

**Andrzej Dzikowski**  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

## **METODA ROZDZIAŁU STRAT POSZCZEGÓLNYCH W SILNIKACH SYNCHRONICZNYCH WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI**

### **THE METHOD OF DISTRIBUTION LOST POWER IN PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR**

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje metodę rozdziału strat poszczególnych w silnikach synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, na przykładzie rozdziału strat w silniku przeznaczonym do zastosowania w napędzie posuwu kombajnu ścianowego. W artykule jest przedstawiona metodologia rozdziału strat wraz ze zwróceniem uwagi na aspekty wpływu poszczególnych strat na ogólną sprawność silnika. W artykule została również przedstawiona metoda eliminacji błędów wnoszonego przez momentomierz o zakresie pomiarowym dostosowanym do pomiaru momentu znamionowego silnika oraz metoda identyfikacji i wyznaczenia statycznego momentu zasprzężenia występującego w przypadku zesprzężenia w pozycji wymuszonej dwóch silników wzbudzanych magnesami trwałymi i eliminacji błędów wynikających z tego tytułu.

**Abstract:** The article presents a method of individual power losses distribution in permanent magnets synchronous motors, for example lost power distribution in a motor destination for the advancement drive of a longwall shearer. The article features a methodology of loss separation with emphasis on the impact of particular losses on the overall efficiency of the motor. In addition, the article presents a method to eliminate the error brought by the measuring system whose measuring range is adapted to measure the rated torque of the motor. Finally, the article discusses a method to identify and determine the static moment of clutching occurring in the forced-position configuration of two motors excited by permanent magnets and the elimination of error resulting due to this situation.

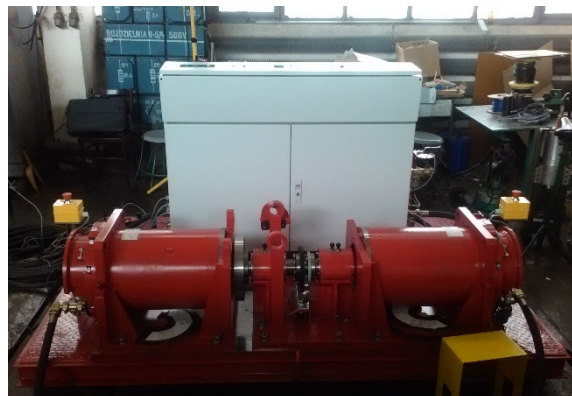
**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi IPMSM, przekształtnik częstotliwości, kombajn ścianowy

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

## **1. Wstęp**

Zaprezentowana w artykule metoda rozdziału strat poszczególnych dotyczy silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi typu IPMSM (Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) i została przedstawiona na przykładzie pomiarów wykonanych na modelach fizycznych silników przeznaczonych do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Na wspólnej platformie badawczej zostały umieszczone dwa silniki synchroniczne wzbudane magnesami trwałymi typu dSMKwsK 180M-4 połączone wałami poprzez momentomierz oraz pulpit sterowniczy, której widok przedstawia rys.1.

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



Rys.1. Widok platformy badawczej

## **2. Straty biegu jałowego w silniku IPMSM**

W celu pomiaru strat biegu jałowego silnika M2 dokonano jego rozprzężenia na platformie poprzez wyjęcie wałka bezpieczeństwa z silnika M2. Pomiary wykonywano dla obydwu kierunków obrotów silnika zasilanego z przekształtnika 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 tab.1, a dla kierunku w lewo w tab.2.

Mając pomierzoną wartość mocy czynnej  $P_1$  jaką pobiera w czasie biegu jałowego silnik M2 podczas ustalonej prędkości dla obydwu kierunków obrotów można narysować charakterystykę mocy czynnej pobieranej w stanie biegu jałowego tego silnika biorąc dla kolejnych prędkości uśrednione wartości mocy czynnej pobieranej dla obydwu kierunków obrotów silnika, co zostało przedstawione na rys.2.

