

Petr Bogatyrev, Stanisław Gawron, Robert Rossa

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

OBLICZENIA ELEKTROMAGNETYCZNE SEPARATORA DROB- NYCH CZĄSTEK MAGNETYCZNYCH ZE WZBUDNIKIEM O CEWKACH SKUPIONYCH

ELECTROMAGNETIC CALCULATION OF THE FINE MAGNETIC PARTICLE SEPARATOR WITH THE CONCENTRATED WINDING EXCITER

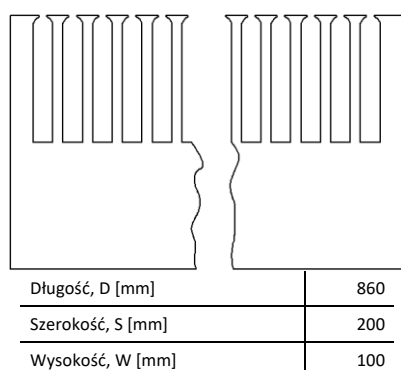
Streszczenie: W artykule opisano modernizację obwodu elektromagnetycznego (wzбудnika) separatora zaprojektowanego około 50 lat temu. Separator jest stosowany w przemyśle górnictwym i służy do oddzielania drobnych cząstek magnetycznych od niemagnetycznych. Głównym elementem roboczym separatora jest wzбудnik elektromagnetyczny zasilany 3-fazowym prądem przemiennym, który wytwarza wędrujące pole magnetyczne. Pole ciągnie za sobą cząsteczki magnetyczne, które gromadzą się na krawędzi separatora, skąd są usuwane. W ten sposób cząstki magnetyczne są oddzielane. Do takiego zadania zaproponowano zmodernizowaną konstrukcję wzбудnika separatora, która może zastąpić stary separator, przy znacznie mniejszych wymiarach gabarytowych i masie. Nową konstrukcję separatora opracowano na bazie silników liniowych projektowanych wcześniej w instytucie Łukasiewicz - KOMEL.

Abstract: The article describes the modernization of an electromagnetic circuit (exciter) of a separator designed about 50 years ago. This separator is used in the mining industry and is designed to separate fine magnetic particles (powder) from non-magnetic ones. The main working element of the separator is an electromagnetic exciter powered by 3-phase alternating current, which generates a running magnetic field. The field pulls magnetic particles that accumulate at the edge of the separator, from where they are removed. In this way, the magnetic particles are separated. For such a task, a modernized design of the separator exciter has been proposed, which can replace the old separator, with much smaller dimensions and weight.

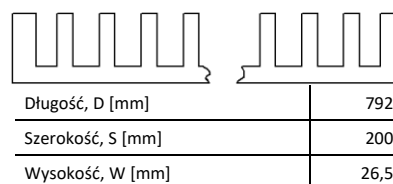
Słowa kluczowe: separator elektromagnetyczny, trójfazowy silnik liniowy, przemysł górnictwy, wzбудnik
Keywords: electromagnetic separator, three-phase linear motor, mining industry, exciter

1. Wstęp

Rozpatrujemy dwie konstrukcje wzбудników separatora płaskiego, o wykroju blach elektrotechnicznych jak na rysunku 1 – separator pierwotny i rysunku 2 – separator nowy, opracowany w Łukasiewicz - KOMEL.



Rys. 1. Wykroj blachy i wymiary rdzenia magnetycznego w pierwotnym rozwiązaniu wzбудnika separatora



Rys. 2. Wykroj blachy i wymiary rdzenia magnetycznego w nowym rozwiązaniu wzбудnika, opracowanym w Łukasiewicz - KOMEL

Pierwotne rozwiązanie separatora od wielu lat jest używane w górnictwie i elektrowniach, do wychwytywania drobnych cząstek metali. Po długim okresie użytkowania przyszedł czas na jego modernizację. Obliczenia elektromagnetyczne wykazały, że zmodyfikowany wzбудnik płaskiego liniowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi [1 ÷ 3], opracowanego kilka lat wcześniej w Łukasiewicz - KOMEL, może spełnić wymagania separatora, a ponadto, będzie miał korzystniejszy rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej oraz znacznie mniejsze wymiary gabarytowe i masę.

Produkcja starego separatora jest pracochłonna, ponieważ 3-fazowe uzwojenie wzbudnika jest wykonane z drutu profilowego, cewki uzwojenia są sztywne i złożone quasi-sinusoidalnie, dwuwarstwowo, w żłobkach półotwartych. Blachy rdzenia są w starym rozwiązaniu izolowane od siebie warstwą izolacji papierowej, co zmniejsza współczynnik zapęnlienia rdzenia. W separatorze zmodernizowanym zastosowano 3-fazowe, dwuwarstwowe uzwojenie wykonane cewkami skupionymi, osadzonymi w żłobkach otwartych. Blachy rdzenia wzbudnika są odizolowane od siebie warstwą lakieru, co umożliwia osiągnięcie współczynnika zapęnlienia rdzenia do 0.97.

