

Platforma badawcza napędów górniczych z silnikiem synchronicznym wzbudzany magnesami trwałymi

Andrzej Dzikowski, Tomasz Gąsior, Jacek Przybyłka, Piotr Dukalski, Tomasz Jarek

Wstęp

Silniki synchroniczne, wzbudzone magnesami trwałymi, są obecnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu, w coraz większym zakresie aplikacji. Konsorcjum złożone z instytutów ITI EMAG, INiME KOMEL oraz DFME DAMEL opracowało prototypowe modele silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi typu IPMSM (*Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor*) do zastosowania w napędzie posuwu górniczego kombajnu ścianowego [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Do celów badawczych została opracowana i wytworzona platforma, której możliwości badawcze są zaprezentowane w artykule. Platforma pozwoliła na przeprowadzenie badań nowo opracowanych silników. W tym celu na platformie zostały umieszczone dwa nowo opracowane silniki typu dSMKwsK 180M-4 połączone wałami poprzez momentomierz, służący do pomiaru momentu przekazywanego pomiędzy silnikami oraz pulpit sterowniczy, której widok przedstawia fot. 1 oraz rys. 1.



Fot. 1. Widok platformy badawczej



Fot. 2. Widok pulpitu sterowniczego

Streszczenie: Artykuł prezentuje możliwości badawcze platformy wyposażonej w dwa bliźniacze silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi typu IPMSM, zesprężlone ze sobą poprzez momentomierz. Na platformie badawczej jeden z silników stanowi obciążenie dla drugiego badanego silnika, przy czym konfiguracja, który silnik napędza, a który obciąża, jest dowolna. Silnik obciążający może obciążać silnik badany momentem stałym lub modulowanym, charakterystycznym np. dla napędu posuwu górniczego kombajnu ścianowego. W artykule zostały również przedstawione parametry obciążenia sieci zasilającej przez platformę badawczą, jakie wystąpiły w trakcie próbnego nagrzewania silnika badanego typu dSMKwsK 180M-4 o mocy projektowej 70 kW w czasie pracy ciągłej S1, obciążonego mocą mechaniczną 78 kW.

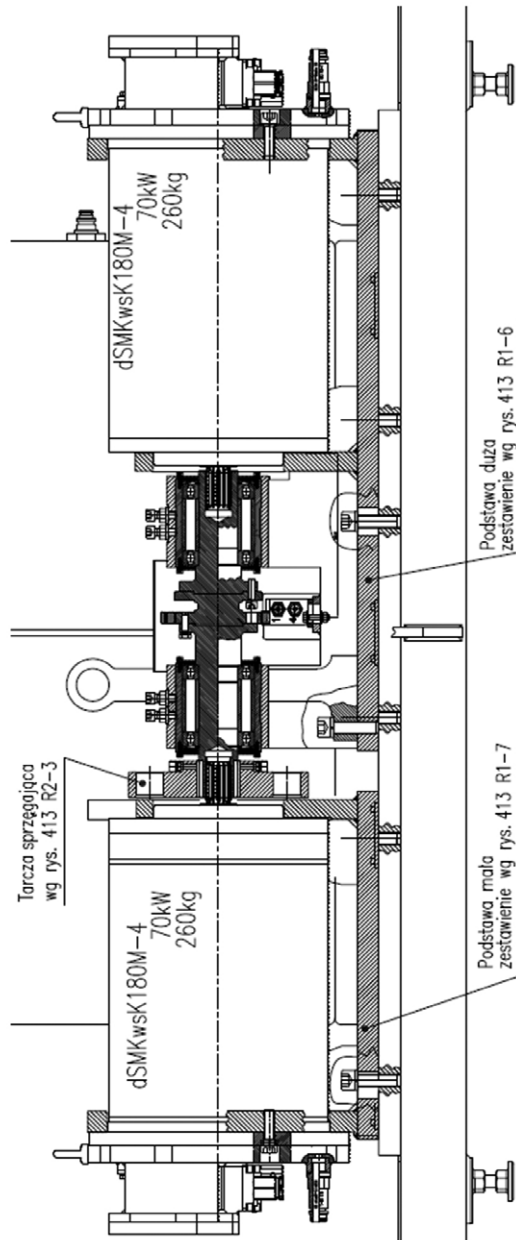
Słowa kluczowe: silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi IPMSM, przekształtnik częstotliwości, kombajn ścianowy

RESEARCH PLATFORM FOR MINING DRIVES WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: The article presents research platform equipped with two Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motors, connected to each other via a coupling and measuring shaft. On the research platform one motor is a burden for the other. The configuration with motor it is the test of the engine and with is a burden is arbitrary. The engine may impose burdensome tested engine torque constant or modulating characteristic, eg. for the feed drive mining shearer. The article also presented the parameters load the mains through a research platform which occurred during engine warm-up test of the type dSMKwsK 180M-4 with a projected power 70 kW during continuous operation S1, loaded with 78 kW of mechanical power.