Tab. 1. Pomiarzy biegu jałowego silnika M2 z wyjętym wałkiem bezpieczeństwa, kierunek obrotów w prawo

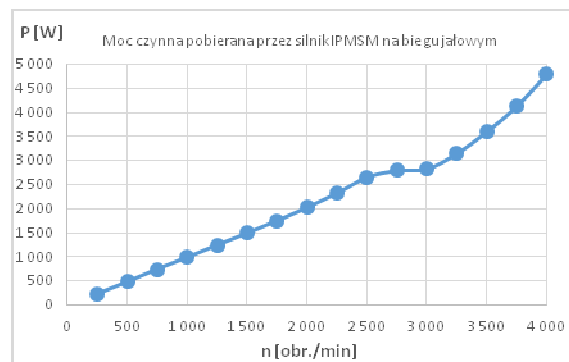
n [obr./min]	$I_{sk}$ [A]	$P_1$ [W]
250	2,46	214,9
500	2,81	457,4
750	3,08	704,9
1000	3,33	945,4
1250	3,73	1191,8
1500	4,18	1427,5
1750	4,61	1687,5
2000	5,38	1956,4
2250	6,04	2275,4
2500	6,86	2607,2
2750	11,47	2718,1
3000	29,2	2777,4
3250	42,6	3119,3
3500	51,73	3547,6
3750	60,48	4109,4
4000	67,11	4728,1

Tab. 2. Pomiarzy 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

Ponieważ w czasie biegu jałowego silnik M2 nie wykonuje żadnej pracy mechanicznej ( $P_m = 0$ ), to charakterystyka mocy czynnej pobieranej przez silnik w stanie biegu jałowego 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.

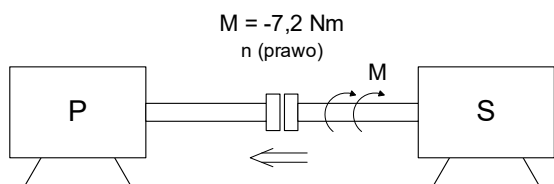


Rys. 2. Moc czynna pobierana w czasie biegu jałowego silnika M2

### 3. Moment zaczepowy i statyczny moment zasprężenia silników IPMSM

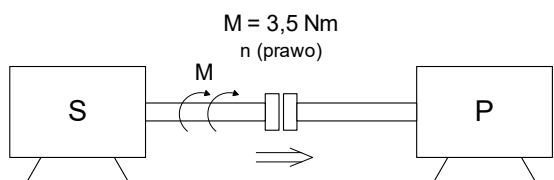
W celu wyznaczenia momentu zaczepowego i statycznego momentu zasprężenia silników IPMSM wykonano pomiary na platformie badawczej. Ponieważ na platformie badawczej są ze sobą zesprężlone za pomocą sprzęgieł zębatych o uzębieniu ewolwentowym dwa silniki wzbudzone magnesami trwałymi to zesprężlone są one ze sobą w pozycji wymuszonej (liczba stopni swobody zasprężenia jest skwantowana ilością zębów sprzęgieł). Taka wymuszona pozycja zesprężenia silników powoduje istnienie niezerowego momentu zasprężenia. Wartości tego momentu nie można pominąć, ponieważ może mieć ona znaczny (kilkunastoprocentowy) wpływ na wyniki pomiarów momentu przekazywanego pomiędzy silnikami. Ponieważ momentomierz zastosowany na platformie badawczej, który służy do pomiaru momentu przekazywanego pomiędzy silnikami, ma zakres pomiarowy do 1000 Nm to pomimo, iż momentomierz jest przyrządem pomiarowym bardzo dokładnym (klasy 0,1), to i tak przy takim zakresie pomiarowym dopuszczalny błąd pomiaru momentu wynosi 1 Nm. W celu wyeliminowania błędu wnoszonego przez momentomierz oraz błędu wynikającego z momentu zasprężenia wykonano pomiary w czterech konfiguracjach przedstawionych na rysunkach poniżej, dla niskiej prędkości obrotowej wynoszącej 100 obr./min. Ponieważ na platformie badaw-

