

Piotr Dukalski, Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

Andrzej Dzikowski, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

PROJEKT OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO MODERNIZACJI NAPĘDU AKUMULATOROWEJ LOKOMOTYWY DOŁOWEJ LEA BM-12

PROJECT OF ELECTROMAGNETIC CIRCUIT OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR MODERNIZATION OF DRIVE IN MINE BATTERY LOCOMOTIVE LEA BM-12

Streszczenie: Artykuł przedstawia metodę obliczeniową, model obliczeniowy oraz wyniki obliczeń parametrów pracy silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi (PMSM) do zastosowania w napędzie dołowej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12. W artykule opisano celowość modernizacji napędu lokomotywy Lea BM-12, opisano typowe zalety silników PMSM w napędach trakcyjnych, przedstawiono najczęściej stosowane konstrukcje wirników tego typu maszyn. Następnie opisano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM zaproponowanego dla lokomotywy Lea BM-12. W artykule zaprezentowano również metodę polowo-obwodową obciążeniową zastosowaną do obliczeń charakterystyk elektromechanicznych silnika do napędu lokomotywy oraz zestawiono wyniki obliczeń parametrów pracy proponowanego silnika z parametrami pracy silnika szeregowego prądu stałego stosowanego obecnie w lokomotywie Lea BM-12.

Abstract: The article presents the calculation method, the calculation model and calculation results of the operating parameters of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) to be used as a main drive of underground, battery-powered locomotive Lea BM-12. The article describes the goals of modernization of Lea BM-12, describes the advantages of PMSMs in traction drives, presents the most commonly used structures of rotors in this type of electrical machines. The construction of electromagnetic circuit of PMSM proposed for locomotive type Lea BM-12 is presented. In the article the field-circuit loading method used to calculate the electromechanical characteristics of PMSM for locomotive drive is presented and the calculated parameters of motor operation are compared to the same parameters of DC series motor used so far to drive the locomotive.

Słowa kluczowe: *napęd górniczy, silnik z magnesami trwałymi, lokomotywa dołowa, napęd elektryczny*

Keywords: *mining drive, permanent magnet motor, underground locomotive, electric drive*

1. Wstęp

W polskich kopalniach węgla kamiennego system transportowy ludzi, materiałów i urządzeń jest oparty na kolei podziemnej. Dołowy tabor trakcyjny, który był stosowany na przestrzeni lat, był modernizowany. Obecnie lokomotywy dołowe wykorzystują kilka rodzajów napędu: pneumatyczny, elektryczny przewodowy, elektryczny akumulatorowy, spalinowy.

Wprowadzenie w górnictwie podziemnym napędów spalinowych pozwoliło na zwiększenie efektywności podziemnych systemów transportowych kopalń, jednak nie jest to rozwiązanie wolne od wad. Napędy spalinowe stanowią źródło emisji spalin, ciepła oraz stosunkowo dużego hałasu, co przekłada się bezpośrednio na komfort i bezpieczeństwo pracy załóg dołowych oraz generuje bardzo duże koszty zwią-

zane z rozbudową systemów wentylacyjnych, odprowadzających spaliny.

Intensywny rozwój techniki w zakresie napędów trakcyjnych poskutkowało opracowaniem i wdrożeniem w różnych środkach transportu nowoczesnych, wysokosprawnych napędów elektrycznych o szeroko regulowanej prędkości obrotowej, bazujących na technologii silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM) zasilanych z energoelektronicznych układów sterowania oraz na technologii baterii litowo-jonowych. Tak skonfigurowane elektryczne, trakcyjne układy napędowe są stosowane m.in. w napędach różnego typu samochodów i pojazdów elektrycznych czy hybrydowych, a nawet w napędach małych statków powietrznych (paralotnie, szybowce)

[11, 12]. Na przestrzeni ostatnich lat można zaobserwować również pierwsze wdrożenia tak skonfigurowanych nowoczesnych napędów elektrycznych w aplikacjach kopalnianych i to w strefach zagrożonych wybuchem pyłu węglowego oraz metanu [1].

Napędy wyposażone w silniki PMSM stanowią interesującą alternatywę dla dotychczas stosowanych napędów elektrycznych, m.in. z uwagi na:

- mniejsze gabaryty i masę, co pozwala na budowę bardziej kompaktowych i lżejszych urządzeń;
- wysoką przeciążalność momentem, co pozwala na zastosowanie silników o zredukowanej mocy ciągłej w aplikacjach, gdzie np. jest konieczny duży moment rozruchowy oraz duże chwilowe przeciążenia;
- wysoką sprawność w stosunku do powszechnie stosowanych napędów górniczych z silnikami asynchronicznymi lub z silnikami prądu stałego, co pozwala na zmniejszenie energochłonności napędu.

Zastosowanie nowoczesnych napędów trakcyjnych wyposażonych w silniki PMSM (dodatkowo także zasilanych z baterii litowo-jonowych) wpisuje się w przewidywane kierunki rozwoju systemów transportowych kopalń, wytyczone pracami badawczo rozwojowymi, których celem jest [2, 3]:

- zmniejszenie emisji szkodliwych spalin do atmosfery kopalnianej;
- zmniejszenie generowania hałasu i emisji ciepła przez spalinowe jednostki napędowe;
- opracowanie napędów elektrycznych z nową generacją akumulatorów i silników elektrycznych;
- optymalizacja oprzyrządowania silników pod kątem zmniejszenia zużycia energii oraz kosztów wytwarzania;
- zwiększenie wydatku mocy silnika przy ograniczonym zużyciu paliwa (energii).

2. Lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12

W systemach transportowych krajowych kopalń podziemnych dominują dwa typy lokomotyw: Lea BM-12 (o masie 12 ton) oraz Ldag-05 (o masie 5.5 tony). Obie te lokomotywy są zasilane z baterii trakcyjnej. Zostały one opracowane w latach 60/70-tych XX wieku, natomiast zaprzestano ich produkcji w latach 90-tych. Prace projektowe oraz badawcze, prowadzone

przez autorów artykułu dotyczą lokomotywy Lea BM-12, która jest stosowana do transportu ludzi, urobku oraz materiałów.

