

Piotr Dukalski, Leszek Brymora
BOBRME KOMEL, Katowice

NOWA KONCEPCJA SILNIKA TRAKCYJNEGO WZBUDZANEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI PRZEZNACZONEGO DO ZASTOSOWANIA W NAPĘDACH KOPALŃ

THE NEW CONCEPT OF PERMANENT MAGNETS TRACTION MOTOR DEDICATED FOR USE IN MINE DRIVES

Streszczenie: W artykule przedstawiono silnik trakcyjny z magnesami trwałymi dedykowany do napędów górniczych. Autorzy omówili zalety i możliwości zastosowania napędów wyposażonych w silniki PM (*Permanent Magnets*) w kopalniach. Zamieszczono wyniki obliczeń elektromagnetycznych oraz rozwiązania konstrukcyjne w postaci modelu 3D.

Abstract: This paper presents the traction motor with permanent magnet motors dedicated to mining. The authors discuss the advantages and opportunities of drives with PM motors (Permanent Magnet) in the mines. Posted designers shared the results of calculations of electromagnetic and structural solutions in the form of a 3D model.

Słowa kluczowe: *napęd elektryczny, napęd górniczy, silnik z magnesami trwałymi*
Keywords: *electrical, mining drive, motor with permanent magnets*

Wstęp

Jedną z podstawowych dziedzin procesu wydobyczego kopalń zarówno podziemnych, jak i odkrywkowych jest transport ludzi, urobku, maszyn i urządzeń oraz materiałów eksploatacyjnych. Transport bezpośrednio wpływa na efektywność wydobycia, co ostatecznie przekłada się na koszt eksploatacji urobku.

Jednym z celów do zrealizowania zwłaszcza w transporcie podziemnym jest jego efektywność i bezpieczeństwo pociągające za sobą coraz bardziej rygorystyczne przepisy skłaniające producentów urządzeń górniczych do spełnienia wymagań norm dotyczących obniżenia: hałasu, zapylenia oraz wydzielania ciepła.

Do sprostania ww. potrzebom stawia się przed „światem nauki” i producentami napędów maszyn górniczych bardzo wysokie wymagania, jeżeli chodzi o nowatorstwo i technologiczność wykonania nowych rozwiązań. Przykładem ich spełnienia w szerokim paśmie wymagań są niewątpliwie wydajne i niezawodne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, które produkuje i unowocześnia między innymi BOBRME KOMEL.

Z uwagi na istniejącą infrastrukturę kopalnianej kolei podziemnej (zajeżdnie, torowiska, różnego rodzaju ciągniki, w tym spalinowe) oraz czynnik ludzki w postaci wieloletniego stosowania w górnictwie podziemnym dalsza jej

eksploatacja jest nieunikniona. Rozwoju transportu można spodziewać się poprzez zastosowanie [2]:

- nowoczesnych silników elektrycznych lub napędów elektrycznych,
- nowej generacji baterii akumulatorowych,
- nowoczesnych energooszczędnych układów zasilających,
- elektronicznych układów sterujących.

Napędy trakcyjne w kopalniach

Obecnie w polskich kopalniach stosowane są lokomotywy [2]:

- elektryczne przewodowe oraz akumulatorowe,
- pneumatyczne,
- spalinowe.

W górnictwie światowym są również znane i często stosowane samojezdne wozy oponowe z napędem spalinowym oraz elektrycznym.

Lokomotywy pneumatyczne ze względu na niską sprawność oraz niezbędną w kopalni instalacja sprężonego powietrza sprawiają, że stosowanie tego typu napędu jest kosztowne.

Napędami podnoszącymi sprawność transportu górniczego są napędy spalinowe. Wadami tego rozwiązania jest: emisja ciepła, emisja spalin oraz emitowanie hałasu. Ma to bezpośredni wpływ na komfort pracy załogi kopalni oraz

podraża koszt wydobycia o dodatkowe instalacje odprowadzające spaliny.

Napędy elektryczne przewodowe poprawiają znacznie warunki pracy, jednak sposób ich zasilania ze względu na spadki napięć oraz możliwość uszkodzenia przewodu zasilającego stanowią ich poważną wadę, co z kolei daje szansę napędom wyposażonym w zasilanie własne - napędom akumulatorowym.