czej są zesprężlone ze sobą dwa identyczne modele silników to można domniemać, że ich opory ruchu są identyczne. Najpierw wykonano pomiar momentu przekazywanego przez momentomierz dla umownego kierunku obrotów w prawo, gdzie silnikiem napędzającym był silnik M2 (znajdujący się po prawej stronie stojąc za pulpitem sterowniczym), a silnikiem napędzanym silnik M1 (znajdujący się po lewej stronie stojąc za pulpitem sterowniczym), co zostało przedstawione na rys.3.



Rys. 3. Pomiar momentu przekazywanego pomiędzy silnikiem M2 a M1, kierunek obrotów w prawo

Uzyskano wynik pomiaru momentu przekazywanego  $M = -7,2$  Nm. Następnie wykonano pomiar dla tego samego kierunku obrotów (umownie w prawo), ale dla przypadku przekazywania mocy mechanicznej w przeciwnym kierunku, gdzie silnikiem napędzającym był silnik M1, a silnikiem napędzanym silnik M2, co zostało przedstawione na rys.4.



Rys. 4. Pomiar momentu przekazywanego pomiędzy silnikiem M1 a M2, kierunek obrotów w prawo.

Uzyskano wynik pomiaru momentu przekazywanego  $M = 3,5$  Nm. Kiedy te dwie uzyskane wartości przedstawimy na osi momentu, co zostało przedstawione na rys.5, to zauważymy, że odległość jaka dzieli uzyskane wartości momentu wynosi:

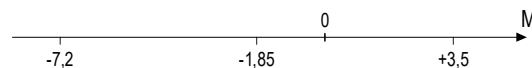
$$M_o = 3,5 - (-7,2) = 10,7 \text{ Nm}$$

Zatem średnia wartość momentu przekazywanego przy obrotach w prawo wynosi:

$$M_s = 10,7/2 = 5,35 \text{ Nm}$$

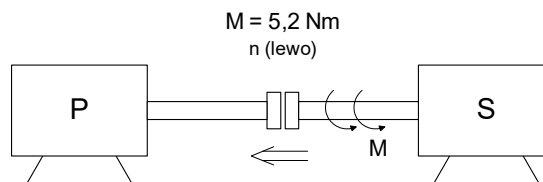
a środek przedziału wynosi:

$$M_{sp} = -7,2 + 5,35 = -1,85 \text{ Nm}$$



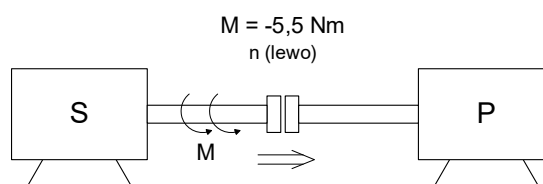
Rys. 5. Wartości momentu przekazywanego pomiędzy silnikami, kierunek obrotów w prawo

Wartość momentu  $M_{sp} = -1,85$  Nm można traktować jako sumaryczny błąd pomiaru momentu przekazywanego pomiędzy silnikami podczas obrotów w prawo. Następnie wykonano takie same pomiary zmieniając kierunek obrotów na przeciwny (lewo). Najpierw wykonano pomiar momentu przekazywanego przez momentomierz dla umownego kierunku obrotów w lewo, gdzie silnikiem napędzającym był silnik M2, a silnikiem napędzanym silnik M1, co zostało przedstawione na rys.6.



Rys. 6. Pomiar momentu przekazywanego pomiędzy silnikiem M2 a M1, kierunek obrotów w lewo.

