

Renata SULIMA
Andrzej RUDEŃSKI

SILNIK TARCZOWY DO POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH – – CHARAKTERYSTYKA POLA MAGNETYCZNEGO

STRESZCZENIE *Artykuł opisuje konstrukcję, wykonane obliczenia oraz pomiary indukcji magnetycznej w bezrdzeniowym silniku tarczowym z magnesami trwałymi. Pomiary wykonano w stanie bezprądowym w dwu przypadkach: 1) przy rozmontowanym wirniku, t.j. na powierzchni magnesów przytwierdzonych do pojedynczej tarczy jarzmowej i 2) ze zmontowanym wirnikiem – pomiary w środku szczeliny powietrznej pomiędzy tarczami jarzmowymi z zamocowanymi magnesami. Wykonano obliczenia polowe 3D przedmiotowego silnika dla obu powyższych wariantów: z pojedynczą tarczą wirnika oraz ze zmontowanymi dwoma tarczami wirnika. Przeanalizowano i porównano wyniki pomiarów oraz obliczeń polowych silnika i stwierdzono znaczną zgodność uzyskanych wyników.*

Słowa kluczowe: *silniki bezrdzeniowe, silniki tarczowe, magnesy trwałe, pomiary indukcji magnetycznej, analiza polowa 3D*

1. WSTĘP

Pojazdy elektryczne zdobywają coraz szersze zastosowanie, począwszy od pojazdów wykorzystywanych do przewozu ładunków w halach magazynowych, portach lotniczych czy też węzłach komunikacyjnych, aż na transporcie

dr inż. Renata SULIMA
e-mail: r.sulima@iel.waw.pl
dr inż. Andrzej RUDEŃSKI
e-mail: a.rudenski@iel.waw.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 258, 2012

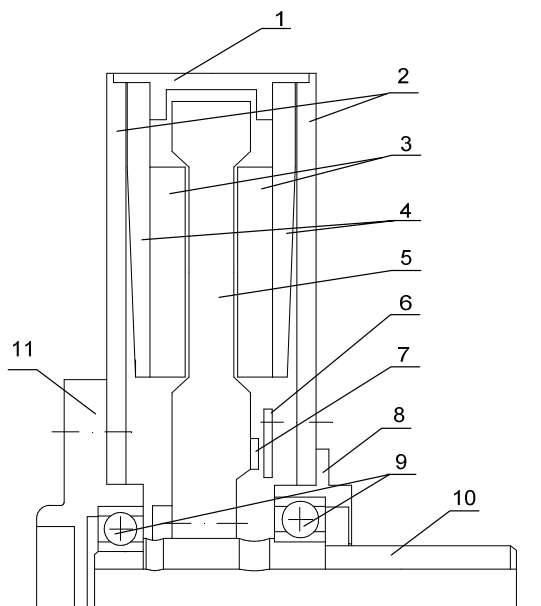
ludności skończywszy. Do tego celu służą różnego rodzaju wózki transportowe, inwalidzkie, golfowe, windy, statki, aż po samochody osobowe.

Obecnie większość budowanych pojazdów elektrycznych wyposażonych jest w silniki z magnesami trwałymi o strumieniu promieniowym. Moment napędowy wytwarzany w silniku elektrycznym przekazywany jest do kół pojazdu przez mechanizm różnicowy. Takie rozwiązanie jest tańsze od rozwiązania z napędem bezpośrednim, gdyż zastosowany jest tylko jeden silnik, lecz też mniej wydajne, ponieważ część mocy tracona jest w mechanicznych układach sprzęgających. W przypadku samochodów osobowych, gdzie rozwijana jest znaczna prędkość pojazdu, umieszczanie silnika napędowego poza zawieszeniem jest spowodowane koniecznością ograniczenia masy nieresorowanej. W innej sytuacji, gdy pojazd jest wykorzystywany do przewozu ludzi lub towarów na mniejsze odległości ze znacznie mniejszymi prędkościami (hale magazynowe, lotniska itp.), można wykorzystać do napędu pojazdu silniki umieszczone bezpośrednio w kołach [3, 6]. W tym przypadku szczególnie przydatne są silniki tarczowe ze względu na małe wymiary osiowe. Są one również wykorzystywane poza transportem lądowym, np. na statkach [4], jako magazyny energii [9], czy też w napędach wind osobowych [5], gdzie brakuje miejsca na pomieszczenie sterowni.

