

Koncepcja silnika z magnesami trwałymi dla napędów górniczych

Piotr Dukalski

1. Wprowadzenie

Historia rozwoju techniki górniczej pokazuje, że wdrażanie nowych, wydajniejszych rozwiązań w tej gałęzi przemysłu jest nieuniknione i trwa nieprzerwanie od samego początku istnienia tej dziedziny. Już ok. 20 tysięcy lat temu człowiek rozpoczął eksploatację złóż węgla kamiennego. Wraz z przyspieszającym rozwojem techniki jesteśmy w stanie sobie wyobrazić, jak w czasie „rewolucji przemysłowej” (przełom XVI i XVII wieku) został wprowadzony do górnictwa transport konny, a następnie zastosowano po raz pierwszy w kopalni wykorzystanie energii wód, między innymi do odwadniania i napowietrzania szybów. Pod koniec XVIII wieku nastąpił okres tzw. „pierwszej rewolucji przemysłowej”, który wzbogacił przemysł wieloma zupełnie nowymi wynalazkami, jak np. maszyny parowe, których historia swój początek miała właśnie w kopalniach.

Na przełomie XIX i XX wieku nagły postęp techniczny z zakresu elektrotechniki umożliwił zastąpienie maszyn parowych silnikami elektrycznymi dużej mocy, pozwalającymi na ich zastosowanie w maszynach wyciągowych.


Od tamtej pory napędy elektryczne przechodziły różne metamorfozy zarówno pod kątem stosowanych typów silników (silniki asynchroniczne, silniki prądu stałego, silniki synchroniczne), jak również pod kątem ich sterowania (od układów z nastawnikiem rezystorowym po zautomatyzowane układy tyrystorowe).

W obecnych czasach opracowywanie nowych rozwiązań technicznych w przemyśle górniczym warunkują coraz bardziej rygorystyczne przepisy, skłaniające producentów urządzeń górniczych do spełnienia wymagań, jakie stawia się maszynom pod względem: zmniejszenia hałasu, zapylenia oraz wydzielania ciepła. Złe warunki pracy, nadmierny hałas, zanieczyszczenie powietrza oraz podnoszenie jego temperatury przez nieenergooszczędne maszyny są powodem zmniejszenia komfortu pracy, zwiększenia niebezpieczeństwa oraz mniejszej wydajności załóg pracujących pod ziemią. Potrzeba rynku wymusza znaczące zmniejszenie niekorzystnego bilansu nie tylko energetycznego, co wiąże się z podnoszeniem sprawności silników i urządzeń, ale także bilansu czystości powietrza. Z uwagi na postępującą automatyzację maszyn dołowych również precyzja sterowania oraz niezawodność odgrywa bardzo dużą rolę.

Zdaniem specjalistów jednym z kolejnych kroków w rozwoju napędów górniczych jest wprowadzenie do przemysłu górnictwa wysoko wydajnych silników elektrycznych wzbudzonych magnesami trwałymi [1, 2].

Badania w zakresie silników górniczych wzbudzonych magnesami trwałymi prowadzone są przez Instytut Napędów

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwiązania konstrukcji oraz możliwości wprowadzenia silników wzbudzonych magnesami trwałymi do systemów transportu górniczego. Autor opisuje zalety silników górniczych z magnesami trwałymi oraz koncepcję rozwiązań konstrukcyjnych, umożliwiających zastosowanie tego typu silników w przemyśle górniczym, na przykładzie zrealizowanych napędów trakcyjnych.

 **Abstract:** This paper presents the design solutions and the possibility of permanent magnet excited motors for mining transport systems. The author describes the benefits of mining motors with permanent magnets and the concept of design solutions that enable the use of these types of motors in the mining industry, on examples of realized traction drives.