Uzyskano wynik pomiaru momentu przekazywanego  $M = 5,2$  Nm. Następnie wykonano pomiar dla tego samego kierunku obrotów (umownie w lewo), ale dla przypadku przekazywania mocy mechanicznej w przeciwnym kierunku, gdzie silnikiem napędzającym był silnik M1, a silnikiem napędzanym silnik M2, co zostało przedstawione na rys.7.



Rys. 7. Pomiar momentu przekazywanego pomiędzy silnikiem M1 a M2, kierunek obrotów w lewo.

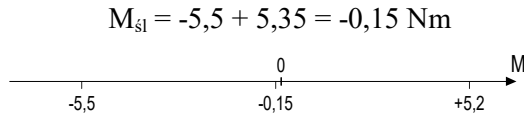
Uzyskano wynik pomiaru momentu przekazywanego  $M = -5,5$  Nm. Kiedy te dwie uzyskane wartości przedstawimy na osi momentu, co zostało przedstawione na rys.8 to zauważymy, że odległość jaka dzieli uzyskane wartości momentu, jest taka sama jak poprzednio i wynosi:

$$M_o = 5,2 - (-5,5) = 10,7 \text{ Nm}$$

Zatem średnia wartość momentu przekazywanego przy obrotach w lewo również wynosi:

$$M_s = 10,7/2 = 5,35 \text{ Nm}$$

a środek przedziału w tym przypadku wynosi:



Rys. 8. Wartości momentu przekazywanego pomiędzy silnikami, kierunek obrotów w lewo

Wartość momentu  $M_{sl} = -0,15 \text{ Nm}$  można traktować jako sumaryczny błąd pomiaru momentu przekazywanego pomiędzy silnikami podczas obrotów w lewo.

Aby teraz uzyskać wartość momentu wynikającego z istniejącego momentu zasprężenia pomiędzy silnikami oraz wartość błędu wnoszonego przez momentomierz, musimy znaleźć parę liczb spełniających następujące dwa kryteria, wynikające z wyznaczonych środków przedziałów, a mianowicie:

1. suma tych liczb dla kierunku obrotów w prawo wynosi:  $-1,85$ ;
2. suma tych liczb dla kierunku obrotów w lewo wynosi:  $-0,15$ ;

wiedząc, że moment zasprężania ma wartość stałą, a błąd wprowadzany przez momentomierz zmienia znak podczas zmiany kierunku obrotów, nie zmieniając wartości bezwzględnej, która dodatkowo jest mniejsza od  $1 \text{ Nm}$  (wynika z klasy i zakresu momentomierza). A zatem parą liczb spełniających powyższe kryteria jest następująca para liczb:

$$M_{nac.magn.} = -1 \text{ Nm}$$

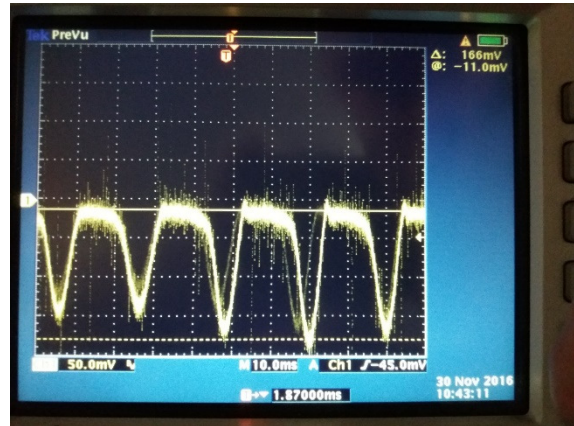
$$M_{zera.mom.} = \begin{cases} -0,85 \text{ Nm} & \text{przy obrotach w prawo} \\ +0,85 \text{ Nm} & \text{przy obrotach w lewo} \end{cases}$$