Keywords: Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, inverter, longwall shearer

Silnik widoczny na fot. 1 po prawej stronie w czasie badań był wykorzystywany jako silnik obciążający i został mu przypisany skrócony akronim: M1. Silnik widoczny po lewej stronie w czasie badań był wykorzystywany jako silnik napędowy



Rys. 1. Schemat platformy badawczej – sprzęgnięte maszyny badane

(badany) i został mu przypisany skrócony akronim: M2. Platforma jest przystosowana do zasilania napięciem 3-fazowym $3 \times 500 \text{ V}$, 50 Hz.

2. Sterowanie platformą badawczą

Platforma badawcza jest wyposażona w pulpit sterowniczy (fot. 2), wyposażony w sterownik programowalny MODICON M340 wraz z dotykowym panelem operatorskim, który umożliwia dokonywanie nastaw parametrów i odczyt wartości mierzonych.

Platforma badawcza do wykonania badań wymaga doprowadzenia napięcia zasilania oraz doprowadzenia i odprowadzenia wody chłodzącej zarówno przekształtnik częstotliwości, jak i silniki (silnik badany oraz silnik wymuszający obciążenie).

Po włączeniu napięcia zasilania na dotykowym panelu operatorskim jest wizualizowana platforma badawcza (fot. 3).



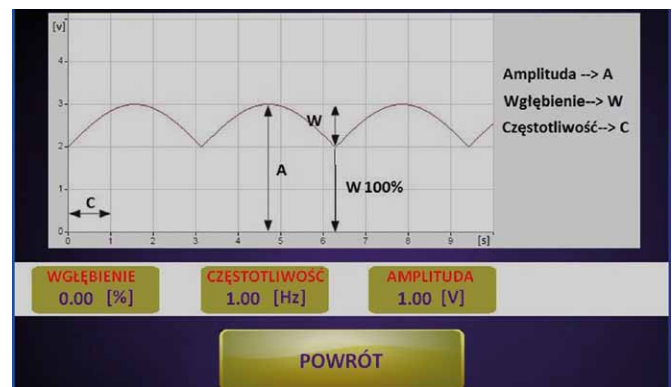
Fot. 3. Wizualizacja platformy badawczej

Platforma badawcza umożliwia konfigurację parametrów pracy zamontowanych maszyn, określenie, który z silników ma pełnić jaką rolę (maszyna napędzająca lub obciążająca), wybór kierunku obrotów. Wszelkie nastawy są dostępne na panelu operatorskim (fot. 4).



Fot. 4. Okno konfiguracji

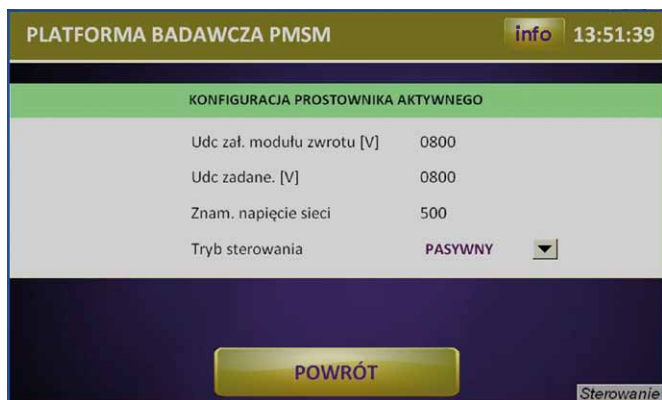
W oknie konfiguracji możemy skonfigurować np. parametry momentu obciążenia silnika badanego. Moment może być stały lub modulowany, a przykładowy charakter modulacji występujący w napędzie posuwu kombajnu ścianowego został przedstawiony na fot. 5.



Fot. 5. Okno obciążenie

Platforma badawcza jest wyposażona w specjalizowany, dwufalownikowy przekształtnik częstotliwości zasilający silniki,

którego prostownik może pracować w dwóch trybach pracy (pasywny, aktywny), (fot. 6).



Fot. 6. Okno konfiguracji prostownika

Po dokonaniu wszystkich niezbędnych konfiguracji możemy uruchomić silniki na platformie z ustawionymi parametrami pracy. Silniki rozpoczną pracę, a na panelu operatorskim jest możliwa zmiana podstawowych parametrów pracy, jak prędkość obrotowa i moment obciążenia (fot. 7).



