze względu na specjalnie zaprojektowany obwód elektromagnetyczny silnika (małe gabaryty, wysokie temperatury pracy) koniecznym było zaprojektowanie odpowiedniego kadłuba

umożliwiającego specjalne mocowanie w kanale chłodzącym oraz odpowiednie odprowadzanie ciepła z maszyny [1,2,3]. Możliwość zamocowania silnika w kanale odprowadzającym gorące powietrze osiągnięto poprzez zaprojektowanie odpowiedniego systemu zamocowań, oraz odpowiednio zaprojektowanych tarcz. Na szczególną uwagę zasługuje tarcza od strony przeciw napędowej (ND) silnika, stanowiąca punkt zamocowania silnika w urządzeniu roboczym [5,6]. Tarczę tą przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Tarcza silnika od strony przeciw napędowej (ND)

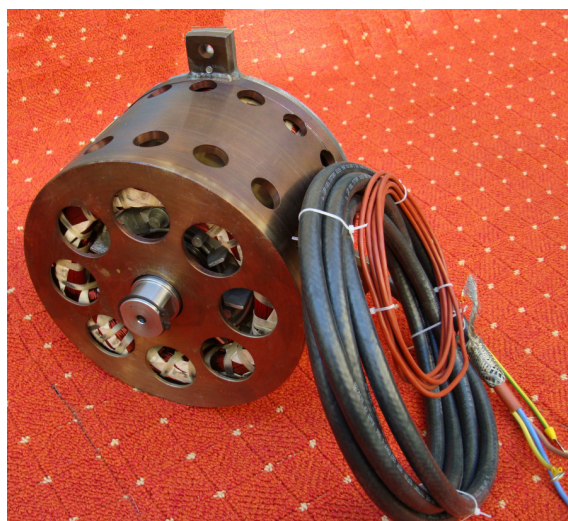
W celu zapewnienia odpowiednich wymiarów gabarytowych silnika tarcze zostały wykonane z materiału o możliwie najcieńszych ściankach, lecz zapewniających odpowiednią sztywność konstrukcji całego kadłuba.



Rys. 4. Kadłub silnika napędu wentylatora

Jako że silnik napędzający wentylator, znajduje się w kanale wiodącym gorące powietrze, koniecznym było zapewnienie odpowiedniego chłodzenia poprzez system otworów wentyla-

cyjnych wykonanych w kadłubie silnika. Takie podejście do problemu pozwoliło na uzyskanie możliwie największego wydatku medium chłodzącego w kanale, który jak się okazało po badaniach, wyniósł  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Należy mieć na uwadze fakt iż jest to wydatek dla całego kanału chłodzącego, a więc tylko część czynnika chłodzącego przepływa przez silnik. Aby umożliwić możliwie największy przepływ medium przez wnętrze silnika, kadłub (rys. 4) został tak zaprojektowany aby stawiał możliwie najmniejszy opór hydrauliczny na drodze przepływającej mieszanki powietrza i gazów wylotowych.



Rys. 5. Wykonany silnik napędu wentylatora przeznaczony do montażu w kanale wentylacyjnym

Tabela 1. Parametry silnika SG160XS-4

Moc znamionowa	$P_n$	kW	18
Napięcie znamionowe	$U_n$	V	400
Prąd znamionowy	$I_n$	A	35.6
Częstotliwość znamionowa	$f_n$	Hz	137
Prędkość znamionowa	$n_n$	obr/min	4040
sprawność	$\eta_n$	%	90
Współczynnik mocy	$\cos \varphi_n$	-	0.81
Moment znamionowy	$M_n$	Nm	42.5

Na rysunku 5 przedstawiono wykonany prototypowy silnik typu Sg160XS-4. Parametry znamionowe silnika zostały przedstawione w tabeli 1 i uzyskano je z obwodu elektromagnetycznego bazującego na blachach silnika serii SEE  $2p=4$ , wzniosu mechanicznego 160 mm. Dzięki takiemu zabiegowi, koszty wprowadze-

nia do produkcji seryjnej tego typu silnika będą znacznie niższe.

