

Metody wyznaczania charakterystyki maksymalnego momentu i maksymalnej mocy mechanicznej w pracy ciągłej S1 silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi

Andrzej Dzikowski

1. Wstęp

Zaprezentowana w artykule metoda wyznaczania przebiegu charakterystyki maksymalnego momentu i maksymalnej mocy mechanicznej w pracy ciągłej S1 silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi typu IPMSM (*Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor*) została przedstawiona na przykładzie pomiarów wykonanych na modelach fizycznych silników przeznaczonych do napędu ciągnięcia górniczego kombajnu ścianowego [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Na wspólnej platformie badawczej zostały umieszczone dwa silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi typu dSMKwsK 180M-4, połączone wałami poprzez momentomierz oraz pulpit sterowniczy. Widok platformy przedstawia fot. 1.

Silnik widoczny na fot. 1 po prawej stronie w czasie badań był wykorzystywany jako silnik obciążający i został mu przypisany skrót akronim: M1. Silnik widoczny po lewej stronie w czasie badań był wykorzystywany jako silnik napędowy (badany) i został mu przypisany skrót akronim: M2.



Fot. 1. Widok platformy badawczej

2. Straty biegu jałowego w silniku IPMSM

W celu pomiaru strat biegu jałowego silnika M2 dokonano jego rozsprzęglenia na platformie poprzez wyjęcie wałka bezpieczeństwa z silnika M2. Pomiary wykonywano dla obydwu kierunku obrotów silnika zasilanego z przekształtnika

Streszczenie: Artykuł prezentuje metody wyznaczania charakterystyki maksymalnego momentu i maksymalnej mocy mechanicznej w pracy ciągłej S1 silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi. Wyznaczanie powyższych charakterystyk bazuje na przeprowadzonej w punkcie znamionowym próbnego nagrzewania silnika w celu wyznaczenia dopuszczalnych warunków termicznych silnika oraz na wykonaniu pomiarów strat mocy biegu jałowego silnika. Na podstawie powyższych pomiarów są ustalane warunki brzegowe w postaci dopuszczalnej mocy strat ciepła, jaką można odprowadzić z silnika przy zastosowaniu chłodzenia wodnego o parametrach znamionowych oraz w postaci dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika. Na podstawie charakterystyki maksymalnego obciążenia momentem silnika wyznacza się charakterystykę maksymalnego obciążenia mocą mechaniczną, jaką można obciążyć silnik w pracy ciągłej S1. Uzyskane przebiegi charakteryzują w sposób jednoznaczny parametry mechaniczne silnika względem jego prędkości obrotowej.

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

METHODS OF DETERMINATION THE MAXIMUM TORQUE CHARACTERISTICS AND MAXIMUM MECHANICAL POWER CHARACTERISTICS IN PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR IN CONTINUOUS OPERATION S1

Abstract: The article presents the methods of determining the maximum torque characteristics and maximum mechanical power characteristics permanent magnets synchronous motor in continuous operation S1. Determination of these characteristics based on conducted at the point of the rated engine warm-up test to determine the limit of thermal engine and performance measurement of the power loss idling. On the basis of these measurements are set boundary conditions in the form of allowable power loss of heat which may be discharged from the engine using a water cooling parameters and rated as permissible rms current of the motor. On the basis of the maximum torque characteristics of motor determined the maximum mechanical power characteristics that can be load the motor in continuous operation S1. The resulting waveforms are characterized unambiguously mechanical parameters of the motor relative to its rotational speed.

Keywords: Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, inverter

reklama

Tabela 1. Pomiary biegu jałowego silnika M2 z wyjętym wałkiem bezpieczeństwa, kierunek obrotów w prawo

n [obr./min]	I_{sk} [A]	P_1 [W]
250	2,46	214,9
500	2,81	457,4
750	3,08	704,9
1000	3,33	945,4
1250	3,73	1191,8
1500	4,18	1427,5
1750	4,61	1687,5
2000	5,38	1956,4
2250	6,04	2275,4
2500	6,86	2607,2
2750	11,47	2718,1
3000	29,2	2777,4
3250	42,6	3119,3
3500	51,73	3547,6
3750	60,48	4109,4
4000	67,11	4728,1