Odseparowywanie drobnych cząstek magnetycznych z wykorzystaniem omawianych tu separatorów, odbywa się przez bezpośrednie podanie materiału podlegającego separacji na gładką, możliwie cienką płytę niemagnetyczną, przylegającą ściśle do powierzchni wzbudnika. Pole magnetyczne wytwarzane przez wzbudnik przemieszcza się liniowo na kierunku kolejnych podziałek biegunowych wzbudnika, przy czym prędkość liniowa tego pola jest zależna od liczby biegunów magnetycznych zastosowanej we wzbudniku oraz częstotliwości zasilania wzbudnika. Wraz z polem magnetycznym przemieszczają się schwyte przez to pole cząstki magnetyczne, które gromadzą się na krawędzi separatora, skąd są usuwane mechanicznie.

Z uwagi na przeznaczenie separatora do separacji drobnych cząstek magnetycznych (materiał podlegający separacji w postaci drobnego proszku), wysypywanych praktycznie bezpośrednio na powierzchnię wzbudnika, wymagana przestrzeń robocza separatora sięga do 5 mm pod powierzchnią wzbudnika.

Obliczenia elektromagnetyczne separatorów przeprowadzono w programach FEMM i Ansys Motor-CAD. W celu odwzorowania i zamodelowania rozkładu pola magnetycznego dla pierwotnego rozwiązania separatora, w AGH w Krakowie zmierzono rozkład indukcji przy powierzchni wzbudnika, w stałej odległości ok. 0.1 mm. Zmierzony rozkład indukcji odwzorowano obliczeniami elektromagnetycznymi. Wartości indukcji osiągnięte w pierwotnym rozwiązaniu stanowiły jedno z wymagań dla nowego rozwiązania. Innymi wymaganiami były: wymiary powierzchni roboczej pod wzbudnikiem, możliwość regulacji natężenia prądu zasilania wzbudnika, możliwość regulacji prędkości liniowej pola magnetycznego pod wzbudnikiem.

2. Opis konstrukcji wzbudnika separatora w wersji pierwotnej i nowej

W tabeli 1 zestawiono wybrane dane konstrukcyjne niezbędne do przeprowadzenia obliczeń elektromagnetycznych dla pierwotnego rozwiązania wzbudnika separatora, a w tabeli 2 podano odpowiednie dane dla nowego rozwiązania wzbudnika.

Tab. 1. Podstawowe dane konstrukcyjne wzbudnika w pierwotnym rozwiązaniu separatora

Długość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	860
Szerokość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	200
Wysokość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	100
Długość dwóch podziałek biegunowych, [mm]	141
Liczba par biegunów, p	6
Liczba żłobków wzbudnika, Q_s [-]	72
Liczba żłobków/biegun/fazę, q [-]	2
Liczba zwojów w cewce, N_k [-]	40
Liczba gałęzi równoległych, a_g [-]	1
Częstotliwość znamionowa zasilania, f [Hz]	50
Prąd znamionowy zasilania, I_N [A _{rms}]	10
Prąd znamionowy w pojedynczej gałęzi, I_{g-N} [A _{rms}]	10
Prędkość liniowa pola magnetycznego v, [m/s]	7.1

Tab. 2. Podstawowe dane konstrukcyjne wzbudnika dla nowego rozwiązania separatora

Długość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	792
Szerokość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	200
Wysokość rdzenia mag. wzbudnika, [mm]	26.5
Długość dwóch podziałek biegunowych, [mm]	48
Liczba par biegunów, p	16
Liczba żłobków wzbudnika, Q_s [-]	48
Liczba żłobków/biegun/fazę, q [-]	0.5
Liczba zwojów w cewce, N_k [-]	232
Liczba gałęzi równoległych, a_g [-]	16
Częstotliwość znamionowa zasilania, f [Hz]	148
Prąd znamionowy zasilania, I_N [A _{rms}]	40
Prąd znamionowy w pojedynczej gałęzi, I_{g-N} [A _{rms}]	2.5
Znamionowe napięcie fazowe, U_{fN} [V _{rms}]	118
Prędkość liniowa pola magnetycznego, v [m/s]	7.1

W pierwotnym rozwiązaniu wzbudnika zastosowano liczbę par biegunów magnetycznych $p = 6$. Przy częstotliwości zasilania 50 Hz, uzy-

skuje się w tym rozwiązaniu prędkość liniową przemieszczania pola magnetycznego ok. 7.1 m/s.

Rdzeń magnetyczny wzbudnika w starej konstrukcji posiada stosunkowo wąskie i długie zęby, (Rys.1), co przy wyższych prądach zasilania skutkuje znacznym rozproszeniem żłobkowym strumienia magnetycznego (Rys.3).

W nowym rozwiązaniu wzbudnika zastosowano liczbę par biegunów magnetycznych $p = 16$. Dwie podziałki biegunowe mają w tym rozwiązaniu długość 48 mm, zatem dla uzyskania prędkości liniowej pola magnetycznego 7.1 m/s, konieczne jest zasilanie uzwojenia wzbudnika prądem o częstotliwości 148 Hz.

Liczbę zwojów w cewce N_k oraz liczbę gałęzi równoległych a_g dla nowego separatora dobrano tak, by dopasować się wartościami prądów i napięć (z uwzględnieniem możliwości chwilowego przeciążenia prądem do wartości $1.5 I_N$) do dostępnych na rynku przekształtników energoelektronicznych AC/AC. Jednym z wytypowanych do współpracy ze wzbudnikiem przekształtników AC/AC jest przekształtnik firmy SIEMENS, typ Sinamics V20, 6SL3210-5BE32-2UV0 [4].