Z powodów ekonomicznych, bezpieczeństwa pracy oraz ekologicznych, producenci silników i napędów elektrycznych (również górniczych) stawiają coraz większy nacisk na podwyższanie sprawności oraz zmniejszanie gabarytów podzespołów napędów.

Zwiększenie wydajności napędów elektrycznych wiąże się z podnoszeniem sprawności na każdym etapie przemiany energii elektrycznej na energię napędową. Zmiany konstrukcyjne oraz technologiczne dotyczą:

- źródeł energii napędu,
- silników elektrycznych,
- przekładni mechanicznych,
- układów sterowania optymalizujących pracę napędu.

Poprawienie sprawności sprowadza się do stosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, stosowania nowych materiałów, nowych algorytmów sterowania.

Wysokosprawne napędy elektryczne złożone z silników wzbudzanych magnesami trwałymi oraz dedykowanymi do nich układami sterowania i zasilane z baterii litowo-jonowych, są często spotykane w innych gałęziach przemysłu np. w samochodach elektrycznych. W przypadku przemysłu górniczego, specyfika i warunki pracy ze względu na bezpieczeństwo załogi kopalń urządzenia dołowe muszą spełniać warunki określone przez restrykcyjne normy.

Aby wprowadzić do kopalni nowe technologie, nawet gdy zostały one sprawdzone w innych zastosowaniach (nie górniczych), niezbędne jest ich zmodyfikowanie do przystosowania w warunkach dołowych. Normy górnicze bardzo często nie przewidują takich rozwiązań, co stanowi dodatkowe utrudnienie dla konstruktorów oraz jednostek atestacyjnych.

Nowy produkt wymaga wykonania dodatkowych badań, często niestandardowych dla danego typu urządzenia oraz dokładnego zbadania prototypu pod kątem bezpieczeństwa pracy przy udziale doświadczonych jednostek związanych z przemysłem górniczym oraz jednostki atestacyjnej.

Ciekawym i innowacyjnym rozwiązaniem jest zastosowanie w napędzie ciągnika górniczego silników synchronicznych z magnesami trwałymi zasilanych z baterii litowo-jonowej [1]. Jest to przykład innowacyjnego rozwiązania ciągnika górniczego po raz pierwszy wykorzystującego w górnictwie napęd z silnikami synchronicznymi wzbudzonymi magnesami trwałymi z własnym źródłem energii najnowszej generacji. Napęd powstał przy współpracy Instytutów BOBRME KOMEL oraz ITG KOMAG i jest dedykowany do podwieszanego ciągnika górniczego GAD-1 (producentami ciągnika są firmy VACAT oraz NAFRA) [1].

Zalety silników z magnesami trwałymi

Projekt silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi PMSM (*Permanent Magnets Synchronous Motor*) przedstawionego w tym artykule wykorzystuje szereg rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na jego praktyczne i bezpieczne zastosowanie w napędach górniczych przeznaczonych do pracy w strefach zagrożonych wybuchem pyłu węglowego oraz metanu.

Napędy elektryczne z silnikami PMSM są obecnie stosowane w samochodach elektrycznych, gdzie sprawdziły się dzięki swoim zaletom:

- wysokiej gęstości energii,
- dobrym parametrom regulacyjnym w całym zakresie prędkości obrotowej,
- wysokiej sprawności,
- dużej przeciążalności momentem,
- dobrą dynamiką działania,
- hamowaniem odzyskowym.

Wymienione zalety są także atrakcyjne dla napędów górniczych maszyn roboczych otwierając tym samym możliwości ich rozwoju zwiększające efektywność pracy [1,2,3,4,5,6].

Napędy elektryczne z silnikami wzbudzonymi magnesami trwałymi, po zastosowaniu rozwiązań konstrukcyjnych uwzględniających wymogi bezpieczeństwa i warunki pracy w kopalniach, mogą w przyszłości zastąpić obecnie stosowane silniki indukcyjne.