Tabela 2. Pomiary biegu jałowego silnika M2 z wyjętym wałkiem bezpieczeństwa, kierunek obrotów w lewo

n [obr./min]	I_{sk} [A]	P_1 [W]
250	2,88	243,7
500	3,13	507,6
750	3,5	787,2
1000	3,7	1034,4
1250	4,1	1302,5
1500	4,59	1557,6
1750	5,04	1816,3
2000	5,7	2091,8
2250	6,37	2370,5
2500	7,24	2696,5
2750	12,54	2866,8
3000	31,33	2869,8
3250	44,18	3177,3
3500	53,91	3654,1
3750	61,5	4156,3
4000	68,68	4863,2

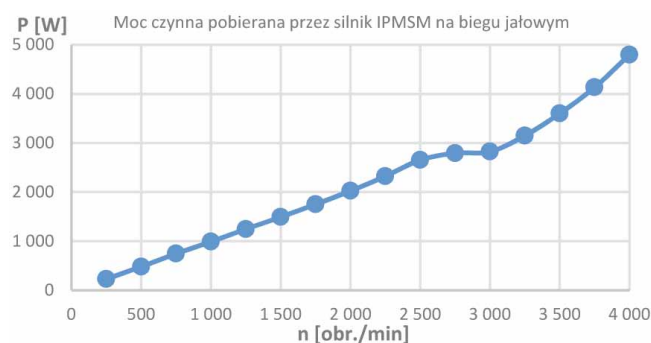
częstotliwości, dla prędkości obrotowej silnika w zakresie 250– 4000 obr./min co 250 obr./min. Uzyskane wyniki pomiarów są zamieszczone dla kierunku obrotów w prawo w tabeli 1, a dla kierunku obrotów w lewo w tabeli 2.

Mając pomierzoną wartość mocy czynnej P_1 , jaką pobiera podczas biegu jałowego silnik M2, podczas ustalonej prędkości dla obydwu kierunków obrotów, można narysować charakterystykę mocy czynnej pobieranej przez silnik na biegu jałowym, biorąc dla kolejnych prędkości uśrednione wartości mocy czynnej pobieranej dla obydwu kierunków obrotów silnika, co zostało przedstawione na rys. 1.

Ponieważ podczas biegu jałowego silnik nie wykonuje żadnej pracy mechanicznej, to charakterystyka mocy czynnej pobieranej przez silnik na biegu jałowym jest jednocześnie charakterystyką strat jałowych tego silnika. Straty jałowe w silniku IPMSM dzielimy na straty mechaniczne oraz na straty w rdzeniu (żelazie) i w uzwojeniu stojana (miedzi). Z kolei straty mechaniczne dzielimy na straty pochodzące od momentu zaczepowego i na straty związane z momentem tarcia w łożyskach.

3. Moment maksymalny w pracy ciągłej S1 silnika IPMSM

W celu wyznaczenia maksymalnego momentu obciążenia silnika w pracy ciągłej S1 wykonano próbę nagrzewania silnika z obciążeniem znamionowym (2250 obr./min, 337 Nm). Wynik tej próby wykazał, że bez przekroczenia dopuszczalnych temperatur wewnątrz silnika może zostać wydzielona moc cieplna wynosząca 5000 W, przy silniku chłodzonym wodą o parametrach znamionowego przepływu wynoszącego 10 l/min i temperaturze 30°C. Dla tak ustalonych warunków można wyznaczyć zależność maksymalnych strat obciążeniowych od prędkości obrotowej, jakie mogą zostać wydzielone w uzwojeniu silnika (rys. 2).