Fot. 7. Okno sterowania platformą

3. Pomiary parametrów pracy platformy badawczej

W trakcie prowadzenia badań zespół badawczy ma możliwość stałego podglądu parametrów pracy platformy badawczej, takich jak: temperatura wody chłodzącej na wlocie i wylocie (zarówno przekształtnika częstotliwości, jak i silników),



Fot. 8. Temperatury występujące na platformie badawczej

temperatury uzwojeń (czujniki temperatur w czołach uzwojeń), temperatura enkodera inkrementalnego (zabudowanego w korpusie silnika), (fot. 8).

Także aktualne przepływy wody chłodzącej silniki i przekształtnik częstotliwości są dostępne na panelu operatorskim (fot. 9).



Fot. 9. Przepływy wody chłodzącej

Są również obliczane moce strat ciepła odprowadzane z silników i przekształtnika częstotliwości poprzez wodę chłodzącą (fot. 10).



Fot. 10. Moce strat ciepła

Na panelu operatorskim mogą być również prezentowane trendy podstawowych parametrów pracy platformy badawczej, występujące w czasie ostatniej godziny pracy.

Na fot. 11 są przedstawione np. trendy temperatur silników.



Fot. 11. Trendy temperatur silników

Oprócz wymienionych parametrów podstawowych, możliwy jest również podgląd bardziej szczegółowych parametrów pracy silników, informujących o wartościach napięć międzyfazowych i prądów fazowych maszyn, napięciu w obwodzie DC, odtwarzanym momencie obrotowym, prędkości obrotowej maszyn, prądów w osiach d i q oraz kącie sterowania β . Bieżący podgląd tych parametrów pozwala na ocenę pracy zespołu napędowego przekształtnik – silnik, działania algorytmu sterującego oraz obserwowania pracy napędu i dostosowanego algorytmu sterowania w obu strefach regulacji (w strefie stałego momentu oraz strefie osłabiania wzbudzenia), (fot. 12).



Fot. 12. Okno z podstawowymi parametrami pracy falowników zasilających silniki

4. Pomiary parametrów zasilania platformy badawczej

Platforma badawcza została wyposażona w wyłącznik Compact NSX250F 3P wraz z członem pomiarowym Micrologic 6.2E 250A, który umożliwia pomiar parametrów zasilania platformy badawczej i wizualizację danych pomiarowych na zamontowanym na pulpicie sterowniczym platformy wyświetlaczu rozdzielnicowym typu FDM121. Równocześnie zainstalowany na platformie badawczej sterownik programowalny typu MODICON M340 komunikuje się z członem pomiarowym wyłącznika Compact za pomocą sieci Modbus RTU, umożliwiając wyświetlanie danych pomiarowych na panelu operatorskim platformy.

W czasie próbnego nagrzewania badanego silnika M2 zostały wykonane zdjęcia wartości parametrów zasilania platformy badawczej zmierzone za pomocą członu pomiarowego wyłącznika Compact i wizualizowanych na panelu operatorskim. Wyłącznik Compact ma jeszcze jedną ważną cechę, a mianowicie zapamiętuje również maksymalne wartości pomierzonych parametrów, co jest przydatne do określenia zapotrzebowania mocy platformy badawczej.

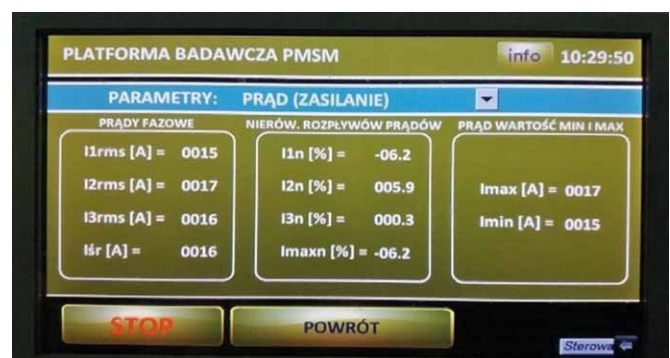
Na fot. 13 są przedstawione parametry pracy platformy badawczej. Silnik badany M2 jest wizualizowany na panelu operatorskim z indeksem 1, ponieważ jest zasilany z falownika 1. Jak widać w prezentowanym oknie parametrów, wartość skuteczna prądu silnika M2 wynosi 128 A. Silnik obciążający M1, który jest wizualizowany na platformie badawczej z indeksem 2, obciąża silnik badany M2 mocą mechaniczną wynoszącą 77,9 kW, pracuje jako prądnica z wartością skuteczną prądu



Fot. 13. Wizualizacja parametrów pracy platformy badawczej

wynoszącą 115 A i zwraca moc elektryczną poprzez falownik 2 do wspólnego obwodu pośredniego DC przekształtnika częstotliwości.