#### 4. Rozdział strat mechanicznych w silniku IPMSM

Aby dokonać rozdziału strat mechanicznych na związane z momentem tarcia w łożyskach i na związane z momentem zaczepowym musimy wykonać analizę oscylogramu momentu przekazywanego do silnika badanego M2, nie podłączonego do falownika zasilającego, napędzanego ze stałą prędkością za pomocą silnika M1. Na platformie badawczej zostało to wykonane dla prędkości obrotowej wynoszącej  $100 \text{ obr./min.}$  dla kierunku obrotów w lewo (przypadek pokazany na rys.7). Jednocześnie za pomocą oscyloskopu został zarejestrowany przebieg wartości chwilowych momentu przekazywanego przez momentomierz z silnika napędowego M1 do silnika napędzanego M2, co przedstawia rys.9 zamieszczona poniżej.

Analizując zamieszczony na rys.9 przebieg czasowy momentu przekazywanego, który jest

sumą momentu zaczepowego oraz momentu wnoszonego przez ułożyskowanie wirnika wiadać, że amplituda napięcia na wyjściu analogowym momentomierza wynosiła  $150\text{-}180 \text{ mV}$ .



Rys. 9. Przebieg momentu przekazywanego zarejestrowany oscyloskopem

Ponieważ momentomierz na wyjściu analogowym podaje sygnał napięciowy o liniowej zależności napięcia od momentu wynoszący  $10 \text{ mV/Nm}$  to można stąd obliczyć, że amplituda momentu wynosiła około  $15\text{-}18 \text{ Nm}$  (linia przerywana). Wartość momentu wnoszonego przez ułożyskowanie wirnika silnika charakteryzuje się dla danej prędkości wartością stałą. Na rys.9 wartość ta wynosi około  $-1,5 \text{ Nm}$  (linia ciągła). Biorąc pod uwagę poprawkę wynikającą z momentu zasprężania oraz z błędu wnoszonego przez momentomierz, która dla kierunku obrotów w lewo wynosi:

$$M_{nac.magn.} + M_{zera.mom.} = -1 \text{ Nm} + 0,85 \text{ Nm} = -0,15 \text{ Nm}$$

otrzymujemy wartość rzeczywistego momentu wnoszonego przez ułożyskowanie wirnika wynoszącą:

$$M_{łożysk} = -1,5 \text{ Nm} - (-0,15 \text{ Nm}) = -1,35 \text{ Nm}$$

Zmierzona średnia wartość momentu przekazywanego dla powyższego przypadku wynosi  $M = -5,5 \text{ Nm}$ . Uwzględniając poprawkę wynikającą z momentu zasprężania oraz z błędu wnoszonego przez momentomierz otrzymujemy rzeczywistą wartość średnią momentu przekazywanego, która wynosi:

$$M_{rz} = -5,5 \text{ Nm} - (-0,15 \text{ Nm}) = -5,35 \text{ Nm}$$

Odejmując od tej wartości wartość rzeczywistego momentu wnoszonego przez ułożyskowanie wirnika otrzymujemy rzeczywistą wartość średnią momentu zaczepowego, która w tym przypadku wynosi:

$$M_{zaczep} = -5,35 \text{ Nm} - (-1,35 \text{ Nm}) = -4 \text{ Nm}$$

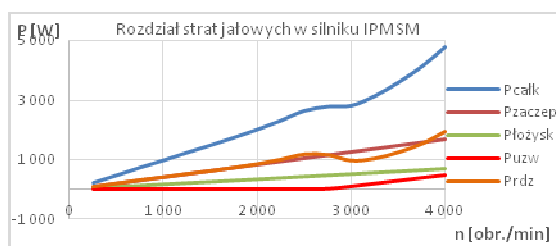
Mając dokonany podział momentów mechanicznych na moment oporu wynikający z łożyskowania wirnika silnika oraz na moment oporu wynikający z momentu zaczepowego możemy dokonać podziału strat mocy w silniku na poszczególne składniki.