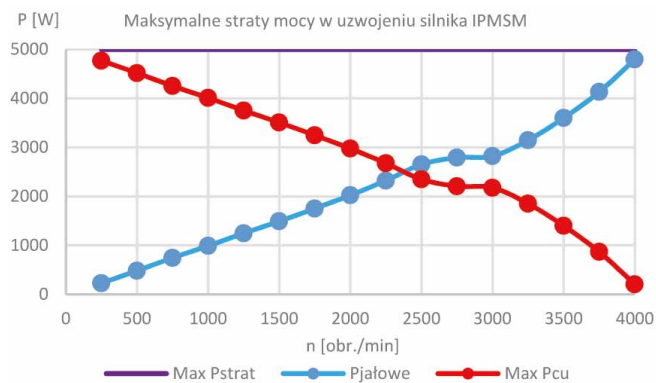
Rys. 1. Moc czynna pobierana przez silnik IPMSM na biegu jałowym

Maksymalne straty mocy w uzwojeniu silnika (Max Pcu – rys. 2) zostały uzyskane poprzez odjęcie od wyznaczonych w próbie nagrzewania mocy strat w silniku (5000 W), biegu jałowego przedstawionych na rys. 1.

Równocześnie przyjęto, że maksymalna wartość skuteczna prądu silnika nie może być wyższa, niż ta, dla której przeprowadzono próbę nagrzewania silnika (130 A). Dla tak określonych warunków brzegowych został określony przebieg maksymalnej wartości skutecznej prądu silnika od prędkości obrotowej (rys. 3).

Dla tak określonego przebiegu dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika w całym zakresie prędkości obrotowych zostały na drodze pomiarowej wyznaczone dopuszczalne momenty obciążenia silnika w pracy ciągłej S1 (rys. 4).

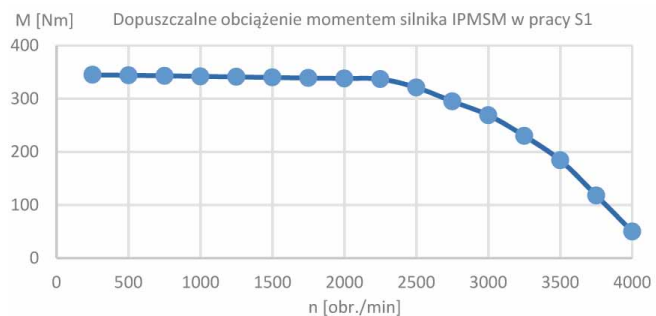
Analizując charakterystykę dopuszczalnego obciążenia momentem silnika IPMSM w pracy ciągłej S1, przedstawioną na rys. 4, można zauważyć, że silnik do prędkości $n = 2250$ obr./min może być obciążony stałą wartością momentu



Rys. 2. Maksymalne straty mocy w uzwojeniu silnika IPMSM



Rys. 3. Dopuszczalna wartość skuteczna prądu silnika IPMSM w pracy S1



Rys. 4. Dopuszczalne obciążenie momentem silnika IPMSM w pracy S1

obciążenia wynoszącą maksymalnie $M = 340 \text{ N} \cdot \text{m}$. Powyżej tej prędkości wartość dopuszczalnego momentu obciążenia maleje i dla prędkości $n = 3000 \text{ obr./min}$ wartość ta wynosi już tylko $M = 269 \text{ N} \cdot \text{m}$, a dla $n = 3500 \text{ obr./min}$ tylko $M = 184 \text{ N} \cdot \text{m}$.

4. Moc maksymalna w pracy ciągłej S1 silnika IPMSM

Określony podczas badań, z nagrzewaniem termicznym silnika, przebieg dopuszczalnego obciążenia momentem silnika IPMSM w pracy ciągłej S1, przedstawiony na rys. 4, determinuje przebieg mocy mechanicznej, jaką można obciążyć silnik IPMSM w pracy ciągłej S1 (rys. 5).

Analizując przebieg dopuszczalnego obciążenia mocą mechaniczną silnika IPMSM w pracy ciągłej S1, przedstawiony na

rys. 5, można zauważyć, że ze wzrostem prędkości obrotowej silnika moc mechaniczna wzrasta i przy prędkości obrotowej $n = 2250$ obr./min silnik dysponuje już mocą $P_m = 79,4$ kW. W przedziale prędkości $n = 2500 - 3000$ obr./min silnik dysponuje maksymalną mocą mechaniczną wynoszącą $P_{m \max} = 85$ kW. Powyżej prędkości 3000 obr./min moc mechaniczna silnika znacznie maleje i dla prędkości $n = 3500$ obr./min wynosi już tylko 67,4 kW.