2. BADANIA LABORATORYJNE

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki wykonano silnik modelowy z magnesami trwałymi o strukturze tarczowej [1, 2], przewidziany do napędu wózka transportowego. Maszyna składa się z nieruchomego twornika z uzwojeniem 3-pasmowym zalany w formie żywicy epoksydową. Twornik jest umieszczony pomiędzy dwiema tarczami z przymocowanymi 24 magnesami neodymowymi, po 12 magnesów do każdej z tarcz. Ze względu na bardzo duże siły promieniowe odrywające magnesy od powierzchni tarcz jarzmowych (w przypadku projektowanego silnika ok. 5600 N), zrezygnowano z klejenia magnesów. Każdy z magnesów jest przykręcony do tarczy jarzmowej za pomocą dwóch wkrętów mosiężnych. Duże siły promieniowe wymusiły także konieczność zaprojektowania wirnika tak, by umożliwić bezpieczny montaż.

Twornik umieszczono na nieruchomym wydrążonym wale. Przez otwór w wale wyprowadzono przewody zasilające twornik oraz przewody czujnika położenia wirnika względem twornika. Widok poszczególnych elementów konstrukcyjnych silnika tarczowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przekrój silnika bezrdzeniowego tarczowego wykonanego w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEL [2]:

- 1 – kadłub,
- 2 – tarcze łożyskowe,
- 3 – magnesy,
- 4 – tarcze jarzmowe,
- 5 – twornik,
- 6 – czujnik położenia (część ruchoma),
- 7 – czujnik położenia (część nieruchoma),
- 8 – gniazdo łożyskowe wewnętrzne,
- 9 – łożyska,
- 10 – wał drążony,
- 11 – gniazdo łożyskowe zewnętrzne

Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi o mocy 1700 W zasilany ze źródła prądu stałego o napięciu 96 V przystosowany jest do mocowania w kole pojazdu. Koło jest przykręcone bezpośrednio do zewnętrznego gniazda łożyska silnika.

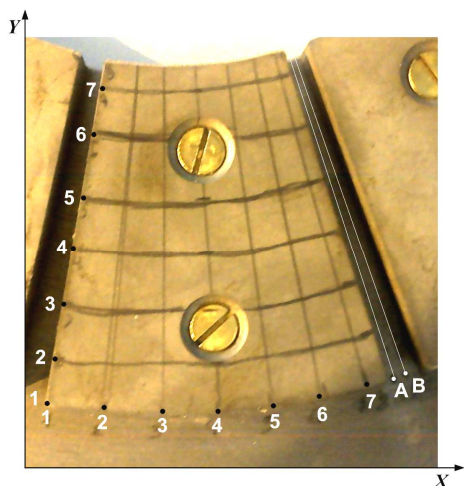
Zastosowana do obliczeń projektowych metoda i program nie były zweryfikowane pomiarowo. Z tego względu przeprowadzono rozszerzone badania obwodu magnetycznego, na które złożyły się pomiary indukcji magnetycznej w otoczeniu magnesów oraz jej obliczenia programem polowym Flux 3D.

W celu zobrazowania pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy neodymowe o remanencji $B_r = 1,3093 \text{ T}$ (wg danych producenta) wykonano dwie serie pomiarów; pierwszą przy obwodzie otwartym (jedna tarcza z magnesami), drugą przy obwodzie zamkniętym (silnik złożony bez twornika). Pomiary wykonano teslomierzem typu FM 210 z sondą Halla. Przyrząd został sprawdzony z wzorcem 1T VM 4-2 mm, o parametrach: $B = 981 \text{ mT}$, $H = 780 \text{ kA/m}$. Sprawdzenie potwierdziło, że błąd pomiarowy teslomierza nie przekracza wartości deklarowanej przez producenta.



Rys. 2. Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi wykonany w Instytucie Elektrotechniki

2.1. Pomiary indukcji magnetycznej na powierzchni pojedynczej tarczy wirnika



Rys. 3. Pojedynczy magnes zamontowany na tarczy wirnika wraz z naniesioną siatką pomiarową

Pomiary rozkładu indukcji magnetycznej (składowej normalnej do powierzchni biegunów magnesu) przeprowadzono na powierzchni magnesu w punktach wyznaczonych przez pokazaną na rysunku 3 siatkę pomiarową wyznaczającą 7x7 punktów pomiarowych.

Ponadto zmierzono indukcję magnetyczną odpowiadającą strumieniowi rozproszenia pomiędzy magnesami – punkty usytuowane na liniach A i B na rysunku 3.