W Polsce nie są produkowane lokomotywy elektryczne stanowiące odpowiednik lokomotyw Lea BM-12, co stanowi o konieczności coraz częstszego remontowania przestarzałych i coraz bardziej awaryjnych z uwagi na duży stopień wyeksploatowania lokomotyw. Lokomotywy Lea BM-8 zostały zastąpione lokomotywami Lea BM-12, które charakteryzowały się większą siłą pociągową oraz szerszym zakresem prędkości, natomiast lokomotywa Lea BM-15 nie weszła do produkcji seryjnej [4].

Tab. 1. Podstawowe dane techniczne lokomotyw akumulatorowych [4]

Parametr		Typ lokomotywy			
		Lea BM8	Lea BM12	Lea BM15	Ldag 05M
Siła pociągowa	kN	11,2	16,8	16,8	5,3
Prędkość	km/h	7	8	8	7,2
Prędkość max.	km/h	14	16	16	14,4
Moc godzinowa (S2-60)	kW	24	38	25	11
Liczba silników	szt.	1	1	2	2
Napięcie baterii	V	110	144	240	84
Pojemność akumulatora	Ah	570	760	2x330	420

W lokomotywie Lea BM-12 jest obecnie stosowany silnik szeregowy prądu stałego typu LDs 327, o mocy znamionowej 19,2 kW (S1), którego parametry pracy zostaną przedstawione w ostatnim rozdziale artykułu. Tymczasem w nowoczesnych napędach trakcji drogowej lub szynowej stosowane są coraz częściej silniki PMSM [12], z uwagi na zalety tychże silników wymienione w rozdziale 1. W ramach prowadzonych badań, autorzy projektu rozważyli zastosowanie silnika PMSM w lokomotywie Lea BM-12. Dzięki zastosowaniu nowego typu silnika poprawie powinny ulec następujące parametry napędu lokomotywy:

- sprawność napędu powinna ulec istotnej poprawie, co z kolei powinno poskutkować zwiększeniem zasięgu jazdy lokomotywy na jednym ładowaniu baterii trakcyjnej;
- zakładając te same warunki chłodzenia, moment i moc znamionowa napędu powinna ulec poprawie;

- moment i moc maksymalna napędu powinna ulec poprawie;
- w miarę możliwości należy dążyć do zmniejszenia wymiarów gabarytowych (średnicy) i masy silnika napędowego.

Jednym z założeń przy projektowaniu nowego wariantu napędu lokomotywy Lea BM-12 było to, że będzie on mógł współpracować z dotychczas stosowaną w lokomotywie baterią trakcyjną (narzucone napięcie DC i wydajność prądowa baterii) oraz w przyszłości, z nowoczesną baterią trakcyjną (ogniwa Li-ion) o zwiększonej wydajności prądowej i tym samym napięciu.

Przy projektowaniu silnika PMSM do napędu lokomotywy Lea BM-12 założono, że prędkość obrotowa silnika będzie regulowana dwustrefowo [5]. W pierwszej strefie regulacji prędkości silnik jest sterowany wg kryterium maksimum momentu użytecznego na wale T_s do prądu zasilania I_1 . W tej strefie regulacji w silniku utrzymywany jest w przybliżeniu stały strumień magnetyczny (tzn. zależny jedynie od prądu I_1 , nie od prędkości). W drugiej strefie regulacji prędkości (powyżej tzw. prędkości bazowej aż do prędkości maksymalnej) napięcie na zaciskach silnika jest ograniczone do maksymalnej wartości napięcia osiągalnej na wyjściu przekształtnika. Ograniczenie napięcia silnika jest realizowane dzięki osłabianiu strumienia magnetycznego głównego w silniku [5].

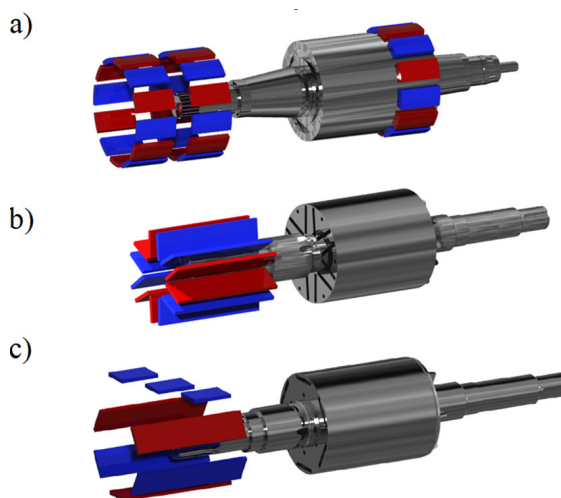
3. Obwód elektromagnetyczny silnika PMSM do napędu lokomotywy Lea BM-12

Konstrukcje obwodów elektromagnetycznych w silnikach PMSM mogą być bardzo różne. Do napędu lokomotywy Lea BM-12 zaprojektowano 3-fazowy silnik PMSM, z obwodem elektromagnetycznym o następujących cechach:

- promieniowy rozptyw strumienia magnetycznego;
- uzwojenie stojana rozłożone quasi-sinusoidalnie;
- magnesy trwałe NdFeB zamocowane wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika;
- wirnik wewnętrzny;
- liczba biegunów magnetycznych $2p=8$.

Stojan/twornik proponowanego silnika PMSM jest konstrukcyjnie zbliżony do stojanów stosowanych w 3-fazowych silnikach indukcyjnych, zarówno pod względem wykroju blach jak i sposobu wykonania uzwojenia.