Założenia konstrukcyjne silnika trakcyjnego wzbudzanego magnesami trwałymi

W artykule autorzy przedstawiają przykładowy projekt silnika wzbudzanego magnesami trwałymi, który jest dedykowany do zastosowania w górnictwie. Silnik zgodnie z założeniami

konstruktorów powinien spełniać szereg głównych wymagań:

1. Pracować bezpiecznie w temperaturze otoczenia 40 °C w strefach kopalń zagrożonych wybuchem pyłu węglowego i metanu.
2. Obudowa ma być standardowa jak w silnikach indukcyjnych.
3. Wymiary montażowe silnika powinny być dopasowane do ciągnika GAD-1, aby mógł być zamiennikiem dla obecnie stosowanego silnika [1].
4. Chłodzenie własne silnika, zatem obudowa silnika musi gwarantować dużą powierzchnię oddawania ciepła.
5. Enkoder determinujący niezawodność pracy napędu powinien być izolowany przed wpływem wysokich temperatur, zakłóceń elektromagnetycznych oraz uszkodzeń mechanicznych.

Model 3D konstrukcji trakcyjnego silnika górniczego wzbudzanego magnesami trwałymi

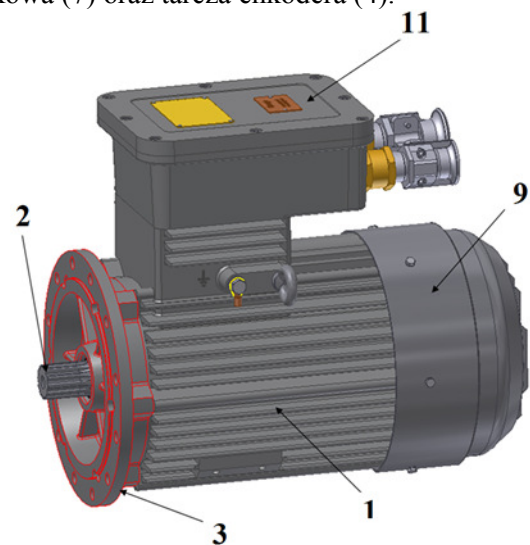
Silniki elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, przeznaczone do pracy w atmosferze zagrożonej wybuchem np. w kopalniach metanowych, w zakładach chemicznych, w tlenowniach i innych, muszą posiadać obudowę ognioszczelną (przeciwwybuchową).

Jakiegokolwiek wyładowanie elektryczne lub eksplozja wewnątrz silnika nie może wydostać się na zewnątrz obudowy.

W przypadku silników PMSM w wykonaniu górniczym pojawia się kwestia umiejscowienia oraz doboru czujnika położenia osi magnetycznej wirnika względem osi uzwojenia stojana - enkodera.

Jednym ze znanych rozwiązań jest stosowanie enkodera w obudowie ognioszczelnej (enkoder iskrobezpieczny), który jest połączony mechanicznie z wałem silnika, lecz montowany na zewnątrz silnika (poza obudowę ognioszczelną silnika). Enkoder iskrobezpieczny posiada swoją własną obudowę ognioszczelną, która w sposób znaczący powiększa jego cenę oraz ze względu na wymiary, powiększa długość osiową silnika. Dodatkowym problemem jest przyłączenie i osłona kabla wyprowadzającego sygnał pomiarowy z enkodera do układu sterowania, który jest w wykonaniu górniczym lub musi być prowadzony także w osłonie ognioszczelnej. W warunkach pracy kopalń urządzenia tego typu są szczególnie narażone na uszkodzenie.