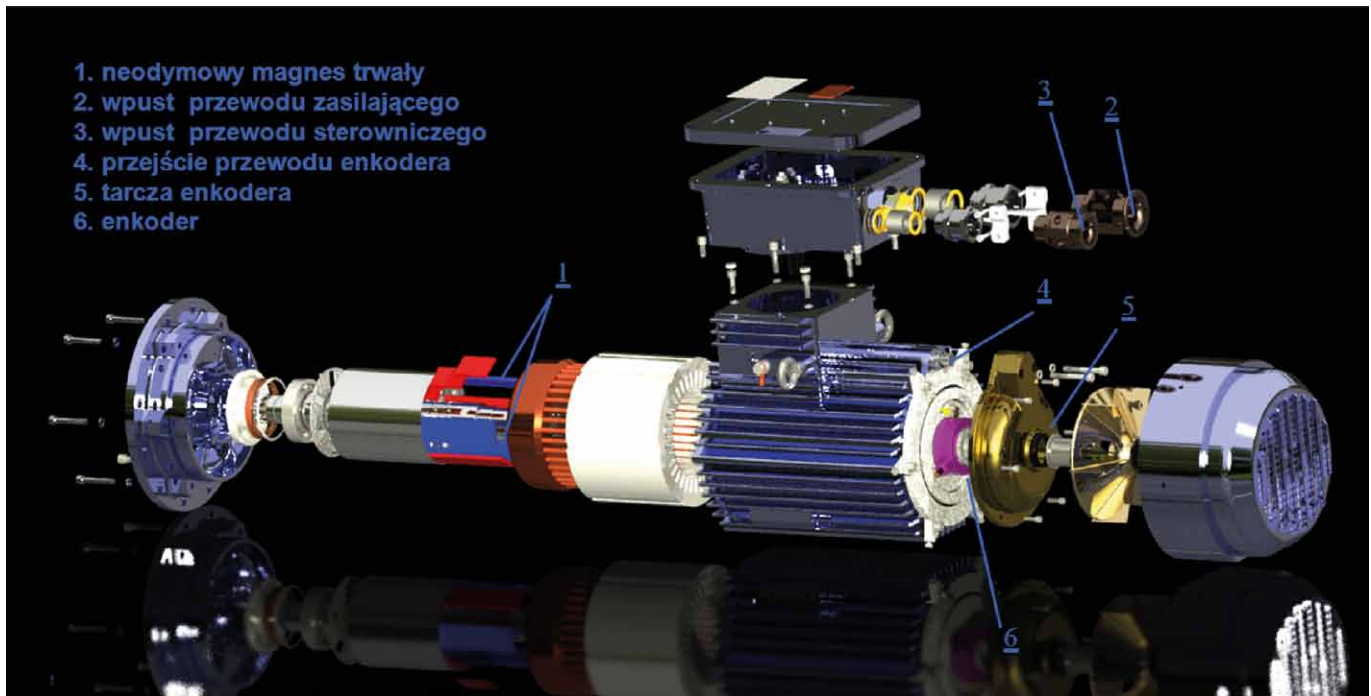
i Maszyn Elektrycznych KOMEL od kilku lat, przy współpracy z wieloma partnerami z branży górniczej. Wspólnie osiągnięto znaczące sukcesy w tym zakresie, wdrożono do przemysłu szereg rozwiązań technicznych oraz nawiązano stałą współpracę.

Obecnie realizowany jest projekt PBS (Program Badań Stosowanych) pod tytułem „Wprowadzenie wysoko sprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dołowych maszyn górniczych”. Projekt jest realizowany przy współpracy instytutu ITG EMAG oraz firmy DAMEL. Celem badań jest przeprowadzenie badań symulacyjnych na modelach matematycznych napędów górniczych przeznaczonych dla różnych aplikacji. W obliczeniach symulacyjnych zostaną uwzględnione napędy o następujących zastosowaniach: w przenośniku taśmowym, w kolejce dołowej, w wentylatorze lutniowym, w kombajnie (napęd posuwu). Jeden z proponowanych napędów dla wybranej aplikacji zostanie wykonany fizycznie i zbadany w laboratorium.