Na rysunku 1 pokazano trzy główne odmiany wirników stosowanych w silnikach PMSM [6]. W silnikach do napędów trakcyjnych stosowane są zwykle wirniki z magnesami zagłębionymi w rdzeniu magnetycznym wirnika, tzw. IPM lub IPMV [7]. W tego typu wirnikach można wyróżnić dwie osie magnetyczne, oś podłużną d i oś poprzeczną q , przy czym oś q charakteryzuje się zwykle znacznie większą permeancją. Dzięki temu użyteczny moment synchroniczny T_s silnika PMSM ma dwie składowe, od magnesów trwałych T_{sPM} i reluktancyjną T_{srel} [8].



Rys. 1. Podstawowe odmiany wirników silników PMSM: a) SPM (Surface Mounted Permanent Magnets), b) IPMV (Interior Permanent Magnets V), c) IPM (Interior Permanent Magnets)

Składowe T_{sPM} i T_{srel} momentu synchronicznego T_s są łatwo rozpoznawalne w zależności (1), opisującej tzw. charakterystykę kątową $T_s = f(\delta)$ (rys. 2) silników PMSM zasilanych ze źródeł napięcia przemiennego o wymuszonej, stałej wartości skutecznej (np. zasilanych z sieci silników PMSM o rozruchu bezpośrednim, wyposażonych w klatkę rozruchową podobną jak w silnikach indukcyjnych) [8]:

$$T_s = \frac{30m_1}{\pi n_s} \left[\frac{V_1 E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] \quad (1)$$

$$T_{sPM} = \frac{30m_1 V_1 E_0}{\pi n_s X_d} \sin \delta \quad (2)$$

$$T_{srel} = \frac{30m_1 V_1^2}{\pi n_s} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (3)$$

gdzie:

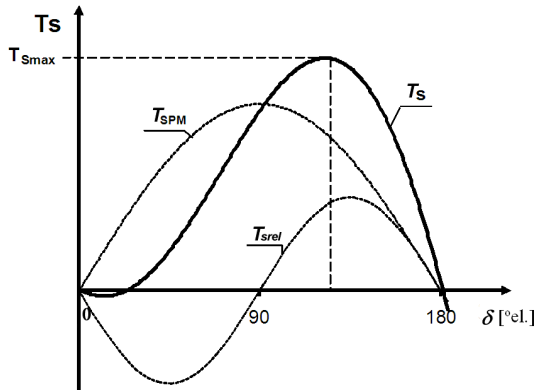
X_d, X_q – reaktancje synchroniczne odpowiednio w osiach magnetycznych d i q ;

V_1 – wartość skuteczna napięcia fazowego zasilającego obwód twornika (rys. 4);

E_0 – wartość skuteczna napięcia rotacji indukowanego w fazie uzwojenia twornika przez wirujące pole magnetyczne od magnesów trwałych;

δ – kąt mocy (kąt pomiędzy wskazami V_1 i E_0);

n_s – prędkość obrotowa synchroniczna wirnika.



Rys. 2. Charakterystyka momentu synchronicznego w funkcji kąta mocy $T_s = f(\delta)$ dla silników PMSM o rozruchu bezpośrednim (zasilanych z sieci i posiadających klatki rozruchowe)

Składowa T_{sPM} momentu T_s jest w silnikach PMSM (IPM i IPMV) składową dominującą, natomiast składowa reluktancyjna T_{srel} w najczęściej spotykanych rozwiązaniach odpowiada za ok. 15 ÷ 30 % momentu T_s .

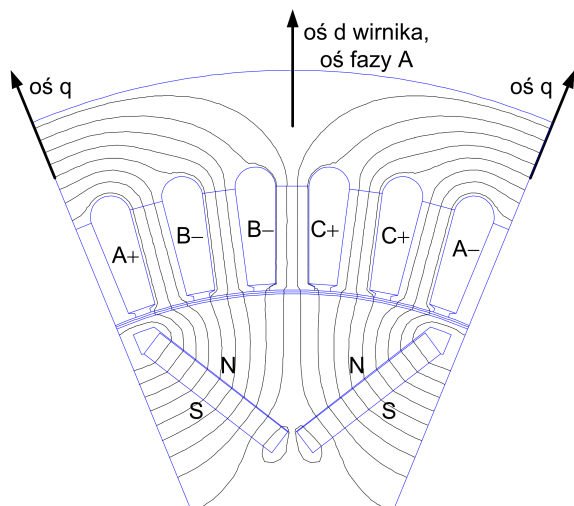
Pokazanej na rysunku 3 charakterystyki kątowej silnika PMSM zasilanego ze źródła napięciowego o stałej wartości skutecznej nie można bezpośrednio odnieść do silnika PMSM zasilanego z przekształtnika energoelektronicznego. Jednak przekształtniki takie stosowane w napędach trakcyjnych do zasilania silników PMSM są zwykle źródłami o charakterze napięciowym, z regulowanym napięciem (ang. Voltage Source Inverter). Zjawiska magnetyczne prowadzące do wytworzenia składowych T_{sPM} i T_{srel} momentu synchronicznego T_s są identyczne, niezależnie od sposobu zasilania silnika.

Praca zasilanego z przekształtnika silnika PMSM w pierwszej strefie regulacji prędkości, wg kryterium optimum T/I_1 , przy aktualnym w danym stanie pracy silnika napięciu na przekształtniku U_x , odpowiada niejako jednemu z punktów charakterystyki kątowej tego silnika jaką uzyskalibyśmy, gdyby silnik ten w całym zakresie obciążeń był zasilany z sieci o napięciu U_x . Przy tym należy zwrócić uwagę na to, że maksymalny moment T_{smax} na charakterystyce kątowej silnika PMSM nie odpowiada pracy

przy optimum T_s/I_1 w pierwszej strefie regulacji prędkości. Optymalny iloraz T_s/I_1 jest uzyskiwany zwykle dla momentu T_s stanowiącego orientacyjnie ok. 65 ÷ 75 % wartości T_{smax} , w jednym z punktów na stabilnej części charakterystyki kątowej.