Zakładając, że średnia wartość momentu zaczepowego nie zmienia się ze wzrostem prędkości obrotowej silnika oraz, że moc strat mechanicznych wzrasta ze wzrostem prędkości obrotowej w potęgę 1,05 to możemy wyznaczyć charakterystyki strat mechanicznych od prędkości obrotowej silnika.

Straty mocy w uzwojeniu możemy łatwo obliczyć mierząc rezystancję uzwojenia silnika i mnożąc ją przez kwadrat wartości skutecznej prądu silnika jakim obciąża on falownik zasilający w stanie ustalonej prędkości obrotowej podczas biegu jałowego. Ważne, aby do obliczeń wziąć wartość skuteczną prądu wszystkich harmonicznych. Mając pomierzone wartości mocy czynnej jaką pobiera w stanie pracy jałowej silnik M2 podczas ustalonej prędkości dla obydwu kierunku obrotów i wyznaczone straty mocy mechanicznej można narysować charakterystykę rozdziału strat mocy dla poszczególnych składników w stanie biegu jałowego tego silnika, co zostało przedstawione na rys.10.

Straty mocy w rdzeniu silnika  $P_{rdz}$  (w żelazie), zamieszczone na rys.10 zostały wyznaczone na podstawie bilansu strat jako różnica pomiędzy stratami całkowitymi oraz sumą strat poszczególnych, co można zapisać jako:

$$P_{rdz} = P_{całk} - (P_{zaczep} + P_{łożysk} + P_{uzw})$$



Rys. 10. Ch-ki strat jałowych silnika M2

Jak widać na rys.10 straty w uzwojeniu silnika  $P_{uzw}$  do prędkości 2750 obr./min są do pominięcia (poniżej 15 W). Powyżej tej prędkości szybko wzrastają, tak że dla 4000 obr./min osiągają wartość 490 W. Jest to spowodowane dużą wartością prądu demagnesującego, koniecznego przy wysokich prędkościach obrotowych silnika IPMSM. Straty mechaniczne w łożyskach silnika  $P_{łożysk}$  ze wzrostem prędkości obrotowej cały czas rosną osiągając dla

prędkości 4000 obr./min wartość bliską 680 W. Straty wynikające z momentu zaczepowego  $P_{zaczep}$  również ze wzrostem prędkości cały czas rosną osiągając dla prędkości 4000 obr./min wartość około 1675 W. Jest to wartość bardzo duża, powodująca znaczne obniżenie sprawności silnika. Nad tymi stratami należałoby jeszcze w modelu fizycznym silnika popracować, gdyż zastosowany skos blach w stojanie silnika, który miał wyeliminować zupełnie moment zaczepowy, nie spełnił oczekiwanego rezultatu.

Gdyby za pomocą działań technicznych (dobrana doświadczalnie orientacja przestrzenna skosu w stojanie) udało się doprowadzić do sytuacji, w której wartość średnia momentu zaczepowego będzie równa zero, to wówczas straty w silniku wynikające z momentu zaczepowego spadłyby przy prędkości bazowej wynoszącej 2250 obr./min o 940 W. Gdy weźmiemy pod uwagę, że suma wszystkich strat w silniku obciążonym momentem znamionowym 300 Nm przy prędkości bazowej 2250 obr./min przy pracy ciągłej S1 wynosi 4480 W, to zmniejszenie tej wartości o 940 W spowoduje spadek strat w silniku o 21% do wartości 3540 W, a tym samym wzrost sprawności silnika o około 1,2% i tym samym sprawność znamionowa silnika mogłaby osiągnąć wartość bliską 95,2% (zamiast obecnej 94%). Niezerowa zatem wartość momentu zaczepowego w silniku przyczynia się do znacznego obniżenia sprawności silnika.