Na fot. 14 są przedstawione parametry prądów zasilania platformy badawczej, które mierzy człon pomiarowy wyłącznika Compact w tym czasie.



Fot. 14. Parametry prądów zasilania platformy badawczej

Jak widać, na panelu operatorskim (fot. 14) prezentowanych jest wiele parametrów prądów zasilania platformy badawczej. Są prezentowane m.in.: wartości skuteczne prądów fazowych, wartość średnia tych prądów, wartość minimalna i maksymalna wartości średniej oraz nierównomierności rozplywu prądów.

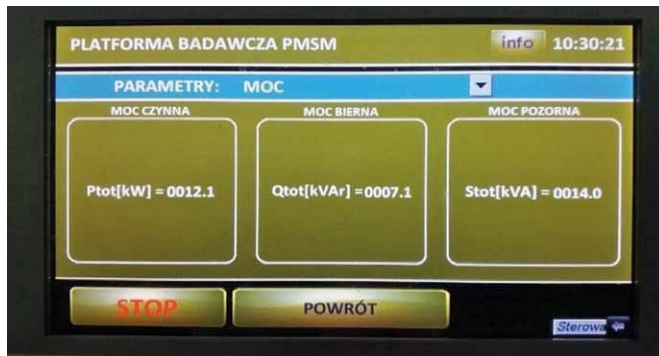
Na fot. 15 są przedstawione parametry napięć zasilania platformy badawczej, które mierzy człon pomiarowy wyłącznika Compact. Jak widać, na panelu operatorskim (fot. 15) prezentowanych jest również wiele parametrów napięć zasilania



Fot. 15. Parametry napięć zasilania platformy badawczej

platformy badawczej. Są prezentowane m.in.: wartości skuteczne napięć międzyfazowych, wartość średnia tych napięć, wartość minimalna i maksymalna wartości średniej oraz nierównomierności napięć zasilających.

Na fot. 16 są przedstawione parametry mocy pobieranej przez platformę badawczą z sieci zasilającej, które mierzy człon pomiarowy wyłącznika Compact. Jak widać, na panelu operatorskim (fot. 16) prezentowana jest moc czynna pobierana przez platformę badawczą, moc bierna, jaką platforma obciąża sieć zasilającą, i moc pozorna.



Fot. 16. Parametry mocy pobieranej przez platformę badawczą z sieci zasilającej

Na fot. 17 są przedstawione parametry współczynników mocy zasilania platformy badawczej, które mierzy człon pomiarowy wyłącznika Compact.

Jak widać, na panelu operatorskim (fot. 17) są prezentowane dwa współczynniki mocy zasilania platformy badawczej.



Fot. 17. Współczynnik mocy zasilania platformy badawczej

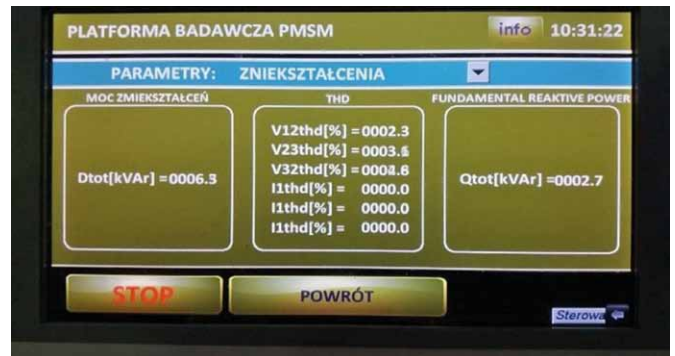
Pierwszym jest współczynnik mocy uwzględniający wszystkie harmoniczne, tzw. *Power Factor*, definiowany jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej, czyli:

$$PF = P/S$$

Drugim jest współczynnik mocy uwzględniający tylko podstawową harmoniczną sieci (50 Hz), tzw. *Fundamental Power Factor* lub *Displacement Power Factor*, definiowany jako cosinus kąta przesunięcia pomiędzy prądem i napięciem podstawowej harmonicznej sieci, czyli:

$$\cos \varphi_1 = DPF = P/S_1$$

Na fot. 18 są przedstawione parametry zniekształceń napięć sieci zasilającej i zniekształceń wnoszonych przez platformę badawczą, które mierzy człon pomiarowy wyłącznika Compact.