Zwiększenie osiąganego przez silnik PMSM momentu synchronicznego T_s można osiągnąć przez zwiększenie składowej T_{sPM} lub składowej T_{srel} . Czynnikiem konstrukcyjnym zwiększającym składową T_{sPM} są zwiększenie objętości magnesów trwałych w wirniku oraz poprawa właściwości magnetycznych materiału magnesów (zwiększenie parametru BH_{max} magnesów). Odpowiada to zwiększeniu strumienia wzbudzenia w silniku i tym samym zwiększeniu w zależnościach (1) i (2) parametru E_0 . Zwiększenie składowej T_{srel} jest realizowane przez zwiększenie różnicy permeancji w osiach magnetycznych d i q wirnika, czyli przez zwiększenie różnicy między reaktancjami synchronicznymi X_q i X_d . Zwiększenie różnicy permeancji jest osiągnięte przez odpowiednie umiejscowienie magnesów trwałych w wirniku, przy czym dla silników PMSM z wirnikami IPM oraz IPMV obowiązuje zależność: $X_d < X_q$. Do napędu lokomotywy Lea-BM12 zaprojektowano silnik PMSM z wirnikiem typu IPMV, w którym magnesy jednego bieguna magnetycznego są ułożone w kształcie litery V. Przyjęty sposób ułożenia magnesów skutkuje tzw. koncentracją strumienia magnetycznego wzbudzenia, co przekłada się na zwiększenie składowej T_{sPM} momentu synchronicznego. Jednocześnie ułożenie magnesów w kształt litery V skutkuje znaczną różnicą permeancji w osiach magnetycznych d i q . Osiągnięty stosunek X_q/X_d ok. 2.6 ÷ 3.0 przekłada się na znaczny udział składowej T_{srel} w wypadkowym momencie T_s . Przekrój jednej podziałki biegunowej zaproponowanego silnika pokazano na rysunku 3.

Silnik PMSM dla lokomotywy Lea BM-12 zaprojektowano w wielkości mechanicznej 180 mm. Zmniejszono średnicę zewnętrzną obwodu elektromagnetycznego i kadłuba w stosunku do silnika prądu stałego (wzrost mechaniczny zmniejszono z 327 do 180, czyli o 45%). Długość silnika z uwagi na zabudowę enkodera w silniku jest taka sama, 870 mm ze skrzynką zaciskową.



Rys. 3. Model MES silnika PMSM dla lokomotywy Lea BM-12, przygotowany wg wymagań algorytmu obliczeniowego, pokazano linie ekwipotencjalne pola magnetycznego wzbudzenia od magnesów trwałych

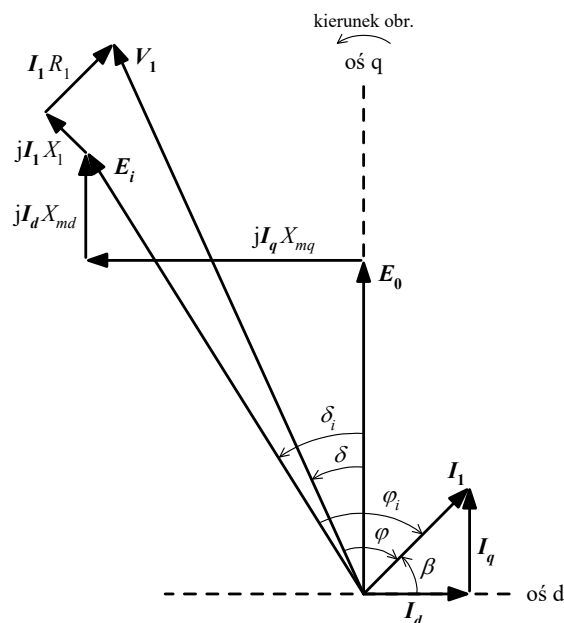
4. Metoda polowo-obwodowa obciążeniowa

Napędy trakcyjne z silnikami PMSM, w tym napęd lokomotywy Lea BM-12, muszą z reguły umożliwiać dwustrefową regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie [5], a ponadto jednym z typowych wymagań dla takich napędów jest także możliwość chwilowego, znacznego przeciążenia silnika momentem (współczynnik krotności momentu maksymalnego do znamionowego ok. 3). W przypadku napędów trakcyjnych zasilanych bateryjnie, zwykle istotne jest także, uzyskanie możliwie wysokiego współczynnika momentu znamionowego na wale, na jednostkę masy lub objętości silnika, przy zachowaniu wysokiej sprawności. Ten szeroki zakres wymagań dotyczących parametrów pracy napędu powoduje, że nasycenia w obwodach magnetycznych trakcyjnych silników PMSM są stosunkowo wysokie, zwłaszcza przy pracy z przeciążeniem momentem. Ponadto rozptył strumienia magnetycznego głównego w silniku ulega znaczącym zmianom w różnych stanach pracy maszyny. Jest to związane ze zwiększeniem strumienia głównego w silniku, przy przeciążeniu momentem oraz osłabianiem strumienia głównego przy pracy w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej [5], czemu towarzyszy także zmiana pozycji kątowej wirnika względem siły magnetycotorycznej twornika/stojana. Zmiany rozptyłu strumienia magnetycznego w silniku PMSM skutkują znaczącymi zmianami stanu

nasycenia w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego silnika, zwłaszcza w wirniku, gdzie występują mostki magnetyczne w postaci przewężeń na drodze strumienia magnetycznego.

Stożek skomplikowania zjawisk zachodzących w obwodach magnetycznych silników PMSM, zwłaszcza trakcyjnych powoduje, że obliczenia charakterystyk elektromechanicznych tego typu silników realizowane są zwykle z wykorzystaniem metod bazujących na obliczeniach rozptyłu strumienia magnetycznego metodą elementów skończonych. Dla zaprojektowania silnika PMSM do napędu lokomotywy Lea BM-12 wykorzystano tzw. metodę polowo-obwodową obciążeniową [9, 10].

W metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej, przy obliczaniu poszczególnych punktów pracy na charakterystykach elektromechanicznych silnika PMSM, dla każdego z tych punktów uwzględniany jest indywidualny rozkład strumienia magnetycznego w silniku, zależny od wartości prądu obciążenia I_1 , a także, posługując się dwuosiowym układem $dq0$ maszyny synchronicznej, od kąta fazowego β wektora prądu obciążenia I_1 (rys. 4). Rozkład strumienia magnetycznego w silniku dla danego punktu pracy jest obliczany z wykorzystaniem dwuwymiarowej, stałoprądowej, nieliniowej analizy MES. Dla każdego z analizowanych punktów pracy silnika uwzględniane są zatem indywidualne poziomy nasycenie w poszczególnych fragmentach obwodu magnetycznego silnika.



Rys. 4. Wykres wskazowy silnika synchronicznego [5,9,10]

W metodzie obciążeniowej prądy fazowe są parametrem zadawanym jako wymuszenie w modelu MES silnika, z uwzględnieniem modułu I_1 oraz kąta fazowego β prądu obciążenia. Dla obliczenia charakterystyk elektromechanicznych silnika PMSM zasilanego z przekształtnika energoelektronicznego i pracującego w pierwszej strefie regulacji prędkości ze sterowaniem wg kryterium maksimum momentu T do prądu I_1 [5], znane i zadawane są zarówno moduł I_1 oraz kąt fazowy β wektora prądu I_1 . W zależności od wartości prądu obciążenia, kąt β jest tak dobrany, aby spełnić warunek optimum T/I_1 . Dla obliczenia charakterystyk silnika pracującego w drugiej strefie regulacji prędkości, z osłabianiem strumienia magnetycznego, moduł prądu I_1 jest także zadawany. Natomiast właściwy dla danej prędkości obrotowej kąt fazowy β wektora prądu I_1 musi być obliczony iteracyjnie tak, aby przy danej prędkości spełnić warunek ograniczenia napięcia zasilania [5]. Obliczenia iteracyjne dla znalezienia właściwego kąta β można wykonać np. metodą siecznych.

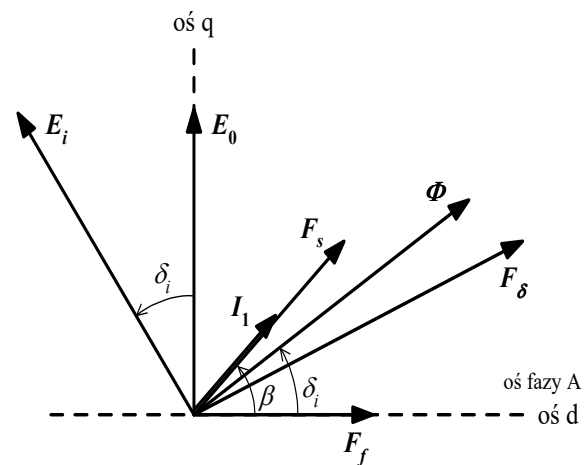
Metoda polowo-obwodowa obciążeniowa bazuje na możliwości obliczenia, z wykorzystaniem modelu silnika w dziedzinie MES, modułu wektora napięcia szczelinowego E_i oraz kąta fazowego $\delta_i + \pi/2$ tegoż wektora, odpowiadających aktualnemu, przy danym obciążeniu, rozkładowi pola magnetycznego w silniku, przy założeniu, że znany jest moduł I_1 oraz kąt fazowy β wektora prądu stojana I_1 (rys. 4).

Model MES silnika jest tak przygotowywany, że oś fazy A uzwojenia stojana (wybrana jako faza odniesienia) pokrywa się z osią d wirnika. Wówczas, jeśli założymy że model MES będzie odpowiadać chwili czasowej $t = 0$, a wartość chwilowa prądu fazy A opisana jest zależnością:

$$i_A(t) = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \cos(\omega t + \beta) \quad (4)$$

to kąt fazowy β wektora prądu I_1 odpowiada jednocześnie kątowi przestrzennemu pomiędzy wektorem napięcia magnetycznego twornika F_s , a wektorem napięcia magnetycznego wzbudzenia F_f . Dzięki temu, w modelu MES silnika upraszcza się pozycjonowanie napięcia magnetycznego twornika F_s względem osi d wirnika. Ze względu na symetrię obwodu magnetycznego, model MES obejmuje tylko jedną podziałkę biegunową silnika.

Po obliczeniu w MES rozkładu pola magnetycznego w silniku dla zadanego modułu prądu I_1 i zadanego (lub znalezione iteracyjnie) kąta fazowego β , obliczany jest rozkład przestrzenny, wektorowego potencjału magnetycznego $A_z(x)$ wzdłuż szczeliny powietrznej, gdzie x oznacza pozycję wzdłuż obwodu szczeliny powietrznej. Rozkład ten odpowiada strumieniowi głównemu Φ w szczelinie powietrznej silnika, wynikającemu z oddziaływania napięcia magnetycznego wzbudzenia F_f i napięcia magnetycznego twornika F_s w danym punkcie pracy (rys. 5).



Rys. 5. Narysowane w jednym układzie współrzędnych $dq0$ wykresy: wektorowy napięcia indukowanego oraz napięć magnetycznych i strumienia magnetycznego

Obliczony rozkład przestrzenny potencjału magnetycznego $A_z(x)$ odpowiadający jednej podziałce biegunowej silnika poddawany jest analizie harmoniczej, w celu obliczenia współczynników szeregu Fouriera a_1 i b_1 dla jego podstawowej harmonicznej. Współczynniki a_1 i b_1 reprezentują odpowiednio połowę strumienia magnetycznego w osi podłużnej silnika Φ_d oraz połowę strumienia w osi poprzecznej Φ_q .