Wzbudnik wg rozwiązania Łukasiewicz – KOMEL (Rys.2 i Tab.2) ma korzystniejszy rozkład pola magnetycznego w przestrzeni roboczej do 5 mm pod wzbudnikiem (Rys.3b). Ponadto, dla zbliżonego punktu pracy obu separatorów (zbliżona wartość maksymalna modułu indukcji przy powierzchni roboczej wzbudnika, ok. 0.3 T w odległości 0.1 mm, wartość średnia modułu indukcji w obrębie pary biegunów ok. 0.1 T w odległości 0.1 mm), indukcje w zębach rdzenia magnetycznego nowego rozwiązania są niższe, a rozproszenie żłobkowe strumienia wzbudzenia jest mniejsze. Np. przy zasilaniu prądem znamionowym, maksymalna wartość indukcji magnetycznej w zębach nowego wzbudnika nie przekracza 0.79 T, podczas gdy w starym rozwiązaniu, dla podobnego punktu pracy, indukcja ta osiąga 0.88 T.

3. Obliczenia elektromagnetyczne separatora z wykorzystaniem magnetostaticznej analizy MES 2D

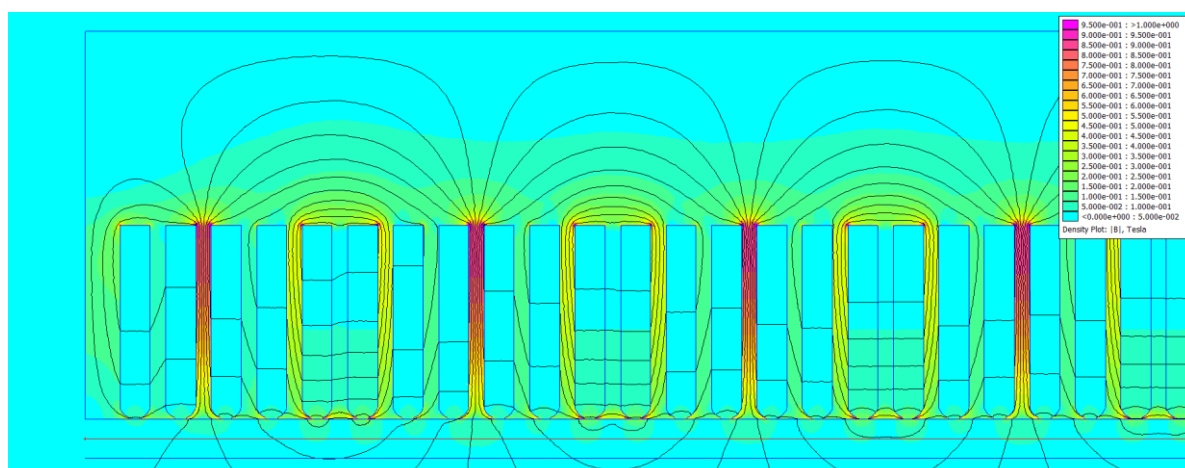
Obliczenia rozkładu pola magnetycznego dla pierwotnej i nowej wersji separatora wykonano w pierwszej kolejności z wykorzystaniem magnetostaticznej analizy metodą elementów skończonych (MES) 2D w programie FEMM oraz dodatkowo z wykorzystaniem analizy MES 2D dla stanów przejściowych, dostępnej w oprogramowaniu Ansys Motor-CAD.

Obliczenia elektromagnetyczne w FEMM przeprowadzono algorytmem bazującym na metodzie strumienia skojarzonego, opracowanym wcześniej do projektowania płaskich linowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi [5, 6]. Algorytm ten może być stosowany także do projektowania wzbudników separatorów płaskich. Algorytm umożliwia m.in. obliczanie przebiegów czasowych napięć zasilania dla ustalonego stanu pracy, z założeniem, że wymuszeniem w modelu obliczeniowym są prądy sinusoidalnie zmienne. W oparciu o zadane i obliczane przebiegi czasowe wielkości elektrycznych, algorytm pozwala obliczyć m.in.: wartości skuteczne napięć, współczynnik mocy $\cos\varphi$, moc zasilania wzbudnika.

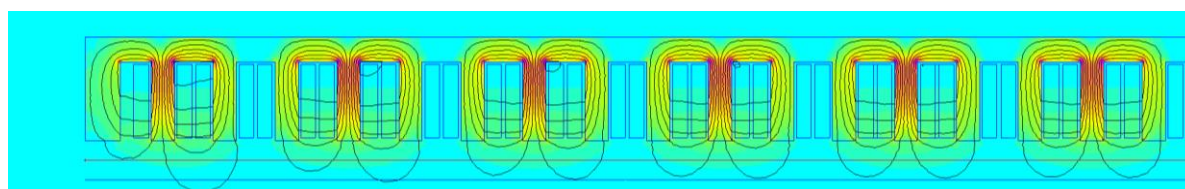
Na poniższych rysunkach przedstawiono wybrane wyniki obliczeń elektromagnetycznych zrealizowanych w programie FEMM. Na rysunkach 3 i 4 pokazano rozkłady indukcji magnetycznej i linie ekwipotencjalne pola magnetycznego na przekrojach poprzecznych wzbudnika w rozwiązaniu pierwotnym i nowym, w znamionowych warunkach pracy.

