

Piotr Kisielewski, KISIELEWSKI Sp. z o.o., Wrocław  
 Edward Pacholski, Marek Leśnik, KGHM Polska Miedź S.A., Polkowice  
 Tomasz Zawilak, Jan Zawilak, Politechnika Wroclawska, Wrocław  
 Mateusz Żeleźnik, Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o., Wrocław

## KONSTRUKCJA, WYKONANIE I PRÓBY TYPOSZEREGU PROTOTYPÓW DUŻYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OF PROTOTYPES SERIES OF LARGE SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

**Streszczenie:** Prezentowany artykuł przedstawia nowość na skalę światową: silniki synchroniczne dużej mocy z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim przeznaczone do ciężkich rozruchów. W pracy przedstawiono aktualne problemy z eksploatacją napędów młynów bębnowych. Pokazano sposoby na ich rozwiązania, a także przedstawiono poziomy sprawności osiągnięte przez te silniki w odniesieniu do dotychczasowych rozwiązań.

**Abstract:** This article presents a world novelty: high power synchronous motors with permanent magnet direct starting for heavy starts. The paper presents the current problems with the operation with the ball mills. Article contains information how to resolve the operational problems and presents the levels of efficiency achieved by the motors in relation to existing solutions.

**Słowa kluczowe:** silniki synchroniczne, silniki z magnesami trwałymi, młyny bębnowe  
**Keywords:** synchronous motors, permanent magnets motors, ball mills

#### 1. Wstęp

Do niedawna w napędach dużych mocy o szczególnie trudnym rozruchu stosowano silniki pierścieniowe asynchroniczne lub silniki pierścieniowe asynchroniczne synchronizowane typu SAS. Znakomita większość takich napędów znajduje się w zakładach przemysłu ciężkiego: górnictwo, cementownie, itp.

Oddział Zakłady Wzbogacania Rud w Polkowicach ma trzy niezależne zakłady produkcyjne: Rejon ZWR Lubin, Rejon ZWR Polkowice, Rejon ZWR Rudna. W ciągłej eksploatacji znajdują się 93 sztuki silników typu SAS i DS. W zdecydowanej większości – 87 sztuk – służy do napędu młynów bębnowych, a 6 sztuk napędza kruszarki młotkowe.

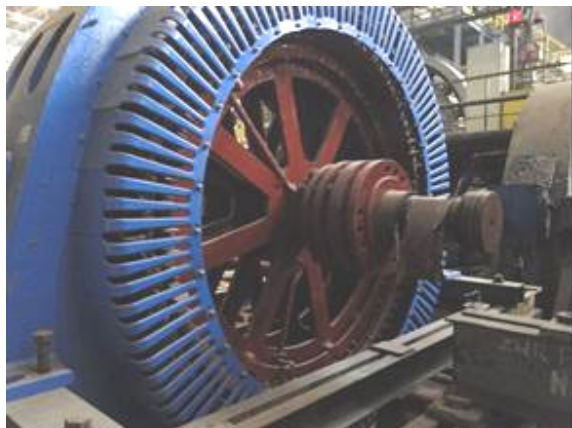
W Rejonie Lubin pracują 24 sztuki, w Rejonie Polkowice 27 sztuk, w Rejonie Rudna 42 sztuki.

Są to silniki asynchroniczne synchronizowane typu SAS na napięcie 6kV, o mocach 400 kW (12 szt.), 630 kW (36 szt.) oraz 1250 kW (35 szt.). Ich prędkość obrotowa to 187,5 obr/min oraz silniki typu DS (produkcji radzieckiej, o budowie bardzo zbliżonej do SAS), na napięcie 6kV, o mocach 900 kW

(2 szt.), 1100 kW (5 szt.), 1120 kW (3 szt.) i prędkości obrotowej 166,6 obr/min.