Znając współczynniki a_1 i b_1 obliczany jest moduł Φ wypadkowego strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika, odpowiadający zadanemu modułowi I_1 oraz zadanemu kątowi fazowemu β wektora prądu I_1 :

$$\Phi = 2 \cdot L_{Fe} \cdot \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (5)$$

gdzie: L_{Fe} - długość czynna pakietu żelaza. Następnie obliczany jest moduł napięcia szczelinowego E_i oraz kąt fazowy δ_i wektora stru-

mienia wypadkowego Φ w szczelinie powietrznej:

$$E_i = 4.44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot z_1 \cdot k_{u1} \cdot k_s \quad (6)$$

$$\delta_i = \arctg(b_1/a_1) \quad (7)$$

We wzorze (6) f_1 oznacza częstotliwość prądu stojana, z_1 liczbę zwojów szeregowych w fazie uzwojenia, k_{u1} i k_s odpowiednio współczynnik uzwojenia i skosu.

Po obliczeniu parametrów E_i , δ_i , odpowiadających danemu prądowi I_1 oraz kątowi β , obliczane są dalej:

- kąt mocy δ w oparciu o zależność:

$$V_1 \cdot \sin \delta = E_i \cdot \sin \delta_i + I_1 \cdot \sin \beta \cdot X_1 - I_1 \cdot \cos \beta \cdot R_1 \quad (8)$$

- współczynnik mocy $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = \sin \beta \cdot \cos \delta - \cos \beta \cdot \sin \delta \quad (9)$$

- moc elektryczna P_{ei} w szczelinie powietrznej silnika:

$$P_{ei} = 3 \cdot E_i \cdot (I_1 \cdot \sin \beta \cdot \cos \delta_i - I_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \delta_i) \quad (10)$$

- moc elektryczna wejściowa P_1 :

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot (I_1 \cdot \sin \beta \cdot \cos \delta - I_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \delta) \quad (11)$$

- moc mechaniczna na wale P_m :

$$P_m = P_{ei} - \Delta P_m \quad (12)$$

- sprawność η :

$$\eta = P_m / P_1 \quad (13)$$

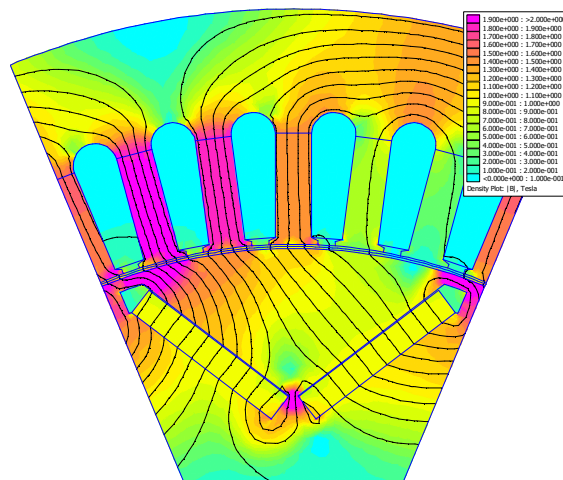
5. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych

Przedstawiony w rozdziale 3 model silnika oraz opisana w rozdziale 4 metoda połowo-obwodowa obciążeniowa, posłużyły do obliczeń parametrów znamionowych i charakterystyk elektromechanicznych pracy silnika PMSM dla różnych stanów obciążenia.

Na rysunkach 6 ÷ 8 zaprezentowano obliczone rozkłady indukcji oraz linie ekwipotencjalne pola magnetycznego dla różnych punktów pracy silnika. Wybrane punkty zostały również zaznaczone na obliczonych charakterystykach elektromechanicznych (rys. 9).

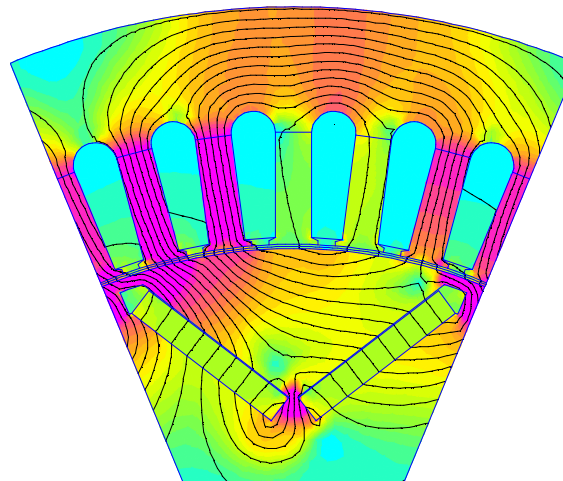
W tabeli 2 porównano znamionowe parametry pracy silnika LDs-327 z obliczonymi parametrami silnika PMSM. Dla silnika PMSM przedstawiono parametry dla dwóch warunków zasilania, tj. przy zastosowaniu dotychczasowej baterii trakcyjnej kwasowo-ołowiowej oraz przy zastosowaniu nowoczesnej baterii litowo-jonowej. W przypadku dotychczasowej baterii, z uwagi na ograniczenie jej wydajności prądowej do $I_{DC} = 300$ A, maksymalna moc silnika

PMSM jest ograniczona do 40 kW. Pomimo tego, silnik ten i tak uzyskuje znacząco lepsze parametry pracy w stosunku do silnika LDs-327.