2. Zalety napędów górniczych z silnikami z magnesami trwałymi

Rozwiązania górniczych napędów elektrycznych z wykorzystaniem silników wzbudzonych magnesami trwałymi zapewnia szereg korzyści mogących wytyczyć nowe kierunki rozwoju dla techniki górniczej. Dzięki zastosowaniu silników z magnesami trwałymi można uzyskać w napędzie między innymi:

- mniejsze gabaryty silników pozwalające na budowę bardziej kompaktowych urządzeń (mniejsza masa silników pozwala ograniczyć masę całego urządzenia);



Rys. 1. Rozłożony model silnika górniczego, wzbudzanego

- wyższą, krótkotrwałą przeciążalność momentem, pozwalającą stosować silniki o zredukowanej mocy ciągłej w aplikacjach, gdzie np. jest konieczny duży moment rozruchowy, z kolei w czasie pracy silnik pracuje już z mniejszą wartością momentu obciążenia. Przykładem takich aplikacji są napędy trakcyjne;
- wyższą sprawność silników synchronicznych z magnesami trwałymi, w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych w górnictwie silników asynchronicznych klatkowych, pozwalającą na mniejsze zużycie energii elektrycznej, co przekłada się na mniejszą energochłonność napędów górniczych;
- wyższą dynamikę silników z magnesami trwałymi, pozwalającą na realizację bardziej dokładnych algorytmów sterowania prędkością i dokładniejszego pozycjonowania;

Wyższa sprawność silników synchronicznych z magnesami trwałymi jest osiągana poprzez wyeliminowanie strat występujących w wirniku maszyny indukcyjnej poprzez eliminację uzwojenia wirnika i zastąpienie go magnesami trwałymi.

Krótkotrwałą przeciążalność momentem jest w silnikach z magnesami trwałymi osiągana na poziomie ponad 3-krotnej wartości momentu znamionowego maszyny, gdzie w silnikach indukcyjnych o podobnej wielkości mechanicznej parametr ten jest niższy. Z tego powodu, aby zaspokoić potrzebę wysokiego momentu chwilowego, w napędach górniczych stosowane są często silniki przewymiarowane.

Dzięki zastosowaniu silnika z magnesami trwałymi można zastosować silnik o mniejszej masie, mniejszych gabarytach, uzyskując takie same możliwości przeciążeniowe lub zastosować silnik z magnesami takich samych gabarytów, lecz ze znacznie wyższym możliwym momentem przeciążenia.

Istnieje szerokie spektrum zastosowań silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Również w górnictwie silniki synchroniczne z magnesami trwałymi mogą znaleźć szerokie zastosowanie.

Ich budowa od strony stojana jest podobna do budowy powszechnie stosowanych silników asynchronicznych. Główna różnica tkwi w budowie wirnika, gdzie uzwojenie jest zastępowane wzbudzeniem magnesami trwałymi.

3. Budowa silników wzbudanych magnesami trwałymi

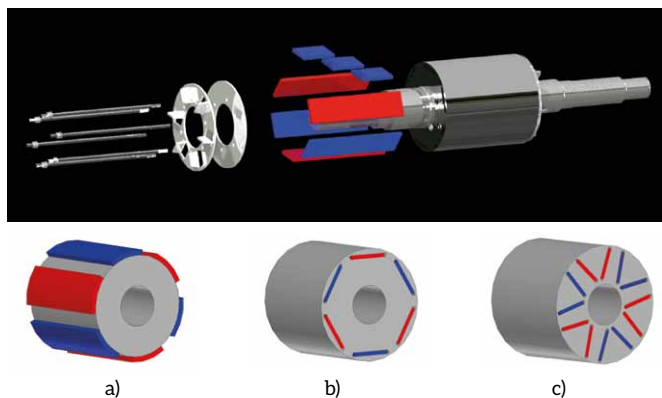
Silniki wzbudzone magnesami trwałymi znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach i są już światowym standardem. Z uwagi na atrakcyjne parametry pracy wciąż stanowią przedmiot badań oraz są aplikowane w coraz to nowych i nowoczesnych rozwiązaniach, jak np. napędy samochodów elektrycznych.

Konstrukcja silników wzbudanych magnesami trwałymi nie różni się pod względem budowy stojana oraz zewnętrznej konstrukcji kadłuba (są to standardowe rozwiązania zależne od miejsca aplikacji – kształtu silnika, przyłącza oraz warunków temperaturowych – układ chłodzenia, płaszcz wodny, uzebrowanie).

Istotną różnicę konstrukcyjną stanowi budowa wirnika, w którym umieszczone są magnesy trwałe, stanowiące najbardziej charakterystyczny element tych silników.

Budowa przykładowego silnika górniczego wzbudzanego magnesami trwałymi została przedstawiona na rysunku 1, poprzez zaprezentowanie rozłożonego modelu 3D.