Większość z nich została wyprodukowana w latach siedemdziesiątych dwudziestego wieku. Mają one w większości za sobą czterdzieści lat eksploatacji. Należy podkreślić, że proces produkcji ZWR jest procesem ciągłym - 24 godziny na dobę, przez niemal wszystkie dni w roku. Postoje poszczególnych urządzeń są najczęściej planowymi postojami remontowymi i serwisowymi. Dla zobrazowania w Rejonie Rudna na 36 młynów ciągle pracuje 32 sztuki. W nieodległej przeszłości było, że pracowało ich 35.

Hale młynowni są środowiskiem trudnym eksploatacyjnie bo mielenie jest procesem na mokro. W budynkach panuje bardzo duża wilgotność, zapylenie, atmosfera zawiera także chemiczne opary będące wynikiem stosowanej technologii produkcji. Występującym stale zagrożeniem jest zalanie (zachłapanie) silnika wodą technologiczną lub nadawą procesu technologicznego. Praktycznie każde zalanie uzwojeń tych silników może spowodować uszkodzenie izolacji i konieczność wymiany całego silnika.



Rys. 1. Widok silnika typu SAS po remoncie



Rys. 2. Widok silnika typu SAS w otoczeniu urządzeń technologicznych

Silniki budowy otwartej są szczególnie wrażliwe na warunki środowiskowe podczas eksploatacji. Kilkudziesięcioletnia praca jednostek napędowych w tak trudnych warunkach, pomimo przeprowadzanych napraw i remontów, doprowadziła do poważnego zużycia silników. Podstawowym problemem jest utrzymywanie odpowiednich wartości stanu izolacji uzwojeń silników. Słaby stan techniczny przekłada się w wielu przypadkach na bardzo szybki spadek stanu izolacji po zatrzymaniu. Silniki w takich sytuacjach wymagają długotrwałego „suszenia”. W procesie suszenia silników wykorzystywane są różne metody: wbudowanymi grzałkami, prądem wzbudzenia, niskim napięciem 500V przyłączanym do uzwojenia stojana oraz zewnętrznymi nagrzewnicami. Konsekwencją długotrwałego suszenia izolacji silników są wydłużające się postoje młynów bębnowych i kruszarek, co negatywnie wpływa na realizację zadań produkcyjnych [7]. Pracujące silniki wyprodukowane zostały ze znamionową sprawnością rzędu 90-93%.

Z uwagi na lata ich produkcji, kilkudziesięcioletnią eksploatację w trudnych warunkach, prowadzone remonty, należy przyjąć, że ich sprawność uległa zmniejszeniu o kilka procent (nawet o 5%).

Rosnące ceny energii elektrycznej, światowe i europejskie wysiłki i wytyczne dotyczące ochrony środowiska naturalnego, wymuszają na odbiorcach energii dokładną analizę efektywności energetycznej stosowanych urządzeń i technologii.

Młyny bębnowe napędzane silnikami SAS są największymi odbiornikami energii elektrycznej w Oddziale Zakłady Wzbogacania Rud. Koszty energii stanowią jedną z najpoważniejszych pozycji w rachunku kosztów. W skali całego przedsiębiorstwa podejmowanych jest wiele inicjatyw mających na celu zmniejszenie energochłonności procesów produkcyjnych, a tym samym zmniejszania kosztów produkcji. Pogarszający się stan techniczny silników SAS, rosnące koszty remontów oraz pragmatyczne podejście do efektywności energetycznej procesów produkcyjnych, skłoniły kierownictwo zakładu do wywołania szerszej dyskusji na temat wypracowania i przyjęcia na najbliższe lata najlepszego kierunku działania, szczególnie w Rejonach ZWR Polkowice i Rudna.

## 2. Propozycja nowych silników napędowych młyny bębnowe

Nowe możliwości budowy silników o lepszych parametrach eksploatacyjnych dostrzeżono również w Polsce. Z inicjatywy prof. dr hab. inż. Andrzeja Demenko z Zakładu Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej powołano konsorcjum, które podjęło się wykonania badań oraz opracowania zagadnień nt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”. Ze względu na możliwości wykonania badań laboratoryjnych zespoły zajmowały się zagadnieniami konstrukcji i budowy głównie maszyn małej mocy.