Na rysunkach 5 i 6 pokazano wartość modułu indukcji $|B|$, a na rysunkach 7 i 8 składową normalną indukcji B_n , w odległości $d = 0.1$ mm oraz $d = 5$ mm od powierzchni rdzenia magnetycznego wzbudnika, w wykonaniu pierwotnym i nowym.

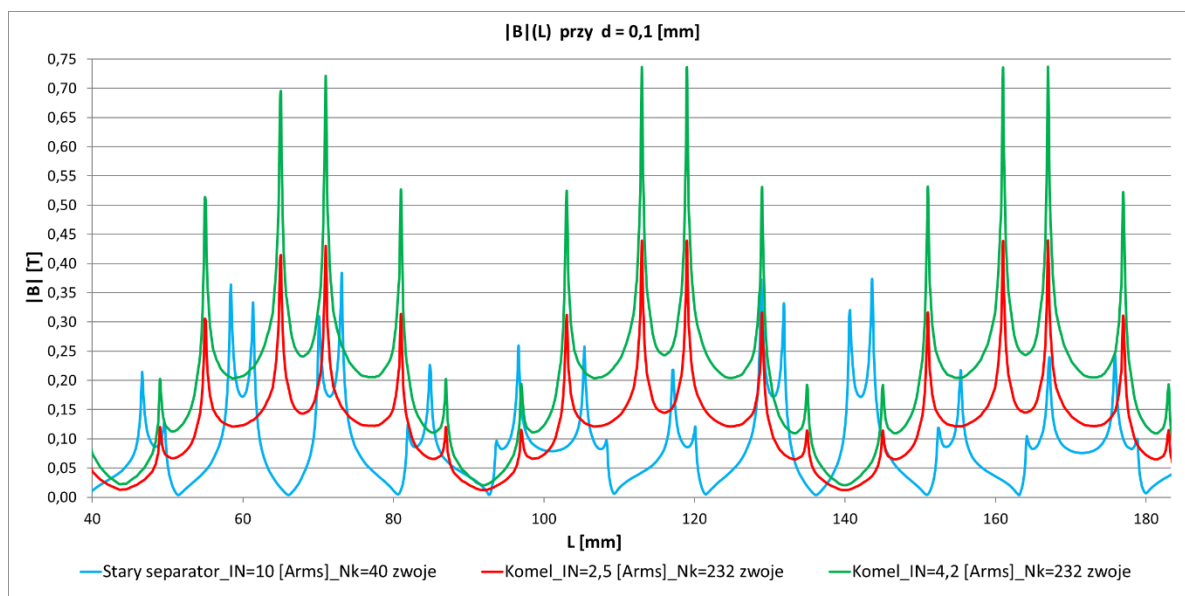
Rysunki 9 do 12 przedstawiają przebiegi czasowe wielkości elektrycznych obliczone dla nowego rozwiązania wzbudnika z pomocą algorytmu opisanego w publikacjach [5, 6].



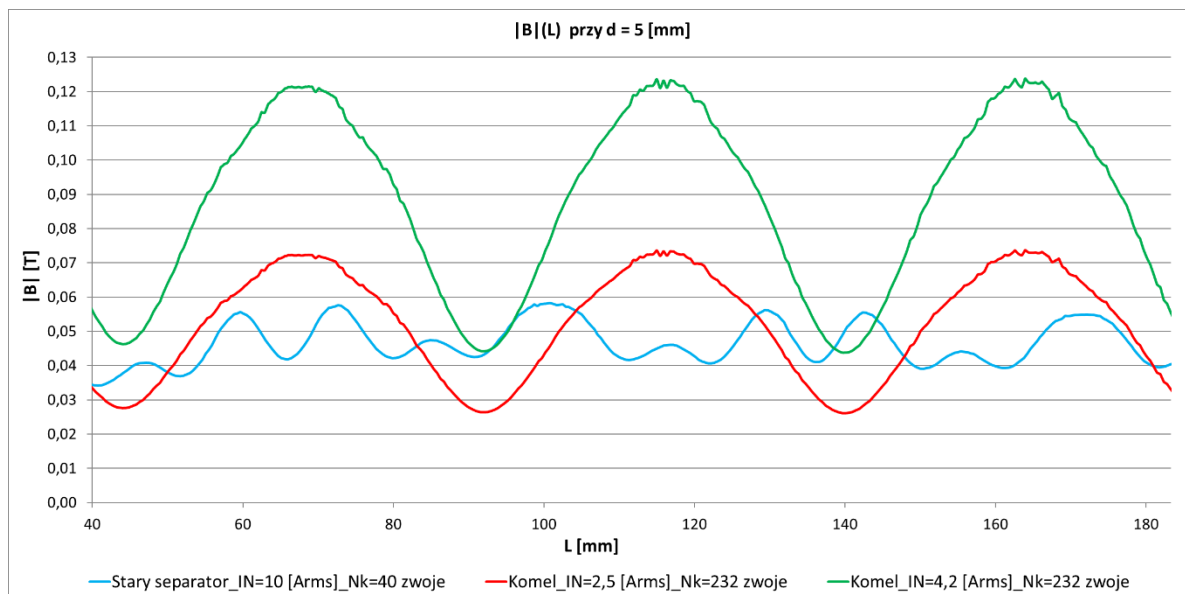
Rys.3. Obliczony rozkład indukcji magnetycznej i linie ekwipotencjalne pola magnetycznego na przekroju poprzecznym pierwotnego rozwiązania wzbudnika. Liczba zwojów cewki $N_k = 40$; prąd zasilania $I = I_N = 10 A_{rms}$. Linie pod wzbudnikiem w odległości 5 i 10 mm