Na rysunku przedstawiono główne podzespoły koncepcji silnika, która została już wdrożona do przemysłu oraz stanowiła przedmiot badań instytutu KOMEL.



Rys. 2. Typy wirnika z magnesami trwałymi: a) SPM; b) IPM; c) IPM „V”

Na rysunku 2 przedstawiono główne typy wirników stosowanych w silnikach wzbudanych magnesami trwałymi.

Magnesy trwałe mogą być naklejone na powierzchnię wirnika (wirnik typu SPM) lub umieszczone w specjalnych „gniazdach” wewnątrz wirnika (wirnik typu IPM). Rozwiązanie konstrukcji wirnika rzutuje nie tylko na technologię jego wykonania, ale również na parametry pracy silnika.

Istotnymi, charakterystycznymi podzespołami silników synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi są: niezbędny falownik oraz enkoder.

Falownik może być zabudowany w kadłubie silnika lub umiejscowiony poza nim, np. w skrzyni ognioszczelnej. Gabarytami falownik nie odbiega od falowników standardowo stosowanych w silnikach asynchronicznych (gabaryt jest zależny głównie od mocy falownika).

Drugim podzespołem, który jest niezbędny do precyzyjnego sterowania silnikiem i całym napędem, jest enkoder.

Enkoder jest przekaźnikiem służącym do ilościowego określenia ruchu obrotowego (może być również liniowy) i wyraża go w postaci impulsów elektrycznych. Enkoder, zamontowany na wał silnika, może zostać umieszczony poza jego kadłubem, w wersji iskrobezpiecznej, lub we wnętrzu kadłuba. W przypadku montażu na zewnątrz silnika konstruktor jest ograniczony do zastosowania istniejących na rynku enkoderów iskrobezpiecznych, których jest nieporównywalnie mniej niż enkoderów standardowych. Jest to również rozwiązanie mniej praktyczne w przypadku maszyn dołowych, ponieważ enkoder tego typu pomimo budowy wzmocnionej jest narażony na uszkodzenia mechaniczne (zarówno sam enkoder, jak i jego przewód sterowniczy).

Drugim rozwiązaniem jest zabudowa enkodera w kadłubie silnika. W ten sposób enkoder jest osłonięty przed uszkodzeniem mechanicznym, natomiast z uwagi na jego zabudowę w korpusie ognioszczelnym konstruktor może dobrać jego dowolny typ dostępny na rynku. Takie rozwiązanie wymaga modyfikacji konstrukcji silnika tak, aby enkoder nie był narażony na wpływ temperatury uzwojenia silnika (enkodery wysokotemperaturowe dostępne na rynku są przystosowane do max. temp pracy równej 110°C). Drugim zagrożeniem dla pracy enkodera zabudowanego w kadłubie silnika są zakłócenia elektromagnetyczne.

Aby zabezpieczyć enkoder zabudowany w kadłubie silnika, można opracować dodatkową komorę ognioszczelną (rys. 1), która ochrania enkoder przed wpływem obwodu elektromagnetycznego zarówno pod kątem zakłóceń elektromagnetycznych, jak i przed wpływem temperatury.

Dodatkowym atutem takiego rozwiązania jest możliwość łatwego dostępu do enkodera bez demontażu głównej komory silnika. Przy takiej konstrukcji również przewód enkodera jest ukryty w kadłubie, co chroni go przed uszkodzeniem w warunkach dołowych (np. wyrwaniem, przecięciem).

Konstrukcja silnika górniczego została opracowana i przetestowana w instytucie KOMEL a następnie zastosowana w silnikach górniczych dSMK(L)wsPA132M6. Wdrożone rozwiązanie w ciągniku dołowym GAD-1 [2, 3] stanowi przedmiot zgłoszeń patentowych instytutu.

4. Charakterystyka silników

Na rysunku 3 zostały przedstawione przykładowe charakterystyki silnika typu PMSM (*Permanent Magnets Synchronous Motor*). Przy zasilaniu tą samą wartością prądu utrzymuje on stały moment w zakresie prędkości obrotowej od 0 do prędkości bazowej (na rysunku 1000 obr./min).