W zespole Politechniki Wrocławskiej kierowanym przez prof. Jana Zawilaka dostrzeżono możliwości i potrzeby budowy energooszczędnych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o dużych i bardzo dużych mocach. W Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych podjęto badania, których celem było poszerzenie wiedzy nt. energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi dużych mocy, o nowych

strukturach obwodów magnetycznych wzbudzanych magnesami trwałymi, a ich wdrożenia pozwolą na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Dużym orędownikiem i propagatorem tych prac był mgr inż. Ryszard Biernacki, Dyrektor Naczelny ds. Inżynierii Produkcji KGHM Polska Miedź S.A.

W wyniku wspólnych działań pracowników Politechniki Wrocławskiej, Oddz. Zakłady Wzbogacania Rud oraz Dolnośląskiej Fabryki Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o., będącej kontynuatorem 70-letniej tradycji DoIMel-u, na rzecz wyprodukowania serii prototypów wysokosprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim do napędów młynów bębnowych.

Koncepcję, obliczenia elektromagnetyczne oraz konstrukcję magnetowodu opracował dr inż. Tomasz Zawilak [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Projekt w zakresie fizycznego wykonania tych silników wykonano, wykorzystując duże doświadczenia, pod kierownictwem dr inż. Piotra Kisielewskiego (patent nr P 392813 „Sposób montażu silnika z magnesami trwałymi oraz przyrząd do montażu i demontażu magnesów trwałych w maszynach synchronicznych dużej mocy”).

Opracowano i wykonano silniki 32-biegunowe serii SMH-1732 o mocach 400, 630 i 1250 kW. Silniki te wyprodukowano w ramach umowy nr GEKON2/O2/268341/4/2015 o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego w ramach programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych pt. „Konstrukcja, wykonanie i próby typoszeregu prototypów dużych silników synchronicznych z magnesami trwałymi”. Projekt jest dofinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej [8].

Silniki te zainstalowano w ciągu technologicznym Zakładów Wzbogacania Rud w Polkowicach i poddano najtrudniejszym próbom eksploatacyjnymi. Badania te nadzorowali pracownicy Politechniki Wrocławskiej, firmy: KISIELEWSKI Sp. z o.o., Dolnośląskiej Fabryki Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o. oraz Zakładu Wzbogacania Rud.

Wyprodukowane, nowoczesne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim mają niespotykaną na skalę światową bardzo dużą efektywność energetyczną. Ich zastosowanie znacznie zmniejsza koszty inwestycji i użytkowania w stosunku do roz-

wiązań stosowanych dotychczas przez fakt, iż nie wymagają stosowania żadnych układów wzbudzenia i układów rozruchowych. Układy zasilania takich silników są takie same jak w silnikach indukcyjnych klatkowych. Specjalna konstrukcja prętowego uzwojenia rozruchowego [10, 11] umożliwia skuteczne wykonanie rozruchu i synchronizacji, pomimo obecności strumienia wzbudzenia od magnesów trwałych.

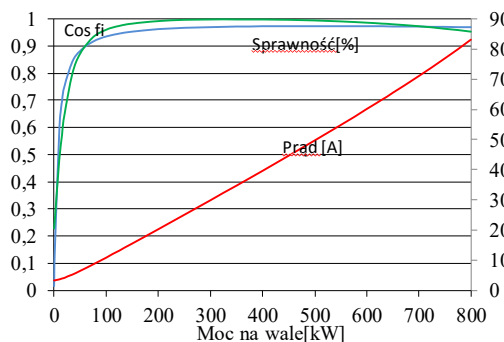


Rys. 3. Widok silnika typu SMH-1732S (1250 kW) zainstalowany na stanowisku MD-323 w Oddz. Zakłady Wzbogacania Rud Polkowice