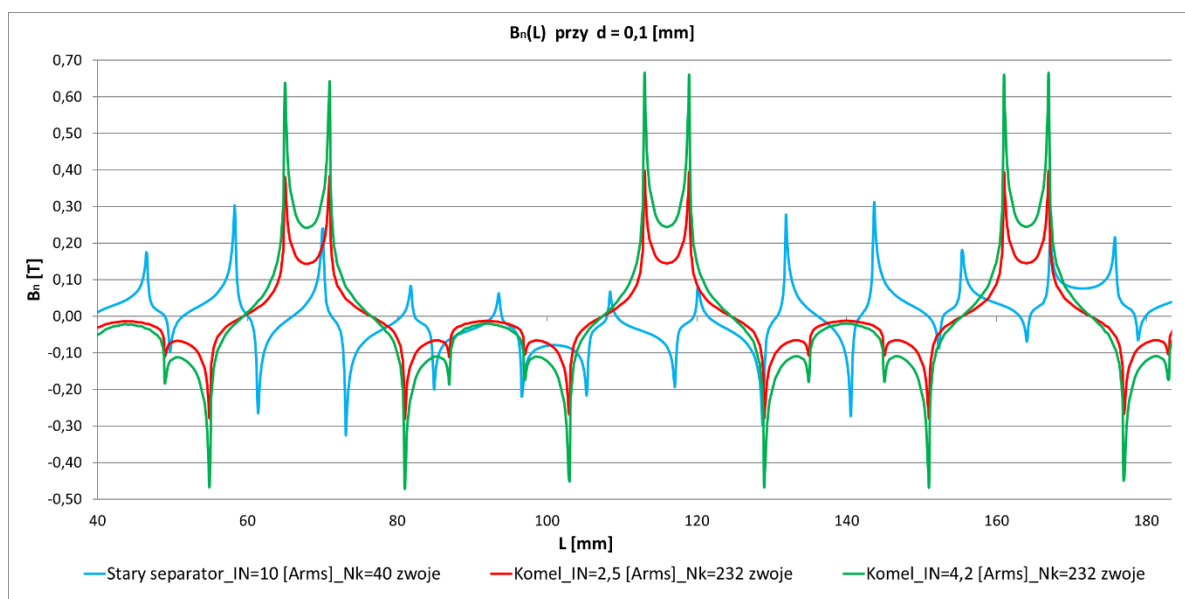
Rys.4. Obliczony rozkład indukcji magnetycznej i linie ekwipotencjalne pola magnetycznego na przekroju poprzecznym nowego rozwiązania wzbudnika. Liczba zwojów cewki $N_k = 232$; prąd zasilania $I = I_N = 40 A_{rms}$. Linie pod wzbudnikiem w odległości 5 i 10 mm, skala rysunku identyczna jak dla rys.3



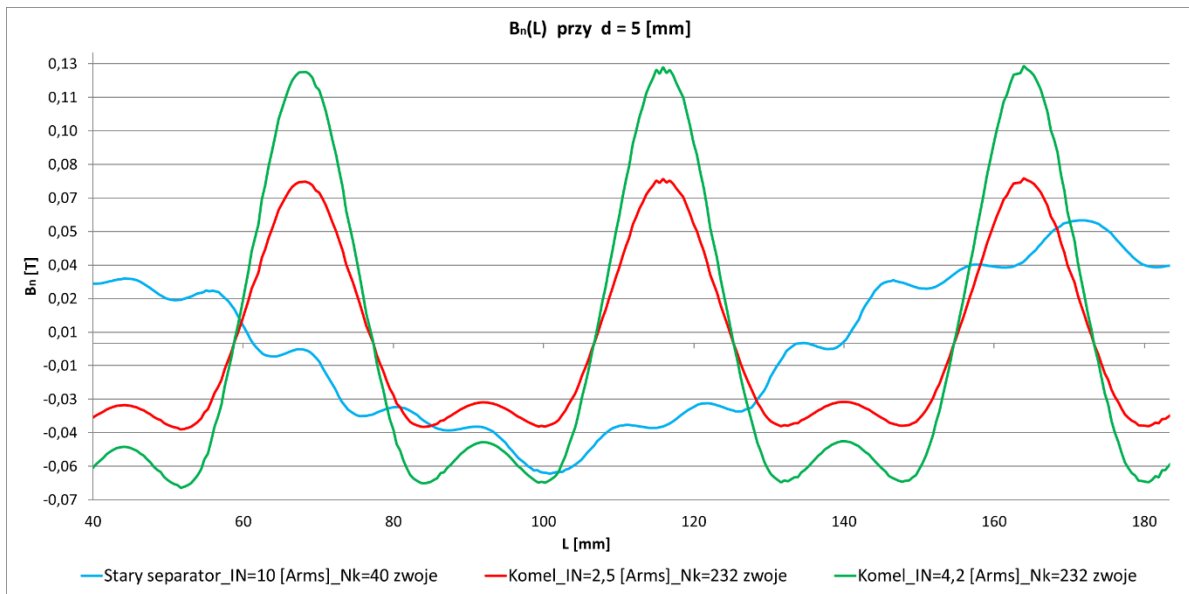
Rys.5. Obliczone w FEMM rozkłady przestrzenne modułu indukcji $|B|$ wzdłuż długości czynnej wzbudnika, w odległości $d = 0.1$ mm od jego powierzchni (z uwagi na czytelność, ograniczono wykres do fragmentu wzbudnika o długości ok. 140 mm)