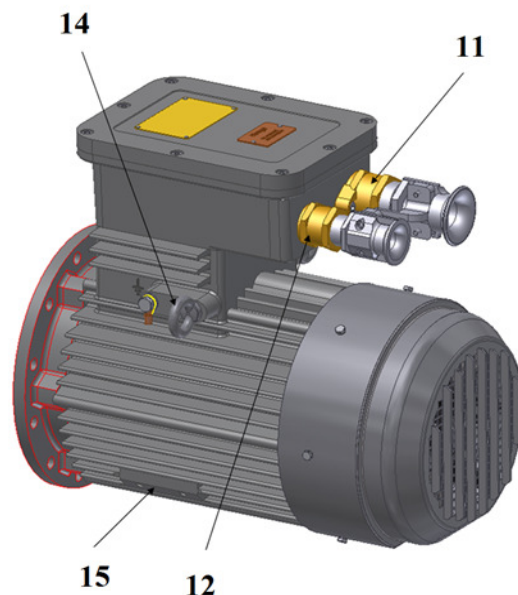
Drugim możliwym rozwiązaniem jest zamontowanie dowolnego enkodera wewnątrz obudowy ognioszczelnej wewnątrz silnika. W tym przypadku rodzina różnych rodzajów enkoderów jest większa, a ich cena jest znacznie niższa. Enkoder zabudowany wewnątrz silnika jest narażony na działanie pola temperatury tam panującej. Katalogowe enkodery wysokotemperaturowe mają ograniczoną maksymalną temperaturę pracy do 110 °C, a dopuszczalna temperatura uzwojenia wykonanego w klasie izolacji F, co jest obecnie standardem, wynosi 150°C. Ogranicza to możliwość stosowania standardowej klasy temperaturowej enkoderów. Ponadto enkoder wewnątrz silnika jest narażony na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od czoł uzwojenia i wyładowań niepełnych w układzie izolacyjnym. Zakłócenia te oddziałują negatywnie na sygnał pomiarowy kąta obrotu wirnika. Dodatkową trudność stwarza wyprowadzenie przewodów z enkodera zabudowanego wewnątrz obudowy ognioszczelnej. Przewody mogą być wyprowadzone do skrzynki przyłączeniowej silnika przez kanał wykonany między jarzmem, a kadłubem stojana. Wąski kanał znacznie utrudnia montaż silnika i zmniejsza przekrój jarzma stojana, a wymiana enkodera jest możliwa tylko po zdjęciu przynajmniej jednej tarczy łożyskowej, co wydłuża i komplikuje demontaż. Przedstawiona na rysunku 3 koncepcja rozwiązania konstrukcji silnika wyróżnia się od istniejących tym, że posiada niezależną komorę ognioszczelną wewnątrz, której znajduje się enkoder. W tym przypadku ww. komorę tworzą tarcza łożyskowa (7) oraz tarcza enkodera (4).



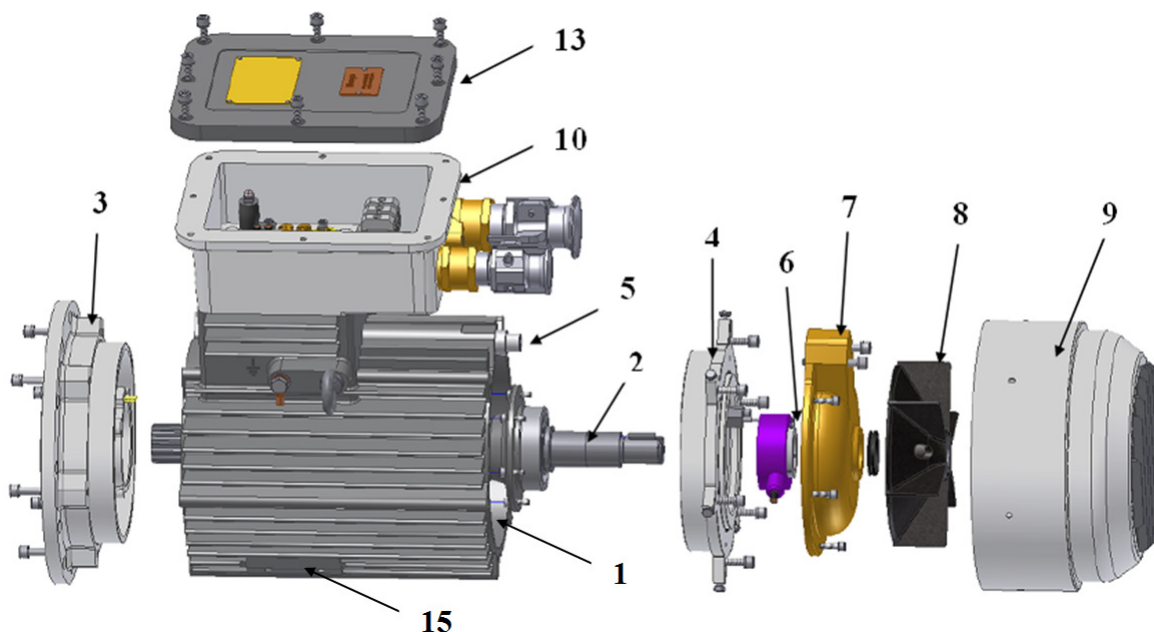
Rys. 1. Widok silnika od strony napędowej