Należy podkreślić, że zastosowana forma konstrukcji silnika zapewniająca pełną zamienność montażową w miejsce zainstalowanych w KGHM Polska Miedź S.A. silników asynchronicznych synchronizowanych typu SAS. Nowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, wyprodukowane w Dolnośląskiej Fabryce Maszyn Elektrycznych Sp. z o. o., mają duży stopień ochrony silnika (IP54) ułatwiają znacznie ich eksploatację przez: wyeliminowanie dużego ryzyka zawilgocenia izolacji lub zalania silnika, konieczności regularnych wymian szczotek i panewek, uciążliwego i czasochłonnego montażu silnika na stanowisku (szczególnie w zakresie centrowania wirnika w przypadku wystąpienia owali na średnicy wewnętrznej stojana), kosztowne i w niektórych przypadkach czasochłonne naprawy systemu wzbudzenia. Mniejszy gabaryt silnika pozwala na lepsze wykorzystanie przestrzeni wokół maszyn, lepszy dostęp obsługi, polepszenie kontroli urządzeń i czynności sprawdzających [9].

Podstawową zaletą silników serii SMH-1732 jest ich bardzo duża sprawność – nie tylko przy obciążeniu znamionowym, ale przede wszystkim w szerokim zakresie obciążenia. Silniki te najczęściej obciążane są mocą w zakresie 50-100% obciążenia znamionowego (różnica między wartością minimalną i maksymalną sprawności wynosi tylko 0,3-0,4%). Są to parametry

nieosiągalne dla żadnych innych typów silników elektrycznych dostępnych na świecie mogących pracować z młynami bębnowymi. Wykresy sprawności, współczynnika mocy i prądu pobieranego z sieci w funkcji obciążenia pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres: sprawności, współczynnika mocy i prądu pobieranego z sieci w funkcji obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu SMH-1732T (630 kW)

### 3. Podsumowanie

Przez zastosowanie nowych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi osiągnięto zakładane efekty ekologiczne i ekonomiczne. Porównując niektóre koszty eksploatacji silników synchronicznych z magnesami trwałymi (na przykładzie silnika SMH-1732S, 1250 kW) oraz obecnie stosowanych silników typu SAS można stwierdzić, że:

- sprawność dla obciążenia 75% (średniego obciążenia stwierdzonego podczas prób) wynosi 97,80% i jest większa o 9,27%,
- średnie roczne zużycie energii wynosi 7,7 GWh i jest mniejsza o 8,49%,
- roczny koszt energii elektrycznej zużytej przez silnik typu SMH-1732S jest mniejszy ok. 210 000 PLN,
- roczna ilość wytworzonego CO<sub>2</sub> (przy produkcji tej energii elektrycznej) jest mniejsza o ok. 854 tony.

Dodatkowe korzyści możliwe do uzyskania przez użytkownika:

- możliwość pozyskania białych certyfikatów z tytułu zrealizowania inwestycji proekologicznej o wartości ponad 800 000 PLN na silnik,
- zmniejszenie kosztów eksploatacji, remontów i serwisowania urządzeń,
- znaczne polepszenie dostępności do nowych silników przez obsługę, przez co poprawia bezpieczeństwo pracy.

Zaproponowane nowoczesne, innowacyjne na skalę światową, energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi serii SMH-1732 mogą sprostać wymaganiom zgłaszanych przez wiele lat przez KGHM Polska Miedź S.A. oraz spełniają wymagania programu (i wymogi ustawy) dot. efektywności energetycznej. Doświadczenie zebrane w trakcie realizacji tego projektu pozwala Dolnośląskiej Fabryce Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o. na skuteczne oferowanie i wykonanie wysokosprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi dla dowolnych innych zastosowań w Polsce i na świecie.