Rys. 6. Linie pola magnetycznego i rozkład indukcji w silniku obliczone dla punktu pracy w pierwszej strefie regulacji prędkości (bez osłabiania strumienia magnetycznego): $I_1 = 400$ A, $\beta = 115^\circ$, $n = 2100$ obr/min (praca znamionowa S1)

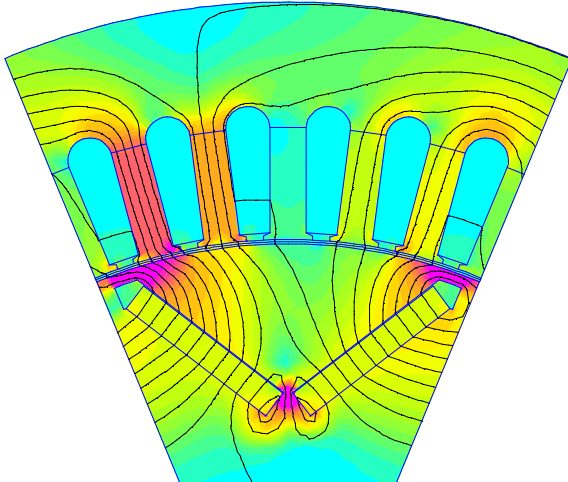
Za punkt pracy znamionowej silnika PMSM obierano punkt tzw. prędkości bazowej, przy której na charakterystykach elektromechanicznych napędu następuje przejście z pierwszej do drugiej strefy regulacji prędkości [5].



Rys. 7. Linie pola magnetycznego i rozkład indukcji w silniku obliczone dla punktu pracy w pierwszej strefie regulacji prędkości (bez osłabiania strumienia): $I_1 = 1000$ A, $\beta = 130^\circ$, $n = 1800$ obr/min (maksymalne przeciążenie momentem)

Z danych w tabeli 2 wynika, że w przypadku zastosowania nowej baterii trakcyjnej Li-ion

o większej (ok. dwukrotnie) wydajności prądowej, znamionowa moc silnika PMSM dla pracy S1 może być prawie trzykrotnie, a dla pracy S2-60 ponad dwukrotnie większa niż odpowiednia moc silnika LDs-327, przy zachowaniu wyższej sprawności o ok. 6%. Także maksymalna prędkość obrotowa silnika uległa znacznemu zwiększeniu.

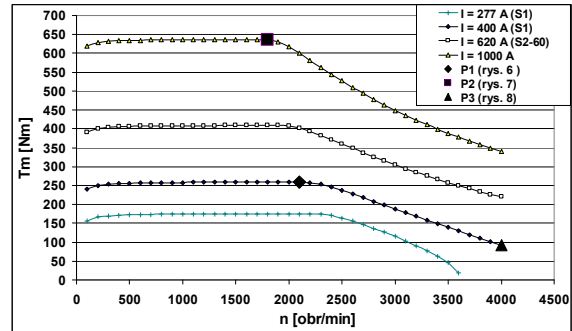


Rys. 8. Linie pola magnetycznego i rozkład indukcji w silniku obliczone dla wybranego punktu pracy w drugiej strefie regulacji prędkości (z osłabianiem strumienia magnetycznego), $I_1 = 400 \text{ A}$, $\beta = 165^\circ$, $n = 4000 \text{ obr/min}$

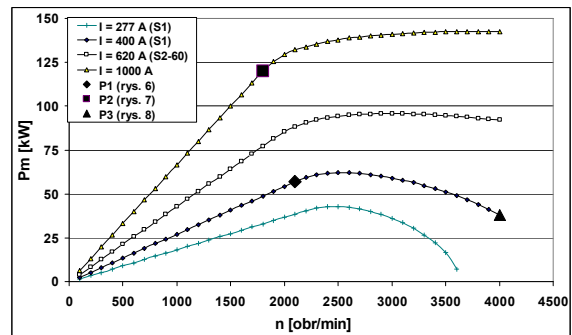
Tab. 2. Porównanie parametrów znamionowych silnika szeregowego LDs-327 oraz proponowanego silnika PMSM

Parametry dla pracy S1/S2-60	Typ silnika		
	LDs-327	PMSM - praca znamionowa, bateria Li-ion	PMSM - bateria kwasowa, $I_{DC}=300\text{A}$ ($I_1 < I_{1N}$)
Wznios mechaniczny	327	180	180
Moc znamionowa P_N , [kW]	19.2/40	56.5/81	40,3
Moment znam. T_N , [N·m]	110/340	260/409	175
Prędkość n_N , [obr/min]	1660/1120	2100/1900	2200
Napięcie znamionowe, [V]	144 V_{DC}	90 V_{AC} (144 V_{DC})	90 V_{AC} (144 V_{DC})
Prąd znam. I_{DC} lub I_{1N} , [A]	150/308	400/620	277
Sprawność, [%]	89/90.5	96.5/96	96.3
Prędkość max., [obr/min]	2490	4000	3700

Na rysunkach 9 i 10 pokazano obliczone charakterystyki momentu na wale i mocy silnika PMSM w funkcji prędkości obrotowej przy znamionowych warunkach zasilania dla pracy S1 i S2-60 oraz przy chwilowym przeciążeniu $I_1 = 1000 \text{ A}$.



Rys. 9. Obliczone charakterystyki momentu na wale silnika PMSM w funkcji prędkości obrotowej dla warunków pracy: przy ograniczeniu mocy do $P=40 \text{ kW}$; znamionowe obciążenie S1 przy $I_1 = 400 \text{ A}$ (bateria Li-ion), znamionowe obciążenie w reżimie S2-60 przy $I_1 = 620 \text{ A}$ oraz dla przeciążenia chwilowego $I_1 = 1000 \text{ A}$



Rys. 10. Obliczone charakterystyki mocy mechanicznej silnika PMSM w funkcji prędkości obrotowej dla warunków pracy: przy ograniczeniu mocy do $P=40 \text{ kW}$; znamionowe obciążenie S1 przy $I_1 = 400 \text{ A}$ (bateria Li-ion), znamionowe obciążenie w reżimie S2-60 przy $I_1 = 620 \text{ A}$ oraz dla przeciążenia chwilowego $I_1 = 1000 \text{ A}$

6. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój technologii związanych z silnikami wzbudzanymi magnesami trwałymi znajduje swoje wytłumaczenie w coraz większym zapotrzebowaniu na energooszczędne i coraz wydajniejsze układy napędowe dla aplikacji w różnych gałęziach przemysłu.