Ponieważ w kombajnie KSW-460NE zapotrzebowanie mocy w napędzie ciągnienia przy urabianiu z najwyższą prędkością katalogową wynoszącą 20 m/min po wzniosie 35° wynosi około 81,5 kW (223 N·m, 3488 obr./min), to moc mechaniczna silnika IPMSM jest niewystarczająca. Ciągły proces urabiania może być zatem prowadzony, ale z ograniczoną prędkością do wartości około 18,5 m/min, co odpowiada prędkości obrotowej silnika około 3250 obr./min, przy której to prędkości silnik może być obciążony momentem 230 N·m.

Należy jednocześnie dodać, że maksymalna prędkość urabiania ściany węgla wznoszącej się pod kątem 35° przy zastosowaniu silnika asynchronicznego klatkowego typu dSKK(s) 180L4z, stosowanego obecnie w napędzie posuwu kombajnu typu KSW-460NE o mocy znamionowej 45 kW, wynosi maksymalnie 11,05 m/min (223 Nm, 1927 obr./min).

Przedstawiony na rys. 5 przebieg obciążenia mocą mechaniczną silnika IPMSM determinuje rzeczywiste, całkowite straty mocy P_c w silniku, które są przedstawione na rys. 6.

Na rys. 6 są również przedstawione rzeczywiste straty mocy w uzwojeniu silnika P_{cu} .

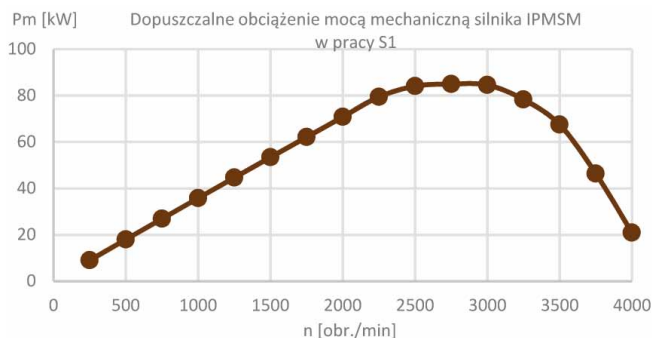
5. Podniesienie mocy maksymalnej w pracy ciągłej S1 silnika IPMSM

Podniesienie wartości skutecznej napięcia zasilania silnika pozwala na zwiększenie mocy maksymalnej w pracy ciągłej S1 silnika IPMSM. Poprzez zastosowanie prostownika aktywnego, zwiększającego wartość napięcia w obwodzie pośrednim przekształtnika częstotliwości do wartości 800 V (620 V dla prostownika pasywnego), uzyskano podniesienie maksymalnej wartości skutecznej napięcia na wyjściu falownika zasilającego silnik do wartości 3×565 V (3×440 V dla prostownika pasywnego). To z kolei pozwala na pracę silnika IPMSM w pierwszej strefie sterowania (ze stałym momentem) do prędkości 2900 obr./min (2250 obr./min dla prostownika pasywnego).

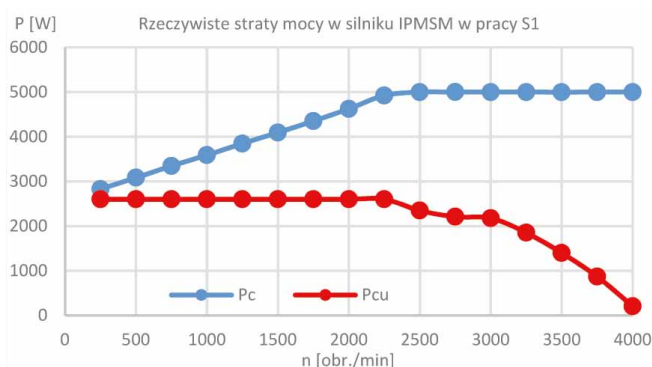
Dla nowych warunków zasilania silnika został wyznaczony przebieg dopuszczalnego momentu obciążenia silnika IPMSM w pracy ciągłej S1 (rys. 10), metodą opisaną powyżej.

Rozpoczęto od pomiaru strat biegu jałowego silnika IPMSM. Pomiary wykonywano dla obydwu kierunków obrotów silnika zasilanego z przekształtnika częstotliwości, którego prostownik pracował w trybie aktywnym. Uzyskane wyniki pomiarów są zamieszczone dla kierunku obrotów w prawo w tabeli 3, a dla kierunku obrotów w lewo w tabeli 4.