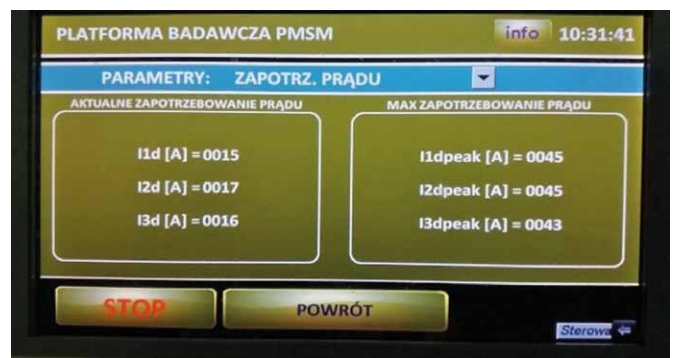
Fot. 18. Zniekształcenia napięć sieci i wnoszone przez platformę badawczą

Jak widać, na panelu operatorskim (fot. 18) prezentowane są w centralnej części wartości zniekształceń napięć sieciowych zasilających platformę badawczą oraz wartości zniekształceń prądów fazowych, jakimi platforma obciąża sieć zasilającą. Po lewej stronie jest prezentowana moc zniekształceń, tzw. moc deformacji *D*, definiowana jako:

$$D^2 = S^2 - P_1^2$$

Po prawej stronie jest prezentowana moc bierna podstawowej harmonicznej (*Fundamental Reactive Power*).

Na fot. 19 przedstawione są parametry zapotrzebowania prądu platformy badawczej. Po lewej stronie jest prezentowane aktualne zapotrzebowanie w postaci wartości skutecznych prądów fazowych, a po prawej stronie maksymalne zapotrzebowanie w postaci maksymalnych wartości skutecznych prądów fazowych, które pomierzył w przeszłości człon pomiarowy wyłącznika Compact.



Fot. 19. Zapotrzebowanie prądu platformy badawczej

Na fot. 20 są przedstawione parametry zapotrzebowania mocy platformy badawczej. Po lewej stronie jest prezentowane aktualne (całkowite) i maksymalne zapotrzebowanie platformy w postaci mocy czynnej. W części środkowej jest prezentowane aktualne (całkowite) i maksymalne zapotrzebowanie platformy w postaci mocy biernej. Po prawej stronie jest prezentowane aktualne (całkowite) i maksymalne zapotrzebowanie platformy

w postaci mocy pozornej, które mierzy aktualnie i pomierzył w przeszłości wyłącznik Compact.



Fot. 20. Zapotrzebowanie mocy platformy badawczej

5. Pomiary charakterystyk obciążenia badanego silnika na platformie badawczej

W ramach prowadzonych badań zostały wykonane pomiary mające na celu wyznaczenie charakterystyk pracy oraz map sprawności badanego silnika dSMKwsK 180M-4.

W tabeli 1 przedstawiono parametry pracy silnika w punkcie znamionowym dla dwóch trybów pracy prostownika. W tym celu platforma badawcza została wyposażona w szerokopasmowy analizator mocy NORMA D6000. Wraz z zastosowanymi dedykowanymi przetwornikami prądowymi przyrząd umożliwił pomiar takich parametrów elektrycznych maszyny badanej, jak: napięcie międzyfazowe (wartość skuteczna oraz pierwsza harmoniczna), natężenie prądu w poszczególnych fazach (wartości skuteczne oraz pierwsza harmoniczna), moc czynna, bierna i pozorna, a także współczynnik mocy oraz częstotliwość. Zainstalowany na platformie badawczej momentomierz T40B produkcji HBM umożliwił również pomiar momentu obrotowego. Prędkość obrotowa wyznaczana była na podstawie częstotliwości prądu silnika. Na podstawie powyższych parametrów obliczana była moc mechaniczna na wale, a także sprawność silnika. Pomiar wszystkich parametrów odbywał się jednocześnie w trybie synchronicznym, co umożliwiło uśrednianie poszczególnych parametrów w tych samych okresach czasu (będących wielokrotnością okresów sygnałów pomiarowych).

Tabela 1. Parametry znamionowe silnika dla trybu pracy prostownika: pasywny, aktywny

dSMKwsK 180M-4		
Tryb pracy prostownika:	pasywny	aktywny
P_n [kW]	70	94
U_n [V]	400	540
I_n [A]	110	110
n_n [obr./min]	2250	3000
T_n [Nm]	300	300
η [%]	95	93,6

Badania silnika zostały przeprowadzone zarówno dla trybu pracy prostownika pasywnego, jak i aktywnego, chociaż na etapie projektowania silnika nie zakładano pracy aktywnej prostownika, dlatego też obwód elektromagnetyczny był projektowany na napięcie niższe niż zapewnia tryb aktywny.