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie silnika o przeznaczeniu specjalnym z zastosowaniem do lekkiego pojazdu wojskowego. Najistotniejszymi ograniczeniami w projektowaniu silnika były:

- konieczność pracy dwóch maszyn zasilanych z jednego falownika,
- możliwie najmniejsze gabaryty zewnętrzne maszyny,
- praca silników w zakresie prędkości obrotowej 500 – 4000 obr/min.,
- możliwość pracy silników w temperaturze otoczenia sięgającej do 80°C,
- niskie koszty budowy prototypu i ewentualnie późniejszej małoseryjnej produkcji.

Powyższe ograniczenia spowodowały, iż najlepszym typem maszyny do osiągnięcia wymaganego celu był silnik klatkowy. Maszyna została zaprojektowana za pomocą programu komputerowego, którego algorytm bazuje na klasycznych metodach obliczeniowych [4]. Zaprojektowanie silnika dla znamionowego punktu pracy (4040 obr/min.) pozwala na płynną regulację prędkości obrotowej silnika (wentylatora) w zależności od potrzeby intensywności chłodzenia. Przy takim założeniu, zaprojektowany silnik pracuje ze stałym stosunkiem  $U/f$  w zakresie prędkości 500 – 4040 obr/min. Napięcie zasilania wraz ze wzrostem prędkości obrotowej liniowo rośnie do wartości 400 V (rys.2). Z przeprowadzonych badań na obiekcie rzeczywistym (silniki zamontowane w urządzeniu roboczym) wynika iż średni punkt pracy występuje dla prędkości ok. 2000 obr/min. A osiągnięte przyrosty temperatur w tym punkcie pracy kształtują się na poziomie 50 K. Niski przyrost temperatury jest dowodem na to iż kadłub został prawidłowo zaprojektowany pod względem przewietrzania silnika. Ze względu na gabarytowe ograniczenie długości silnika zastosowano tarcze o cienkiej ściance, dla których skuteczna prędkość drgań (kierunku po osiowym wirnika) przy prędkości 2000 obr/min., wyniosła ok. 1.0 mm/s. Osiągnięty poziom drgań, mieści się w granicach dopuszczalnych wartości. Silniki zostały zamontowane w doce-

lowym urządzeniu roboczym i pozytywnie przeszły wszystkie próby prototypowe pojazdu. Z przeprowadzonych wstępnych testów na obiekcie rzeczywistym pojazdu wynika iż, moc 18 kW przy prędkości 4000 obr/min. jest wystarczająca. Niewykluczone jest iż, w wyniku dalszego rozwoju konstrukcji pojazdu nastąpi obniżenie mocy silników wentylatorów, co pozwoli na zmniejszenie gabarytów silnika. Reasumując powyższe, cel został osiągnięty, a silnik uzyskał zakładane parametry oraz charakterystyki zewnętrzne. Zgodność obliczeń z wynikami badań jest zadowalająca i wystarczająca.

## Literatura

- [1]. Gawron S. Bernatt J.: „Problemy projektowania i konstrukcji maszyn indukcyjnych” Jubileusz 90 – lecia Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Materiały Konferencyjne, Kraków 2009.
- [2]. Bernatt J., Glinka T.: „Problemy konstrukcji maszyn elektrycznych w aktualnych pracach BOBRME KOMEL” Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 83/2009, Wyd. BOBRME KOMEL, Katowice 2009.
- [3]. Pistelok P. „Optymalizacja w konstrukcjach uzwojeń bezpośrednio chłodzonych wodą”, Śląskie Wiadomości Elektryczne nr 6/2010, str. 4-7.
- [4]. Głowacki A.: „Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych” WNT, Warszawa 1993.
- [5]. Dziurski A., Kania E., Mazanek E.: „Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn ” WNT. 2009.
- [6]. Rutkowski A.: „Części Maszyn ” WNT 2009.

## Autorzy

Mgr inż. Paweł Pistelok

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”,  
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188,  
e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl

Mgr inż. Tomasz Czaja

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”,  
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188,  
e-mail: t.czaja@komel.katowice.pl