Rys.6. Obliczone w FEMM rozkłady przestrzenne modułu indukcji $|B|$ wzdłuż długości czynnej wzbudnika, w odległości $d = 5$ mm, dla wybranych wartości prądu zasilania (pokazano wyniki dla fragmentu wzbudnika obejmującego ok. 140 mm)



Rys.7. Obliczone rozkłady przestrzenne składowej normalnej indukcji B_n wzdłuż długości czynnej wzbudnika, w odległości $d = 0.1$ mm, dla wybranych wartości prądu zasilania (pokazano fragment obejmujący ok. 140 mm długości)



Rys.8. Obliczone rozkłady przestrzenne składowej normalnej indukcji B_n wzdłuż długości czynnej wzbudnika, w odległości $d = 5$ mm, dla wybranych wartości prądu zasilania (pokazano fragment obejmujący ok. 140 mm długości)

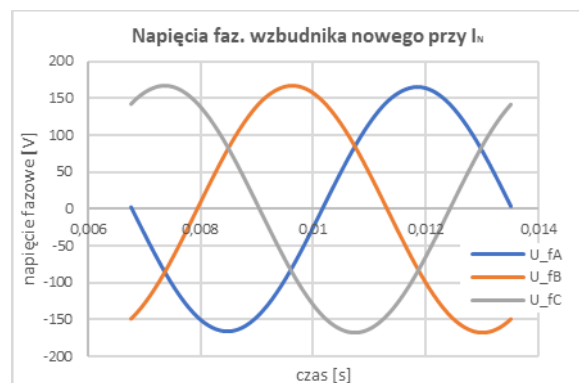
Wyniki obliczeń elektromagnetycznych zrealizowanych z pomocą magnetostatycznej analizy MES 2D wskazują, że wymagany poziom maksymalnej indukcji magnetycznej pod wzbudnikiem nowego separatora jest osiągnięty przy prądzie zasilania 40 A. Obliczenia uwzględniające przebiegi czasowe wielkości elektrycznych, zrealizowane dla nowego wzbudnika algorytmem opisanym w publikacjach [5, 6], dały wyniki zestawione w tabeli 3.

Tab.3. Wyniki obliczeń nowego wzbudnika wg algorytmu opisanego w [5, 6]

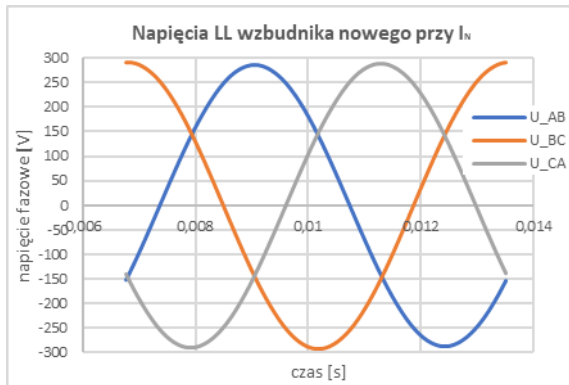
Obciążenie znamionowe	
prąd zasilania, [A _{rms}]	40
napięcie międzyfazowe, [V _{rms}]	204
moc czynna pobierana, [kW]	3.12
moc bierna pobierana, [VA]	14.2
współczynnik mocy cos φ , [-]	0.221
Chwilowe przeciążenie 1.5 I_N	
prąd zasilania, [A _{rms}]	67.2
napięcie międzyfazowe, [V _{rms}]	343
moc czynna pobierana, [kW]	8.82
moc bierna pobierana, [VA]	39.9
współczynnik mocy cos φ , [-]	0.221



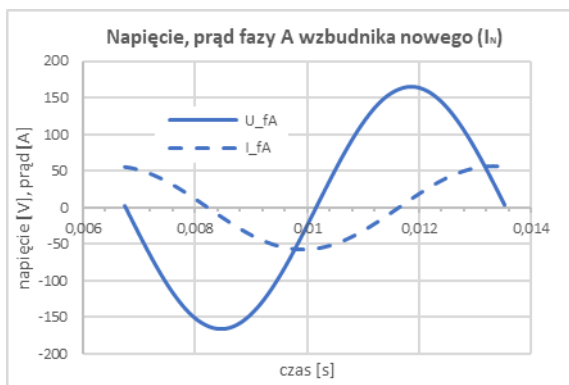
Rys.9. Przebiegi czasowe prądu zadane w algorytmie [5, 6], przy obliczeniach nowego wzbudnika dla warunków zasilania: I_N, f_N