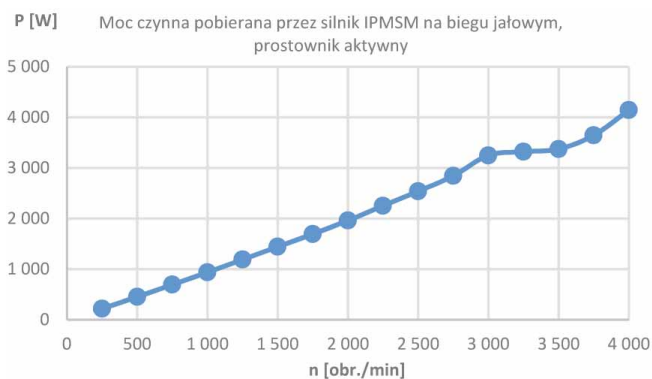
Biorąc dla kolejnych prędkości uśrednione wartości mocy czynnej pobieranej dla obydwu kierunków obrotów silnika, uzyskano uśrednioną dla obydwu kierunków obrotów charakterystykę mocy czynnej pobieranej podczas biegu jałowego silnika (rys. 7).



Rys. 5. Dopuszczalne obciążenie mocą mechaniczną silnika IPMSM w pracy S1



Rys. 6. Rzeczywiste straty mocy w silniku IPMSM w pracy S1



Rys. 7. Moc czynna pobierana przez silnik IPMSM na biegu jałowym, prostownik aktywny

Określono maksymalne straty mocy w uzwojeniu silnika (Max P_{cu} – rys. 8), które zostały uzyskane poprzez odjęcie od wyznaczonych w próbie nagrzewania mocy strat w silniku (5000 W) biegu jałowego przedstawionych na rys. 7.

Przyjęto taką samą maksymalną wartość skuteczną prądu silnika (130 A) i dla tak określonych warunków brzegowych został określony przebieg maksymalnej wartości skutecznej prądu silnika od prędkości obrotowej (rys. 9).

Tabela 3. Pomiary biegu jałowego silnika M2 z wyjętym wałkiem bezpieczeństwa, kierunek obrotów w prawo, prostownik aktywny

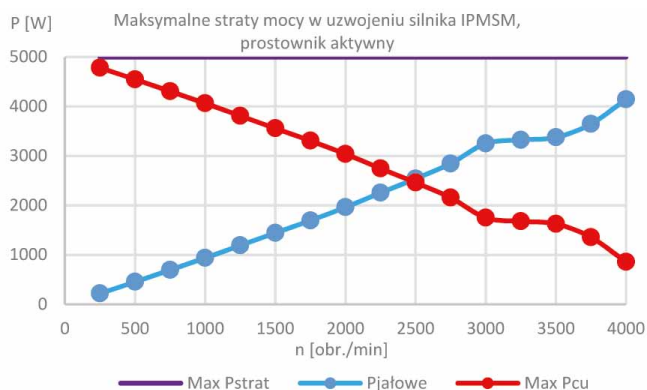
n [obr./min]	I_{sk} [A]	P_1 [W]
250	2,87	224,4
500	3,1	462,8
750	3,46	710,1
1000	3,59	949,2
1250	4,05	1202,6
1500	4,56	1463,1
1750	4,83	1709,9
2000	5,41	1972,4
2250	6,32	2285,9
2500	6,72	2555,1
2750	7,48	2857,9
3000	8,58	3248,9
3250	10,03	3351,3
3500	23,99	3357,8
3750	35,76	3641,8
4000	44,99	4158,1

Tabela 4. Pomiar biegu jałowego silnika M2 z wyjętym wałkiem bezpieczeństwa, kierunek obrotów w lewo, prostownik aktywny