Jak widać na rys.10 szczególnie zadziwiający jest wykres strat w rdzeniu silnika  $P_{rdz}$ . Właściwie jest on wynikiem bilansowania strat w silniku, a zatem jego wyznaczenie obarczone jest największym błędem (suma błędów wyznaczania poszczególnych strat). Zatem można w zasadzie uznać, że powyższy charakter strat całkowitych w silniku pracującym na biegu jałowym wynika z charakteru strat występujących w rdzeniu silnika. Do prędkości 2500 obr./min straty w rdzeniu rosną, a powyżej 2500 obr./min widać, że wyraźnie maleją. W okolicy 3000 obr./min straty w rdzeniu osiągają wyraźne lokalne minimum. Powyżej prędkości 3250 obr./min straty w rdzeniu znowu szybko wzrastają. Jest to spowodowane (tak się wydaje) zbyt szybkim przejściem ze strefy pierwszej do strefy drugiej regulacji silnika (osłabiania wzbudzenia). Przejście ze stałej indukcji magnetycznej w pierwszej strefie regulacji do indukcji male-

jącej hiperbolicznie w drugiej strefie regulacji powinno następować płynnie (a raczej następuje skokowo). Silnik ma zatem na początku drugiej strefy regulacji zbyt mocno osłabione pole magnetyczne główne (od magnesów trwałych), indukcja w obwodzie magnetycznym silnika szybko maleje (straty w żelazie maleją), silnik jest zatem zasilany niepełnym napięciem (nie wykorzystuje dostępnej wartości maksymalnej napięcia na wyjściu falownika). Nad powyższym sposobem sterowania silnika na granicy stref sterowania należałoby również jeszcze popracować w modelu fizycznym przekształtnika częstotliwości.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda rozdziału strat poszczególnych w silnikach synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi bazuje na pomiarze mocy pobieranej przez silnik na biegu jałowym oraz na analizie przebiegu czasowego momentu jaki występuje na wale silnika niepodłączonego do falownika zasilającego i napędzanego z innego silnika.

W zarejestrowanym przebiegu czasowym momentu przekazywanego pomiędzy silnikami występuje dosyć znaczny błąd wnoszony przez momentomierz, który pomimo, iż jest przyrządem dokładnym (klasa 0,1) to i tak przy zakresie pomiarowym (do 1000 Nm), dostosowanym do pomiaru momentu znamionowego silnika, charakteryzuje się jednak dużym błędem (do 1 Nm) wnoszonym podczas pomiaru momentów (rzędu kilku Nm) na biegu jałowym silnika, co może być powodem znacznych błędów (rzędu kilkunastu %). W artykule przedstawiono metodę określenia poprawki, która pozwala na eliminację powyższego błędu. Dodatkowo przedstawiona została w artykule metoda identyfikacji i wyznaczania statycznego momentu zasprzęglania występującego w przypadku zesprzęglania w pozycji wymuszonej dwóch silników wzbudzanych magnesami trwałymi.

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]. A. Dzikowski: „Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnięcia górniczego

kombajnu ścianowego”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 94/2012, str. 165-170.

[2]. A. Dzikowski, M. Hefczyc, A. Kozłowski: „Energooszczędne napędy maszyn górniczych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zasilanymi z przemienników częstotliwości”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 98/2013, str. 23-31.

[3]. A. Dzikowski, M. Hefczyc, A. Kozłowski: „Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi”, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* nr 1/2014, str. 51-59.

[4]. A. Dzikowski, P. Dukalski, R. Rossa: „Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation model”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11/2015, str. 330-335.

[5]. A. Dzikowski, P. Dukalski, R. Rossa: „Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation of operation”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11/2015, str. 336-341.

[6]. P. Dukalski, S. Gawron, A. Dzikowski: „Wysokosprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 102/2014, str. 77-83.

[7]. P. Dukalski, R. Rossa, A. Dzikowski: „Górniczy silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie posuwu kombajnu ścianowego – symulacje pracy”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 111/2016, str.197-204.

## Autor

dr inż. Andrzej Dzikowski

a.dzikowski@ibemag.pl

Instytut Technik Innowacyjnych EMAG