Rys.10. Obliczone w algorytmie [5, 6] przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach nowego wzbudnika, dla warunków zasilania: I_N, f_N



Rys.11. Obliczone w algorytmie [5, 6] przebiegi czasowe napięć międzyfazowych na zaciskach nowego wzbudnika, przy zasilaniu: I_N, f_N



Rys.12. Obliczone w algorytmie [5, 6] przesunięcie fazowe przebiegów prądu i napięcia dla fazy A uzwojenia nowego wzbudnika, dla warunków zasilania: I_N, f_N

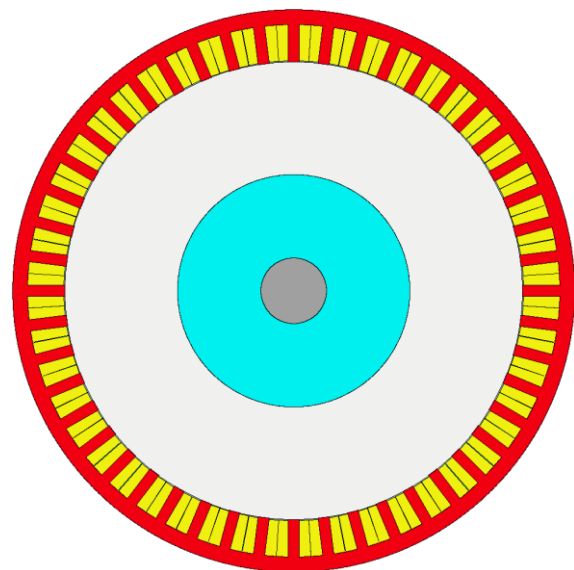
4. Obliczenia elektromagnetyczne w programie Ansys Motor-CAD

W programie Motor-CAD nie zaimplementowano algorytmów do obliczeń elektromagnetycznych płaskich silników liniowych. Jednak zastępczo, z dobrym przybliżeniem, wzbudnik zaproponowanego nowego rozwiązania płaskiego separatora liniowego można pod względem elektromagnetycznym rozpatrywać jako „zwinięty”, tak by utworzyć twornik 3-fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i cewkami skupionymi (ang. skrót CWPMSM). W tym celu, w Motor-CAD opracowano model obliczeniowy silnika CWPMSM z wirnikiem wewnętrznym, o następujących danych (Rys.):

- liczba żłobków stojana jak dla nowego rozwiązania wzbudnika, $Q_s = 48$;
- szerokość otwarcia żłobka stojana identyczna jak dla nowego rozwiązania wzbudnika;

- szerokość zęba stojana identyczna jak dla nowego rozwiązania wzbudnika, stała na całej wysokości zęba;
- długość osiowa silnika równa szerokości wzbudnika D ;
- dane nawojowe uzwojenia w modelu obliczeniowym identyczne jak dla nowego wzbudnika;
- szczelina powietrzna, wymiary i parametry magnetyczne magnesów trwałych w „zwiniętym” modelu obliczeniowym dobrane tak, by wyeliminować skojarzenie strumienia wzbudzenia od magnesów trwałych z uzwojeniem twornika (w uzwojeniu nie indukuje się siła elektromotoryczna wynikająca z wirowania wirnika z magnesami);
- liczba biegunów magnetycznych w wirniku oraz prędkość obrotowa wirnika dobrane tak, by częstotliwość prądu twornika w modelu obliczeniowym była równa częstotliwości prądu w analizowanym wzbudniku.

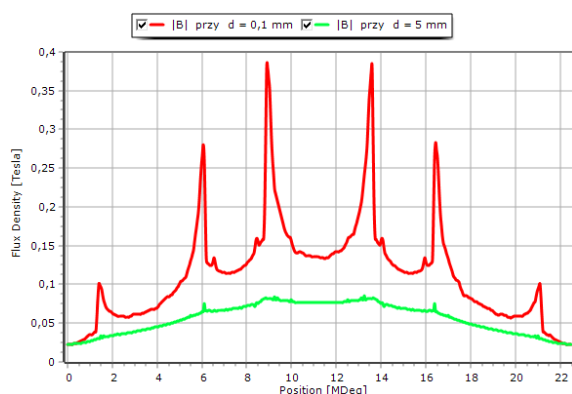
Zastępczy „zwinięty” model obliczeniowy nie uwzględnia oczywiście efektów skrajnych występujących po obu stronach na długości D wzbudnika.



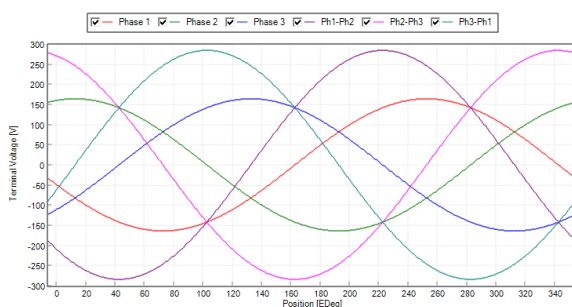
Rys.13. Zastępczy, „zwinięty” model zmodernizowanego wzbudnika separatora cząstek magnetycznych, opracowany w Motor-CAD

Zastosowana do obliczeń elektromagnetycznych na modelu zastępczym w Motor-CAD analiza MES dla stanów przejściowych umożliwia obliczenie przebiegów czasowych, a następnie wartości skutecznych napięć zasilania wzbudnika, przy czym założono, że wymuszeniem w modelu zastępczym jest prąd sinusoidalnie

zmienny. Znając przebiegi czasowe prądów i napięć zasilania, można obliczyć moc zasilania i współczynnik mocy $\cos \varphi$.