Z perspektywy charakterystyk pracy badanego silnika oba tryby różnią się napięciem zasilania, którym falownik jest w stanie zasilić silnik. Maksymalne napięcie zasilania determinuje tzw. punkt bazowy, stanowiący granicę zakresu pracy ze stałym momentem.

Przy założonym stałym kącie β (kąt fazowy pomiędzy fazorem prądu I a wektorem smm wirnika F_f) oraz stałej wartości fazora prądu, wraz ze wzrostem mechanicznej prędkości kątowej następuje liniowy wzrost:

- siły elektromotorycznej E_0 indukowanej w uzwojeniu twornika;
- napięcia rotacji E_i indukowanej w uzwojeniu przez wypadkowy strumień magnetyczny główny w szczelinie powietrznej;
- w efekcie wzrost napięcia zasilania U aż do wartości maksymalnej, jakie jest w stanie dostarczyć falownik lub źródło zasilania.

Tryb pracy z prostownikiem aktywnym pozwala na zwiększenie zakresu pracy ze stałym znamionowym momentem obrotowym, co powinno umożliwić pracę napędu posuwu kombajnu z większą prędkością obrotową, co wiąże się z korzyściami wydajnościowymi. Dlatego w rozpatrywanej aplikacji zasadne jest, aby punkty bazowe ustalić jako punkty znamionowe. Dla prędkości obrotowych wyższych niż prędkość bazowa silniki pracują przy tzw. odwzbudaniu [8].

Dla prędkości większych niż prędkość bazowa możliwe jest takie sterowanie wskazem prądu zasilania I , przy jednoczesnym utrzymaniu stałej wartości jego modułu, aby jego składowa podłużna powodowała spadek napięcia o zwrocie przeciwnym do E_0 . Ponieważ zakładamy taką samą wartość prądu zasilania I (stały moduł) dla obu stref sterowania, wraz z rozpoczęciem odwzbudania i wzrostem składowej podłużnej naturalnie maleje wartość składowej poprzecznej, generującej moment obrotowy. W efekcie możliwe jest osłabianie głównego strumienia magnetycznego oraz redukcja potrzebnego napięcia zasilania silnika do np. wartości maksymalnej, jaką jest w stanie zapewnić falownik, co pozwala na zwiększenie prędkości obrotowej kosztem obniżenia momentu obrotowego.

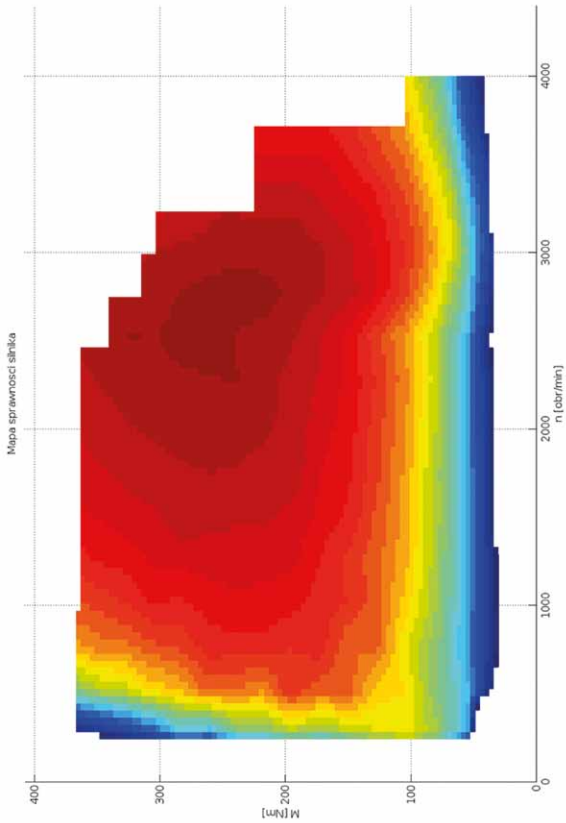
Maksymalna prędkość dla obu trybów pracy prostownika jest taka sama, determinowana prędkością maksymalną kombajnu oraz parametrami mechanicznymi.

Przedstawione na rys. 2 i 3 mapy sprawności pozwalają na odczytanie sprawności w różnych punktach pracy silników (dla różnych obciążeń, przy różnych prędkościach obrotowych).