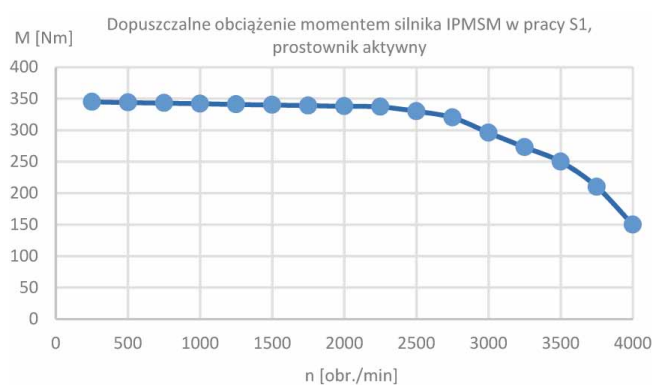
n [obr./min]	I_{sk} [A]	P_1 [W]
250	2,62	212,5
500	2,91	444,3
750	3,34	679,5
1000	3,56	926,7
1250	4	1178,4
1500	4,37	1424,3
1750	4,89	1678,6
2000	5,37	1950,5
2250	6	2221,6
2500	6,73	2524,6
2750	7,54	2832,2
3000	8,96	3249,3
3250	9,56	3293,2
3500	22,8	3391,7
3750	34,89	3650,9
4000	43,7	4130,2

reklama

reklama



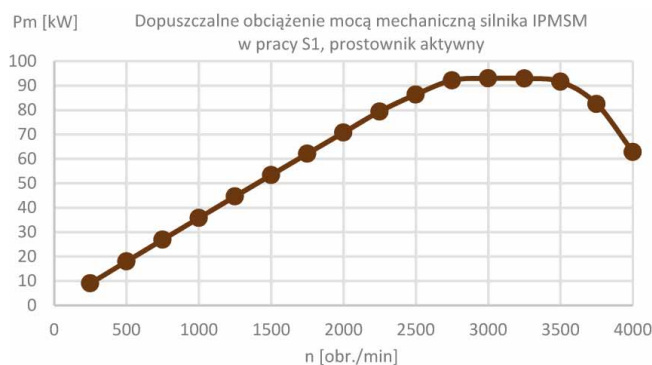
Rys. 8. Maksymalne straty mocy w uzwojeniu silnika IPMSM, prostownik aktywny



Rys. 10. Dopuszczalne obciążenie momentem silnika IPMSM w pracy S1, prostownik aktywny



Rys. 9. Dopuszczalna wartość skuteczna prądu silnika IPMSM w pracy S1, prostownik aktywny



Rys. 11. Dopuszczalne obciążenie mocą mechaniczną silnika IPMSM w pracy S1, prostownik aktywny

Następnie dla tak określonego przebiegu dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika w całym zakresie prędkości obrotowych zostały na drodze pomiarowej wyznaczone dopuszczalne momenty obciążenia silnika w pracy ciągłej S1 (rys. 10).

Analizując przebieg dopuszczalnego obciążenia momentem silnika IPMSM w pracy ciągłej S1, przedstawiony na rys. 10, można zauważyć, że silnik do prędkości $n = 2250$ obr./min może być obciążony stałą wartością momentu obciążenia wynoszącą maksymalnie $M = 340$ Nm. Powyżej tej prędkości wartość dopuszczalnego momentu obciążenia maleje i dla prędkości $n = 3000$ obr./min wartość ta wynosi $M = 296$ Nm (269 Nm dla prostownika w trybie pasywnym), a dla $n = 3500$ obr./min już tylko $M_{bc} = 250$ Nm (184 Nm dla prostownika w trybie pasywnym). Porównując zatem powyższe wartości dla dwóch trybów pracy prostownika, widać, że praca aktywna prostownika pozwala na łagodniejsze zmniejszanie dopuszczalnego momentu obciążenia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika.

Przebieg dopuszczalnego obciążenia momentem silnika IPMSM w pracy ciągłej S1, przedstawiony na rys. 10, determinuje przebieg mocy mechanicznej, jaką można obciążyć model silnika IPMSM w pracy ciągłej S1 (rys. 8).