Rys.14. Obliczony w Motor-CAD rozkład przestrzenny modułu indukcji $|B|$, w odległościach $d = 0.1$ mm i 5 mm od powierzchni wzbudnika, przy zasilaniu: I_N , f_N (fragment obejmujący jedną parę biegunów)



Rys.15. Obliczone w Motor-CAD przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych na zaciskach nowego wzbudnika, przy zasilaniu: I_N , f_N

Tab.4. Wyniki obliczeń nowego wzbudnika na modelu zastępczym w Motor-CAD

Obciążenie znamionowe	
prąd zasilania, [A _{rms}]	40
napięcie międzyfazowe, [V _{rms}]	202
moc czynna pobierana, [kW]	3.13
moc bierna pobierana, [VA]	15.2
współczynnik mocy $\cos \varphi$, [-]	0.224
Chwilowe przeciążenie 1.5 I _N	
prąd zasilania, [A _{rms}]	67.2
napięcie międzyfazowe, [V _{rms}]	339
moc czynna pobierana, [kW]	8.84
moc bierna pobierana, [VA]	39.5
współczynnik mocy $\cos \varphi$, [-]	0.224

Wyniki obliczeń elektromagnetycznych zamieszczone w tabelach 3 i 4 wskazują na bardzo dobrą zgodność obu modeli obliczeniowych opracowanych dla analizowanego wzbudnika separatora, pomimo zastosowania istotnie różnych metod obliczeniowych.

5. Podsumowanie

Zaproponowane, nowe rozwiązanie wzbudnika separatora charakteryzuje się wyższym poziomem indukcji magnetycznej w założonej strefie roboczej do 5 mm pod wzbudnikiem, w warunkach znamionowych zasilania (Rys. 5 ÷ 8). Przy większych odległościach od powierzchni wzbudnika korzystniejszy jest rozkład indukcji w pierwotnym rozwiązaniu wzbudnika, z uwagi na mniejszą liczbę biegunów magnetycznych i związaną z tym głębszą penetrację strumienia magnetycznego w obszarze pod wzbudnikiem (Rys.3).

Nowe rozwiązanie wzbudnika spełnia przyjęte wymagania dotyczące pola magnetycznego w obszarze roboczym, przy jednocześnie znacznie zmniejszonych wymiarach gabarytowych i masie oraz przy uproszczonej technologii wykonania uzwojenia, w którym zastosowano cewki skupione nawijane drutem okrągłym, zamiast cewek rozłożonych quasi-sinusoidalnie wykonanych drutem profilowym.

Literatura

- [1]. Materiały informacyjne firmy Etel, <http://www.etel.ch/documentation/catalogs-flyers/>;
- [2]. Materiały informacyjne firmy Tecnotion, <https://www.tecnotion.com/downloads/>;
- [3]. Materiały informacyjne firmy Beckhoff, <https://www.beckhoff.pl/>;
- [4]. Materiały informacyjne firmy Siemens, <https://new.siemens.com/pl/pl/produkty/technika-napedowa/sinamics-v20.html>;
- [5]. Rossa R., *Analiza polowo-obwodowa płaskich liniowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi*, Napędy i Sterowanie, Nr 12, grudzień 2018 r.
- [6]. Rossa R., *Metoda obliczeń charakterystyk elektromechanicznych płaskich liniowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 1/2018 (117).
- [7]. Boldea I., *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2013, ISBN 9781439845141.
- [8]. Boldea I., Nasyr S.A., *Linear Electric Actuators and Generators*, Cambridge University Press, 1997, ISBN: 978-0521480178.

- [9]. Gieras J.F., Piech Z.J., Tomczuk B.Z., *Linear synchronous motors: Transportation and Automation Systems, Second Edition (Electric Power Engineering Series)*, CRC Press, 2016 r., ISBN: 978-1-4398-4222-5.
- [10]. Kamiński G., Wygonowski T., *Uzwojenie synchronicznego silnika liniowego*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 92/2011.
- [11]. Kamiński G., Przyborowski W., Staszewski P., Biernat A., Kupiec E., *Design and Test Results of Laboratory Model of Linear Induction Motor for Automation Personal Urban Transport PRT*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93, Nr 3/2017.
- [12]. Muhammad Ali Masood Cheema, J.E. Fletcher, *Advanced Direct Thrust Force Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor*, ISBN: 978-3-030-40324-9.
- [13]. Buze A., Majewska M., Mokrosiński A., *Silniki liniowe płaskie o niskiej prędkości przy częstotliwości zasilania 50 Hz*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 24/76.
- [14]. Gawron S., *Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 1/2016 (109), str. 1-10.

Autorzy

mgr inż. Petr Bogatyrev
dr inż. Stanisław Gawron
dr inż. Robert Rossa
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów
i Maszyn Elektrycznych KOMEL
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188