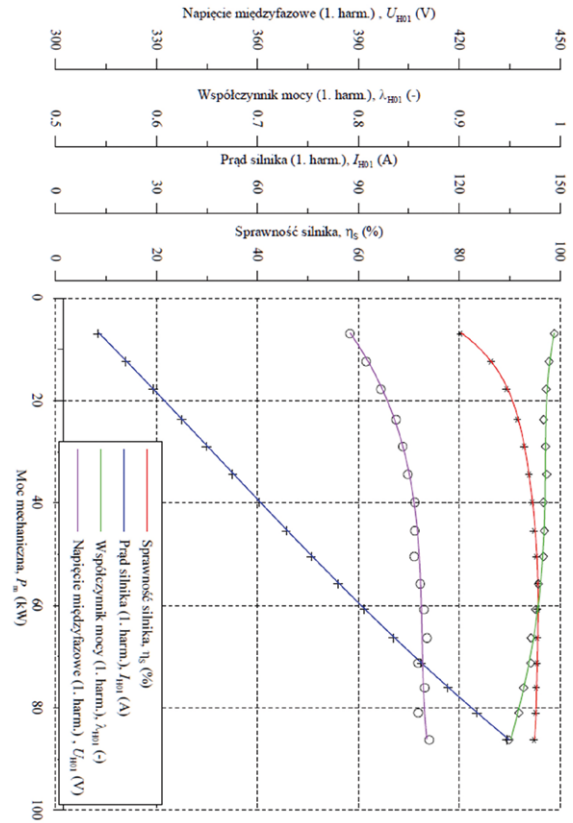
Można zauważyć, że dla pracy prostownika w trybie aktywnym (zwiększone maksymalne napięcie zasilania silnika) obszar najwyższych sprawności – zakres 94–96% – jest poszerzony w kierunku zakresu wyższych prędkości obrotowych z uwagi na przesunięcie strefy odwzbudania.

Podsumowanie

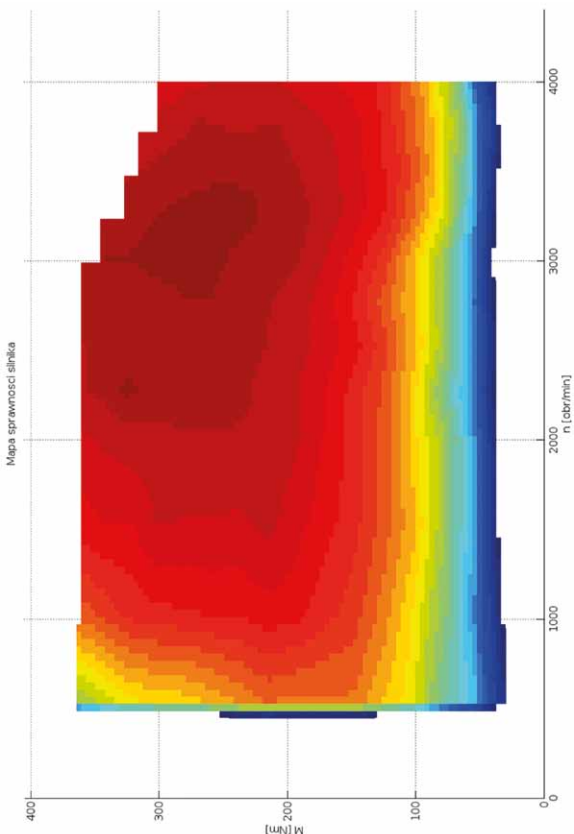
Na podstawie powyżej przedstawionych wyników widać, że platforma badawcza umożliwiła bardzo ekonomiczne



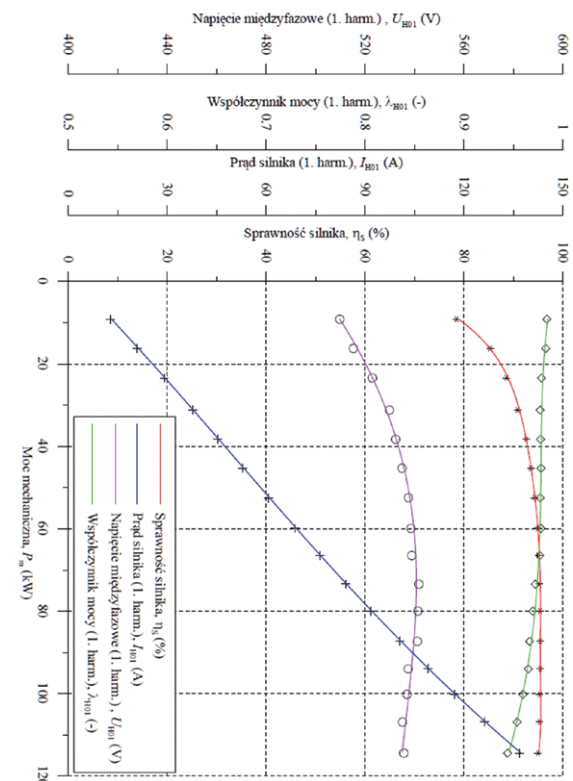
Rys. 2. Wyznaczona mapa sprawności silnika dla pracy prostownika w trybie pasywnym