### Literatura

- [1]. INOVA Centrum Innowacji Technicznych Sp. z o.o. : *Opracowanie pt. Ekspertyza stanu technicznego sieci i urządzeń elektroenergetycznych w O/ZWR*. Lubin, styczeń 2006 r.
- [2]. Pacholski E.: *Koncepcja modernizacji układów napędowych młynów bębnowych w KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakłady Wzbogacania Rud w Polkowicach – stan aktualny i propozycje modernizacji* – Polkowice, czerwiec 2006 r. – opracowanie wewnętrzne.
- [3]. KOMEL.: *Opracowania nr CS4-050060 pt. Analiza techniczno-ekonomiczna wymiany jednostek napędowych kruszarek młotkowych w O/ZWR*. Katowice, listopad 2011.
- [4]. KOMEL.: *Sprawozdanie nr TL/029/O/07 Ekspertyza sprawności silników napędowych młynów w O/ZWR – Sosnowiec, październik 2007*.
- [5]. Pacholski E.: *Analiza możliwości poprawy niezawodności jednostek napędowych młynów bębnowych w dotychczasowej infrastrukturze technicznej w KGHM Polska Miedź S.A. O/ZWR Polkowice*. Polkowice – styczeń 2012 – opracowanie wewnętrzne.
- [6]. Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*. Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 58 2005 r.
- [7]. Pacholski E., Leśnik M.: *Eksploatacja silników typu SAS w KGHM Polska Miedź SA O/ZWR w Polkowicach. Doświadczenia, problemy, działania przyszłościowe*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 1/2012 (94), s. 153-157.
- [8]. Żeleźnik M.: *RAPORT KONCOWY z realizacji Fazy B+R projektu w ramach Programu Gekon - Generator Koncepcji Ekologicznych*. Wrocław – luty 2016 – opracowanie wewnętrzne.
- [9]. Pacholski E.: *Silniki z przyszłością*. Polkowice – marzec 2016, Gazeta Pracowników KGHM Polska Miedź S.A. „Miedzian” Nr 5/2016 (158), str. 5.
- [10]. Zawilak Tomasz: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet ma-*

chines. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 177-179.

[11]. Zawilak Tomasz: *Wykorzystanie efektu wypierania prądu w rozruchu bezpośrednim maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2012, nr 32, s. 105-111.

[12]. Zawilak Tomasz: *Wpływ kształtu szczeliny powietrznej na właściwości silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. 2011, nr 93, s. 137-142.

[13]. Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Wpływ warunków zasilania na parametry eksploatacyjne silnika z magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. 2015, nr 108, s. 185-190.

[14]. Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 1, s. 224-226.

[15]. Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Energooszczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi*. Przegląd Elektrotechniczny. 2015, R. 91, nr 10, s. 117-120.

### Autorzy

dr inż. Piotr Kisielewski  
KISIELEWSKI Sp. z o.o., Wrocław  
office@kisielewski.pl

inż. Marek Leśnik  
Szttygar Oddziałowy ZWR Rejon Rudna marek.lesnik@kghm.com  
Główny Inżynier ZWR ds. Utrzymania Ruchu  
– kierownik Działu Utrzymania Ruchu

mgr inż. Edward Pacholski  
Główny Inżynier ZWR ds. energetycznych i utrzymania ruchu – kierownik Wydziału Energetycznego i Utrzymania Ruchu  
edward.pacholski@kghm.com

dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr  
jan.zawilak@pwr.edu.pl

dr inż. Tomasz Zawilak  
tomasz.zawilak@pwr.edu.pl  
Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław

Mateusz Żeleźnik

Dyrektor Handlowy, Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o., Wrocław  
office@dfme.pl

Pracę wykonano w ramach umowy nr GEKON2/O2/268341/4/2015 o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego w ramach programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych pt. „Konstrukcja, wykonanie i próby typoszeregu prototypów dużych silników synchronicznych z magnesami trwałymi”. Projekt jest dofinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