Niezależna komora enkodera stanowi osłonę przed wpływem temperatury oraz pola magnetycznego (generowanych przez stojan), co jest atutem tego rozwiązania. Wyposażenie silnika w dodatkową komorę enkodera umiejscowioną od strony przeciwnapędowej silnika, zgodnie z rysunkiem 3, pozwala na szybki demontaż i wymianę enkodera nawet w warunkach dołowych kopalni. Silnik został opracowany tak, aby jego mocowanie w napędzie oraz możliwe położenie było jak najbardziej uniwersalne. Mocowanie kołnierzowe jest preferowanym sposobem montażu w układzie poziomym lub pionowym. Silnik jest również dostosowany do mocowania łapowego przez nadlewy (15). Rozwiązania konstrukcji silnika chronione patentami pozwalają na znacznie łatwiejszy i bezpieczniejszy montaż i demontaż enkodera oraz zastosowanie enkoderów o standardowym zakresie temperaturowym i w wykonaniu nie iskorobezpiecznym. Wyprowadzenie przewodów pomiarowych z enkodera do skrzynki przyłączeniowej silnika może przebiegać w rur-

ce stalowej, bądź kablem górniczym poprzez dławnicę w tarczy łożyskowej.



Rys. 2. Widok silnika od strony przeciwnapędowej



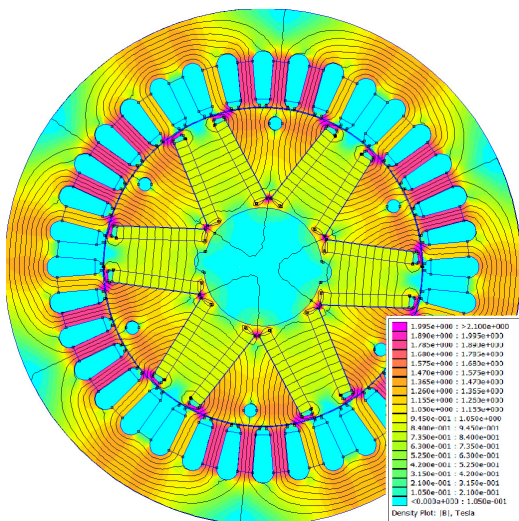
Rys. 3. Rozłożony model 3D silnika stojan uzwojony (1), wirnik (2), tarcza łożyskowa od strony napędu (3), tarcza łożyskowa od strony przeciwnapędowej (4), łącznik (5), enkoder (6), tarcza enkodera (7), przewietrznik (8), osłona przewietrznika (9), skrzynka przyłączeniowa (10), wpuści kablowe (11) i (12), pokrywa skrzynki zaciskowej (13), ucha transportowe (14), dodatkowe nadlewy pod łapy (15)

Obliczenia elektromagnetyczne silnika

Silnik trakcyjny, synchroniczny z magnesami trwałymi według założeń powinien charakteryzować się jak największą sprawnością oraz

stosunkowo wysokim momentem obrotowym w szerokim zakresie prędkości obrotowej, co gwarantuje dynamiczną jazdę napędu.