Rys. 4. Zmierzona charakterystyka obciążenia dla znamionowej prędkości obrotowej $n = 2250$ obr./min, prostownik pasywny



Rys. 3. Wyznaczona mapa sprawności silnika dla pracy prostownika w trybie aktywnym



Rys. 5. Zmierzona charakterystyka obciążenia dla znamionowej prędkości obrotowej $n = 3000$ obr./min, prostownik aktywny

przeprowadzenie badań silników. Pomimo zainstalowanych na platformie dwóch silników o mocy projektowej 70 kW (140 kW), pracujących na platformie w czasie przeprowadzonego próbnego nagrzewania silnika M2 w przeciążeniu z mocą mechaniczną rzędu 2×78 kW (156 kW), moc czynna pobierana z sieci zasilającej przez platformę wynosiła średnio 12,1 kW, a w czasie rozpędzania silników osiągnęła maksymalnie wartość 14,2 kW. Należy jednocześnie nadmienić, że badania silników na platformie mogą być prowadzone w całym zakresie prędkości obrotowych silników 0–4000 obr./min, w bardzo szerokim zakresie momentów obciążenia 0360 Nm (1,2 krotności momentu znamionowego silników). Zatem do przeprowadzenia badań silników nie trzeba dysponować siecią zasilającą o dużej wydajności, gdyż zapotrzebowanie mocy przez platformę badawczą jest poniżej 20 kW. Obciążenie sieci zasilającej prądem również jest niewielkie w czasie badań silników na platformie, ponieważ nie przekracza wartości 25 A, przy prądach silników na poziomie 130 A i pracy prostownika przekształtnika częstotliwości w trybie aktywnym. Jedynie podczas załączania napięcia zasilania platformy, podczas ładowania kondensatorów obwodu pośredniego przekształtnika częstotliwości, wartość skuteczna prądu sieci osiąga 45 A.

Wykonane badania na zaprezentowanej platformie badawczej pozwoliły na określenie parametrów nowo opracowanego silnika, w tym jego map sprawności. Silnik przy zwiększonym dopuszczalnym napięciu zasilania jest w stanie zaoferować moment znamionowy przy znacznie wyższej prędkości obrotowej (wyższej o 33%), przy sprawności powyżej 93,5%.

Literatura

- [1] DZIKOWSKI A.: *Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 94/2012.
- [2] DZIKOWSKI A., HEFCZYC M., KOZŁOWSKI A.: *Energooszczędne napędy maszyn górniczych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zasilanymi z przemienników częstotliwości*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 98/2013.
- [3] DZIKOWSKI A., HEFCZYC M., KOZŁOWSKI A.: *Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi*. „Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa” 1/2014.
- [4] DZIKOWSKI A., DUKALSKI P., ROSSA R.: *Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation model*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [5] DZIKOWSKI A., DUKALSKI P., ROSSA R.: *Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation of operation*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [6] DUKALSKI P., GAWRON S., DZIKOWSKI A.: *Wysoko sprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 102/2014.
- [7] DUKALSKI P., ROSSA R., DZIKOWSKI A.: *Górnicy silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie posuwu kombajnu ścianowego – symulacje pracy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 111/2016.
- [8] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych Komel, 2010.

Praca współfinansowana ze środków NCBiR zgodnie z umową PBS2/B4/10/2014 jako projekt badawczy pt.: *Wprowadzenie wysoko sprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dółowych maszyn górniczych*.

dr inż. Andrzej Dzikowski – e-mail: a.dzikowski@ibemag.pl
 mgr inż. Tomasz Gąsior – e-mail: t.gasior@ibemag.pl
 Instytut Technik Innowacyjnych EMAG;
 mgr inż. Jacek Przybyłka – e-mail: j.przybylka@damel.com.pl
 Dąbrowska Fabryka Maszyn Elektrycznych DAMEL;
 mgr inż. Piotr Dukalski – e-mail: p.dukalski@komel.katowice.pl
 mgr inż. Tomasz Jarek – e-mail: t.jarek@komel.katowice.pl
 Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany

reklama

Napędzaj z nami przemysł

www.nis.com.pl