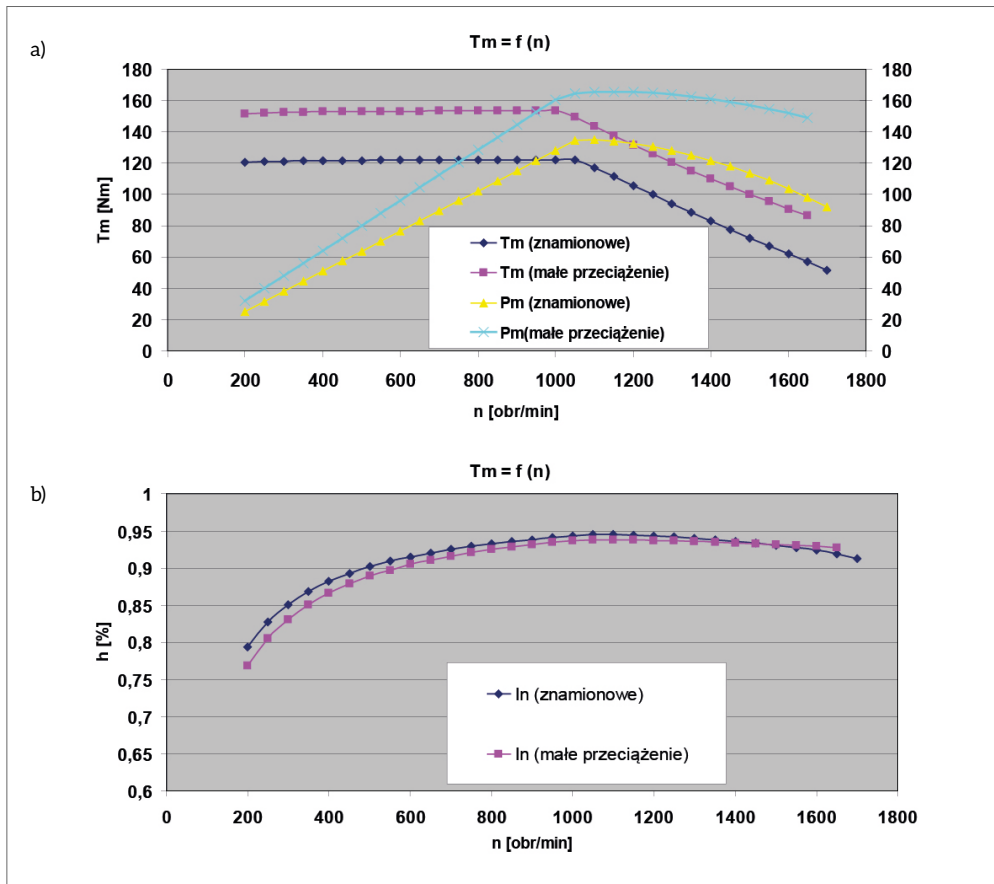
W przypadku, gdy aplikacja silnika wymaga pracy w szerszym zakresie prędkości obrotowej, powyżej prędkości bazowej (np. silniki napędu trakcyjnego lub silniki napędu posuwu kombajnu przy prędkości manewrowej), w celu poszerzenia zakresu pracy, obwód elektromagnetyczny jest odwzbudany. Odwzbudanie polega na osłabianiu pola magnetycznego przez przeciwstawne oddziaływanie stojana. Jest to osiągnięte za pomocą składowej biernej prądu I_d , która wytwarza napięcie magnetyczne w osi d , skierowane przeciwnie do napięcia magnetycznego magnesów trwałych. Prąd silnika I jest determinowany względami cieplnymi. Powiększając wartość prądu I_d , zmniejsza się prąd I_q , czyli składową czynną generującą moment elektromagnetyczny. Powoduje to, że w II. strefie regulacji nie uzyskuje się „stałej mocy”. Zamiast przebiegów stałej mocy i hiperbolicznego zmniejszania się momentu w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej, otrzymuje się przebiegi jak na rysunku 3.