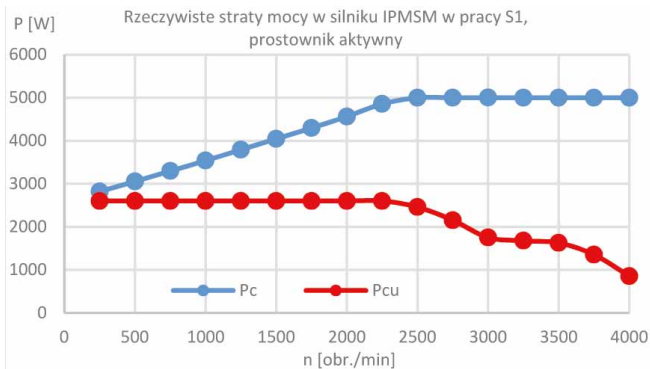
Analizując przebieg mocy, można zauważyć, że ze wzrostem prędkości obrotowej silnika moc mechaniczna wzrasta do

prędkości obrotowej $n = 2750$ obr./min. W przedziale prędkości obrotowych $n = 2750 - 3500$ obr./min silnik dysponuje maksymalną mocą mechaniczną wynoszącą $P_m \max = 92$ kW (85 kW dla prostownika w trybie pasywnym). Powyżej prędkości 3500 obr./min moc mechaniczna silnika maleje i dla prędkości $n = 3750$ obr./min wynosi już tylko 82,5 kW. Porównując zatem powyższe wartości dla dwóch trybów pracy prostownika, widać, że praca aktywna prostownika pozwala na wzrost mocy maksymalnej silnika (z 85 do 92 kW), która jest dostępna dla najwyższych zakresów prędkości użytecznych silnika. Jest to dobra cecha, ponieważ w napędzie ciągnienia kombajnu KSW-460NE zapotrzebowanie mocy w napędzie ciągnienia przy urabianiu z prędkością 20 m/min po wzniosie 35° wynosi około 81,5 kW (223 Nm, 3488 obr./min). Proces urabiania może być zatem prowadzony nawet dla najwyższej prędkości katalogowej kombajnu przy pracy prostownika przekształtnika częstotliwości w trybie aktywnym.

Przedstawiony na rys. 11 przebieg obciążenia mocą mechaniczną silnika IPMSM determinuje rzeczywiste, całkowite straty mocy P_c w silniku, które są przedstawione na rys. 12.

Na rys. 12 są również przedstawione rzeczywiste straty mocy w uzwojeniu silnika Pcu.

Porównując rzeczywiste straty mocy w uzwojeniu silnika IPMSM zasilanego wyższym napięciem (prostownik aktywny)



Rys. 12. Rzeczywiste straty mocy w silniku IPMSM w pracy S1, prostownik aktywny

z przypadkiem poprzednim, zauważamy, że podniesienie napięcia spowodowało zmniejszenie składowej prądu biernego silnika (osłabiającej wzbudzenie), potrzebnej dla wysokich prędkości obrotowych przy pracy silnika w drugiej strefie sterowania (z osłabianym strumieniem głównym silnika). To z kolei spowodowało możliwość podniesienia składowej czynnej prądu silnika (wytwarzającej moment napędowy) i tym samym uzyskanie wyższego momentu napędowego silnika przy tych samych stratach całkowitych w silniku (5000 W).

Podsumowanie

Przedstawiona metoda wyznaczania charakterystyki maksymalnego momentu obciążenia silnika w pracy ciągłej S1 bazuje na przeprowadzonej w punkcie znamionowym próbnego nagrzewania silnika w celu wyznaczenia dopuszczalnych warunków termicznych silnika oraz na wykonaniu pomiarów strat mocy biegu jałowego silnika. Na podstawie powyższych pomiarów są ustalane warunki brzegowe w postaci dopuszczalnej mocy strat ciepła, jaką można odprowadzić z silnika przy zastosowaniu chłodzenia wodnego o parametrach znamionowych oraz w postaci dopuszczalnej wartości skutecznej prądu silnika. Na podstawie charakterystyki maksymalnego momentu obciążenia silnika wyznacza się charakterystykę maksymalnej mocy mechanicznej, jaką można obciążyć silnik

w pracy ciągłej S1. Uzyskane przebiegi charakteryzują w sposób jednoznaczny parametry mechaniczne silnika względem jego prędkości obrotowej.

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 dołowych maszyn górniczych.*

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.

Andrzej Dzikowski - Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

artykuł recenzowany

reklama