Ponieważ silnik nie został zaprojektowany do konkretnego napędu, a ma stanowić uniwersalną konstrukcję, która będzie stosowana w silnikach górniczych o różnych obwodach elektromagnetycznych, konstruktorzy dobrali tak jego parametry aby w założeniu silnik mógł pracować w napędzie ciągnika GAD-1. Ciągnik górniczy GAD-1 wyposażony jest w koła cierne, które pracują przy zerowych oraz małych nachyleniach toru ciągnika. W miejscach kopalni, gdzie nachylenie toru jest wyższe koła cierne są przełączane na układ zębatkowy [1]. W momencie wjazdu ciągnika na tor zębatkowy silniki kolejno muszą pracować z chwilowym przeciążeniem równym ok. 1,3 momentu znamionowego. W zamieszczonych w artykule obliczeniach konstruktorzy przedstawiają charakterystyki momentu w funkcji prędkości obrotowej dla trzech różnych obciążeń silnika - dla obciążenia znamionowego, przeciążenia krótkotrwałego przy zmianie napędu z cierne na zębatkowy oraz przy przeciążeniu chwilowym ograniczonym dostępnym prądem z dedykowanego do silnika falownika. Obliczenia projektowe obwodu elektromagnetycznego zostały przeprowadzone metodą polowo - obwodową. Aby uzyskać optymalne parametry pracy silnika wybrano konstrukcję wirnika IPM (*Interior Permanent Magnets*) z magnesami typu V, co pozwala na zastosowanie większej objętości magnesu w obwodzie elektromagnetycznym. Przekrój rdzenia magnetycznego oraz obliczony rozkład indukcji pola magnetycznego od magnesów trwałych został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Obliczony rozkład indukcji pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych umieszczonych w wirniku

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę momentu mechanicznego w funkcji prędkości obrotowej.

Obliczone parametry znamionowe silnika zostały przedstawione w tabeli 1.

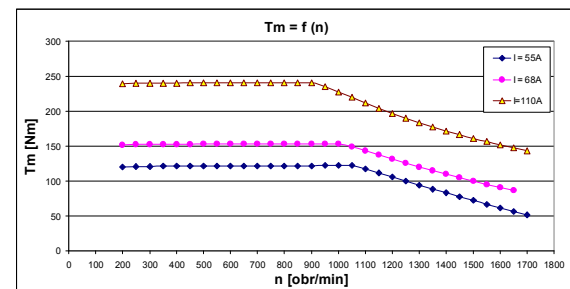
Tab.1. Obliczone parametry znamionowe silnika

SMKwsPA132M6		
P_n	12,6	kW
U_n	150	V
I_n	55	A
n_n	1000	obr/min
T_n	120	Nm
$\eta\%$	94	%
n_{max}	1700	obr/min

Na przedstawionej charakterystyce można zauważyć, że według przeprowadzonych obliczeń silnik będzie w stanie uzyskać znamionowy moment równy ok. 120 Nm (co dla ciągnika GAD-1 będzie równoważne z siłą uciągu równą ok. 83 kN).

Silnik uzyskuje moment znamionowy w zakresie prędkości od 0 do prędkości bazowej równej 1000 obr/min, co dla ciągnika GAD-1 oznacza prędkość w przedziale 0 - 1,3 m/s.

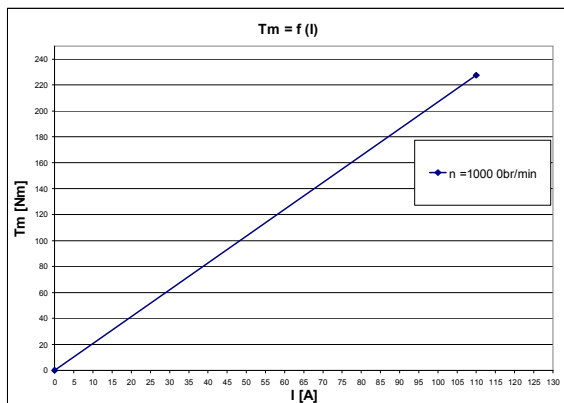
W drugiej strefie pracy silnik może osiągać prędkość obrotową równą 1700 obr/min (ok. 2,2 m/s w przypadku napędu ciągnika GAD-1).



Rys. 5. Charakterystyki momentu w funkcji prędkości obrotowej dla obciążenia: znamionowego ($I = 55 A$), dla przeciążenia podczas zmiany napędu z cierne na zębaty ($I = 68 A$), dla przeciążenia maksymalnym, dostępnym prądem z falownika ($I = 110 A$)

Na kolejnym rysunku zostały przedstawione charakterystyki momentu mechanicznego dla różnych prądów zasilania silnika.