Wzór określający moment elektromagnetyczny silnika 3-fazowego synchronicznego, wzbudanego magnesami trwałymi, przy założonym zasilaniu sinusoidalnym przyjmuje postać [7]:

$$T_s = \frac{30m_1}{\pi n_s} \left[\frac{U_f E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{U_f^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right]$$

gdzie:

- $X_d; X_q$ – reaktancja synchroniczna odpowiednio w osi magnetycznej „d” i „q”;
- U_f – wartość skuteczna napięcia fazowego zasilającego obwód twornika;
- E_0 – wartość skuteczna napięcia rotacji, indukowanego w fazie uzwojenia twornika przez wirujące pole magnetyczne od magnesów trwałych;
- δ – kąt mocy (kąt pomiędzy fazorami U_f i E_0);
- n_s – synchroniczna prędkość obrotowa wirnika.



Rys. 3. Wykresy:

a) momentu obrotowego oraz mocy mechanicznej;
 b) sprawności silnika górniczego wzbudzanego magnesami trwałymi dSMK(L)wsPA132M6

W zależności opisującej moment elektromagnetyczny można wyróżnić dwie składowe:

- składową wzbudzenia magnesów trwałych:

$$T_{SPM} = \frac{30m_1}{\pi n_s} \frac{U_f E_0}{X_d} \sin \delta$$

- składową reluktancyjną wynikającą z różnicy pomiędzy reaktancjami X_d i X_q :

$$T_{Srel} = \frac{30m_1}{\pi n_s} \frac{U_f^2}{2X_d} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

Składowa reluktancyjna występuje w silnikach, których magnesy trwałe umieszczone są wewnątrz wirnika (rysunek 2 a i 2 b). Konstrukcja wirnika z magnesami V jest konstrukcją z magnesami płaskimi zagłębionymi w pakiecie wirnika, umieszczonymi pod pewnym kątem względem siebie (VPM).

To, jaki kąt magnesu zostanie dobrany, zależy od wymagań w stosunku do maszyny. Kąt magnesów wpływa na wiele parametrów silnika, między innymi na moment zaczepowy oraz na zawartość wyższych harmonicznych indukowanych w napięciu twornika. Należy również zwrócić uwagę, że w konstrukcji VPM można umieścić objętościowo więcej magnesu w stosunku do konstrukcji IPM, co pozwoli na osiągnięcie wyższego momentu na wale.

W przypadku zastosowania większej objętości magnesów trwałych w obwodzie elektromagnetycznym należy spodzie-

wać się potrzeby zastosowania większego prądu odwzbudzenia w drugiej strefie pracy silnika.

Wartość maksymalna momentu elektromagnetycznego może być ograniczona przez kilka głównych czynników:

- parametrami przekształtnika energoelektronicznego, w tym wypadku dopuszczalna wartość prądu wyjściowego, jakim zasilany jest silnik;
- ograniczeniami cieplnymi silnika (stojana);
- w przypadku silników z magnesami trwałymi należy pamiętać, że temperatura (nawet nieprzewodząca do uszkodzenia uzwojenia stojana) może spowodować obniżenie parametrów magnesów lub ich całkowite rozmagnesowanie;
- ograniczeniami elektromagnetycznymi rdzenia magnetycznego silnika. Zbyt duża wartość prądu może spowodować duże nasycenie się zębów lub jarzma rdzenia.

5. Przykłady zastosowań silników wzbudzanych magnesami trwałymi w przemyśle górniczym

W górniczych systemach transportowych do tej pory silniki wzbudzone magnesami trwałymi zostały zastosowane w napędach ciągników i lokomotyw dołowych.

Zastosowanie silników pozwoliło na osiągnięcie korzyści, jakie nie byłyby możliwe do uzyskania przy użyciu standardowych silników górniczych.

Kolejną aplikacją, w jakiej zastosowano silnik górniczy wzbudzony magnesami trwałymi, jest ciągnik GAD-1 (*Gentle Accumulator Drive 1*). Ciągnik otrzymał nagrodę w kategorii „Nowe Maszyny” podczas I Międzynarodowych Targów Górnictwa, Przemysłu Energetycznego i Hutniczego i został opisany na łamach miesięcznika „Napędy i Sterowanie” [2].



Rys. 4. Ciągnik GAD-1, lokomotywa LDa-31

Ciągnik wykorzystuje 8 zespołów napędowych złożonych z falownika oraz z silników synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi. Zespoły napędowe są zasilane z zespołu bateryjnego opartego na technologii litowo-jonowej.