Przemysł górniczy z uwagi na wymagające normy bezpieczeństwa oraz trudne warunki pracy urządzeń dołowych, pozwala adoptować rozwiązania, które zostały sprawdzone w innych aplikacjach i które można bezpiecznie zastosować w warunkach kopalnianych.

Silniki wzbudzone magnesami trwałymi są powszechnie stosowane w niemal każdej gałęzi przemysłu. Instytut KOMEL opracował rozwiązania, które pozwoliły na bezpieczne wdrowanie.

żenie tego typu silników do pracy w kopalniach, a nawet do stref zagrożonych wybuchem pyłu węglowego oraz metanu [1]. Obecnie wraz z kooperantami ITG EMAG oraz fabryką DAMEL opracowywane są rozwiązania silników PMSM do nowych aplikacji górniczych, jak np. wentylatory lutniowe, taśmociągi, kombajny ścianowe, lokomotywy bateryjne i zasilane z trakcji.

Przedstawiony w artykule model obliczeniowy oraz metoda obliczeniowa stanowią podstawę do dalszych prac w zakresie modernizacji lokomotyw kopalnianych. Metoda połowo-obwodowa zastosowana do zaprojektowania obwodu elektromagnetycznego opisanego silnika PMSM oraz do obliczenia jego charakterystyk elektromechanicznych i parametrów znamionowych jest metodą stosowaną i sprawdzoną przez KOMEL na przestrzeni ostatnich kilku lat. Dowodem poprawności i przydatności tej metody są z powodzeniem wdrożone do przemysłu silniki synchroniczne z magnesami trwałymi produkcji KOMEL [1, 11, 12].

Zaproponowane rozwiązanie silnika PMSM dla lokomotywy Lea BM-12 oferuje zmniejszenie wzniosu silnika przy jednoczesnym stanowczym zwiększeniu jego mocy znamionowej. Zwiększenie mocy polega na dwukierunkowym podwyższeniu wartości parametrów pracy silnika: 1) zwiększenie momentu znamionowego 2) zwiększenie zakresu prędkości obrotowej (zarówno prędkości znamionowej, jak i prędkości maksymalnej).

Pomimo zwiększenia mocy znamionowej, obliczona sprawność silnika PMSM jest znacznie wyższa niż dotychczasowego silnika LDs-327. Wyznaczone parametry pracy sugerują producentom lokomotyw dołowych różne kierunki możliwej optymalizacji pracy napędów:

- 1) zmniejszenie gabarytów napędu poprzez zmniejszenie silnika/silników napędowych,
- 2) zwiększenie momentu znamionowego/maksymalnego silnika (zmniejszenie przekładni lub zwiększenie uciążu lokomotywy),
- 3) zwiększenie zakresu prędkości obrotowej silnika z zachowaniem obecnego momentu znamionowego co skutkuje zwiększeniem prędkości lokomotywy,
- 4) zwiększenie zasięgu lokomotywy poprzez zastosowanie napędu z silnikiem o wyższej sprawności energetycznej, wydajnych baterii litowo-jonowych oraz wysokosprawnego systemu hamowania odzyskowego.

W kolejnej publikacji (w niniejszym numerze Zeszytów Problemowych) autorzy przedstawili wybrane wyniki symulacji pracy napędu lokomotywy Lea BM-12 z dotychczas stosowanym silnikiem szeregowym LDs-327 oraz z proponowanym silnikiem PMSM.

Literatura

- [1]. J. Mróz, K. Skupień, A. Drwięga, Z. Budzyński, B. Polnik, D. Czerniak, P. Dukalski, L. Brymora: *Gentle accumulator drive (GAD) – new directions of development for the mining industry*, Przegląd Elektrotechniczny, 06.2013.
- [2]. E. Pieczora, H. Suffner: *Rozwój lokomotyw do kopalnianych kolei podziemnych*, Maszyny Górnicze, nr 2/2013.
- [3]. E. Pieczora: *Prognoza Rozwoju Szybowych Systemów Transportowych Stosowanych w Podziemiach Kopalń Węgla Kamiennego*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [4]. Z. Budzyński, B. Polnik, T. Gąsior: *Analiza porównawcza zastosowania napędu synchronicznego i asynchronicznego w górniczych lokomotywach akumulatorowych*, Maszyny Górnicze, nr 4/2011 (128).
- [5]. R. Rossa, E. Król: *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym e-Kit dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 4/2012 (97), str. 75-80.
- [6]. S. Gawron: *Metody stabilizacji napięcia wyjściowego w prądnicach z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 90, nr 12/2014.
- [7]. E. Król, M. Maciążek: *Wpływ algorytmu sterowania przekształtnika na właściwości napędu z silnikiem bezszczotkowym*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 1/2013 (98).
- [8]. V.B. Honsinger: *Performance of Polyphase Permanent Magnet Machines*, in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1510-1518, July 1980.
- [9]. M.A. Rahman, P. Zhou: *Determination of Saturated Parameters of PM Motors Using Loading Magnetic Fields*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-27, No. 5, pp. 3947-3950, Sep. 1991.
- [10]. P. Zhou, M.A. Rahman, M.A. Jabbar: *Field Circuit Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 4, pp. 1350-1359, July 1994.
- [11]. S. Gawron: *Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 1/2016(109), str. 1-10.
- [12]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2009/12.

Autorzy

mgr inż. Piotr Dukalski
dr inż. Robert Rossa
info@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

dr inż. Andrzej Dzikowski
andrzej.dzikowski@emag.pl
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
40-189 Katowice, ul. Leopolda 31

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