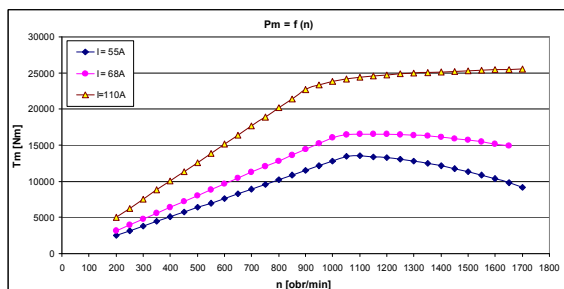
Według przeprowadzonych obliczeń współczynnik obciążenia cieplnego silnika, przy zasilaniu prądem znamionowym $I=55 A$, wynosi ok. $0,6 W/cm^2$, co przy założeniu chłodzenia własnego i odpowiednim uźbrowaniu kadłuba, nie jest wartością dużą.



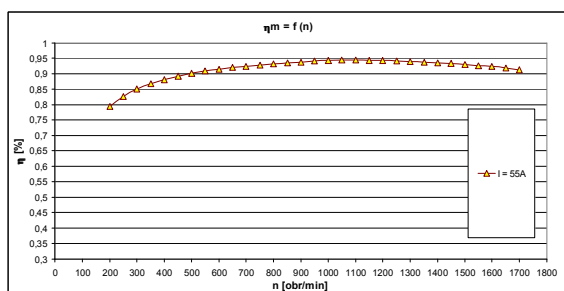
Rys. 6. Charakterystyka momentu w funkcji prądu zasilania silnika

Według konstruktorów oraz obliczeń cieplnych silnik powinien pracować w reżimie pracy S1 w całym zakresie prędkości obrotowej, przy obciążeniu znamionowym.

Rysunek 7 przedstawia rodzinę charakterystyk mocy w funkcji prędkości obrotowej dla różnych prądów zasilania silnika.



Rys. 7. Charakterystyki mocy mechanicznej w funkcji prędkości obrotowej dla różnych prądów zasilania (analogicznych do rys. 8)



Rys. 8. Charakterystyka sprawności w funkcji prędkości obrotowej dla znamionowego obciążenia

Podsumowanie

Zaprojektowany silnik jest dedykowany do zastosowania w napędach górniczych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem pyłu węglowego lub metanu.

Rozwiązanie obudowy silnika pozwala na umieszczenie enkodera w komorze ognioszczel-

nej dodatkowo odseparowanej cieplnie oraz magnetycznie od uzwojenia stojana.

Konstrukcja kadłuba pozwala na montaż silnika kołnierzowo w pozycji pionowej oraz w pozycji poziomej na łapach, co umożliwi zastosowanie silnika w różnych układach napędowych.

Obudowa silnika została zaprojektowana jako ognioszczelna zgodnie z normami oraz standardami górniczymi.

Silnik według obliczeń elektromagnetycznych przy założonych parametrach będzie w stanie pracować z reżimem pracy S1.

Obecnie prototypowy silnik jest produkowany w BOBRME KOMEL. Równocześnie trwają prace związane z budową dedykowanego do silnika falownika.

Kolejnym etapem prac będzie przeprowadzenie badań laboratoryjnych wykonanego napędu.

W przyszłości silnik po uzyskaniu certyfikatu górniczego dołączy do oferty silników BOBRME KOMEL jako górniczy silnik trakcyjny wzbudzany magnesami trwałymi.

Autorzy

Piotr Dukalski, p.dukalski@komel.katowice.pl
Leszek Brymora l.brymora@komel.katowice.pl

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice

Literatura

- [1]. J. Mróz, K. Skupień, A. Drwięga, Z. Budzyński, B. Polnik, D. Czerniak, P. Dukalski, L. Brymora - "Akumulatorowy ciągnik podwieszony GAD-1 z innowacyjnym napędem jako alternatywa rozwiązań z napędem spalinowym", Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 96/2012.
- [2]. E. Pieczora. Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego; Gospodarka Surowcami Mineralnymi; Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [3]. D. Saniawa. Efektywność Energetyczna Napędów Trakcyjnych; LOGITRANS - VII Konferencja Naukowo-Techniczna.
- [4]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król. Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi. Przegląd Elektrotechniczny Nr 12/2009.
- [5]. Z. Budzyński, P. Deja. Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 79/2008.
- [6]. J. Anuszczyk, A. Wawrzyniak. Napędy trakcyjne z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych w transporcie szynowym. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.