Jest to system napędowy oparty na napędach popularnych w samochodach elektrycznych – wysoko wydajny silnik wzbudzany magnesami trwałymi + falownik + baterie litowo-jonowe. Ciągnik GAD-1 jest pierwszym ciągnikiem górniczym na świecie, w którym zastosowano tego typu napęd. Warto zwrócić uwagę, że napęd jest przystosowany i dopuszczony do pracy w strefach zagrożonych wybuchem pyłu węglowego oraz metanu. Napęd tego typu świetnie nadaje się do efektywnej rekuperacji energii podczas hamowania napędu. W przypadku GAD-1 rekuperacja energii przebiega w czasie zjazdu ciągnika w dół szybu.

Kolejnym przykładem zastosowania silników z magnesami trwałymi w napędzie górniczym jest kolejka Ld-31 (rysunek 4).

Zastosowanie silnika wzbudzanego magnesami trwałymi pozwoliło między innymi na zmniejszenie masy napędu, zwiększenie jego mocy oraz zwiększenie jego sprawności.

W tabeli 1 przedstawiono parametry znamionowe silnika standardowego LD1327a, stosowanego w lokomotywie Ld-31 z silnikiem PMPG-20L, opracowanym przez instytut KOMEL

Podsumowanie

Silniki wzbudane magnesami trwałymi są obecnie powszechnie spotykane w wielu gałęziach przemysłu, gdzie dzięki swoim zaletom pozwoliły na rozwój nowych technologii oraz otworzenie na nowe możliwości zastosowań napędów elektrycznych.

Tabela 1. Zestawienie parametrów znamionowych silnika wzbudzanego magnesami trwałymi z silnikiem oryginalnie stosowanym

	KOMEL PMPg-250L	LD1327a
Moc znamionowa P_N	60 kW	45 kW
Napięcie znamionowe U_N	120 V	250 V
Prąd znamionowy I_N	312 A	205 A
Moment znamionowy T_N	550 Nm	398 Nm
Prędkość obrotowa n_N	1080 obr./min	1080 obr./min
Sprawność η_N	93%	87%
Masa	572 kg0	645 kg

Zdaniem wielu specjalistów silniki tego typu stanowią również przyszłość dla napędów trakcyjnych kopalń.

Wraz z postępem technologicznym oraz rosnącymi wymaganiami efektywności i ekonomii napędów spotykanych w kopalniach zastosowanie zoptymalizowanego napędu z silnikiem wzbudzanym magnesami trwałymi staje się coraz bardziej zasadne.

Dzięki swoim zaletom silniki tego typu mogą wyprzeć obecnie stosowane silniki górnicze.

Do tej pory silniki trakcyjne tego typu zostały wprowadzone w dwóch aplikacjach górniczych: w podwieszonym ciągniku GAD-1 oraz w lokomotywie dołowej Ld-31.

Prowadzony przez instytut KOMEL wraz z partnerami projekt badawczy ma na celu przetestowanie możliwości zastosowania silników wzbudanych magnesami trwałymi w różnych aplikacjach napędów górniczych. Wybrany napęd zostanie wykonany w postaci modelu fizycznego oraz przetestowany w warunkach laboratoryjnych.

Kolejne publikacje przedstawiają wyniki symulacji pracy wybranych napędów górniczych z silnikami standardowymi oraz z silnikami wzbudzonymi magnesami trwałymi.

Literatura

- [1] PIECZORA E.: *Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego*. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [2] SKUPIEŃ K., MRÓZ J., KRAKOWCZYK B., BERNATT J., DUKALSKI P.: *GAD-1 – podwieszany ciągnik górniczy nowej generacji*. „Napędy i Sterowanie” 10/2013.
- [3] MRÓZ J., SKUPIEŃ K., DRWIĘGA A., BUDZYŃSKI Z., POLNIK B., CZERNIAK D., DUKALSKI P., BRYMORA L.: *Ciągnik górniczy GAD – nowe możliwości w rozwoju techniki górniczej*. „Przegląd Elektrotechniczny” 06/2013.

Projekt „Wprowadzenie wysoko sprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dołowych maszyn górniczych”, współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju zgodnie z umową PBS2/B4/10/2014

mgr inż. Piotr Dukalski

Instytut Maszyn i Napędów Elektrycznych KOMEL,
e-mail: p.dukalski@komel.katowice.pl

artykuł recenzowany