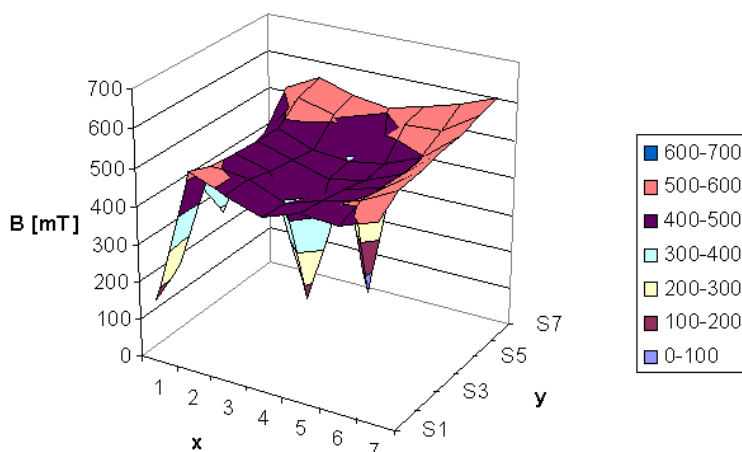
TABELA 1

Pomiary indukcji magnetycznej na powierzchni magnesu, według siatki przedstawionej na rysunku 3, wyniki B w [mT]

Y [pkt] \ X [pkt]	1	2	3	4	5	6	7
1	168	220	390	280	400	412	509
2	525	504	496	494	487	533	556
3	489	490	471	463	452	513	530
4	458	453	<u>157</u>	435	444	<u>42</u>	513
5	491	482	470	456	459	525	537
6	482	504	497	491	498	531	564
7	515	550	561	570	573	591	601

Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w punktach wyznaczonych przez siatkę pomiarową przedstawiono na rysunku 4.

Pomiary składowej normalnej indukcji do powierzchni magnesów pozwalają określić charakterystyczne punkty magnesu, tj. miejsca mocowania magnesu za pomocą śrub mosiężnych oraz krawędzie magnesu. W miejscach mocowania magnesu widać wyraźny spadek wartości indukcji magnetycznej (opadające szczyty), natomiast na krawędziach magnesu widoczna jest tendencja lekkiego wzrostu wartości indukcji magnetycznej.

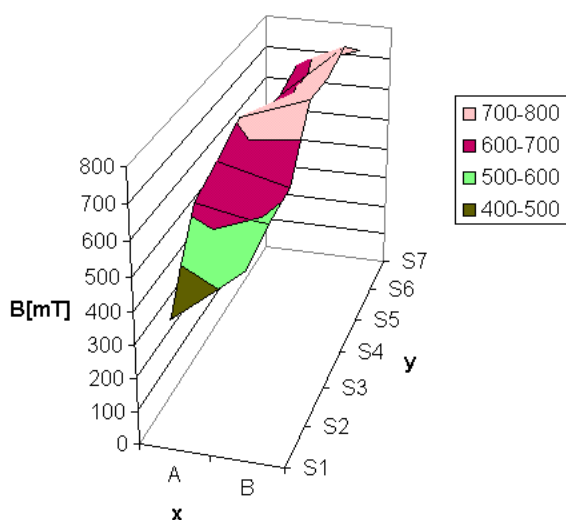


Rys. 4. Mapa rozkładu indukcji magnetycznej na powierzchni magnesu uzyskana w wyniku pomiarów sondą Halla

TABELA 2

Pomiary indukcji magnetycznej określającej rozproszenie między magnesowe w punktach A i B wykonane w szczelinie pomiędzy magnesami, według siatki przedstawionej na rysunku 3, wyniki B w [mT]

Y [pkt] \ X [pkt]	1	2	3	4	5	6	7
A	392	626	660	705	630	619	650
B	560	592	605	780	770	798	718



Rys. 5. Mapa rozkładu składowej indukcji (o kierunku prostopadłym do strumienia głównego) związanej z rozproszeniem w szczelinie pomiędzy magnesami

Indukcja magnetyczna związana z rozproszeniem w szczelinie pomiędzy magnesami była mierzona równoległe do powierzchni bocznych magnesu. Jej wartości wahają się w przedziale od 400 mT do 800 mT.

W trakcie projektowania obwodu magnetycznego silnika tarczowego interesujące były zjawiska zachodzące w miejscach newralgicznych obwodu,

tzn.: miejscach mocowania magnesów; w szczelinie powietrznej pomiędzy tarczami wirnika; na zewnętrznych powierzchniach tarcz jarzmowych silnika, do których montowano magnesy.

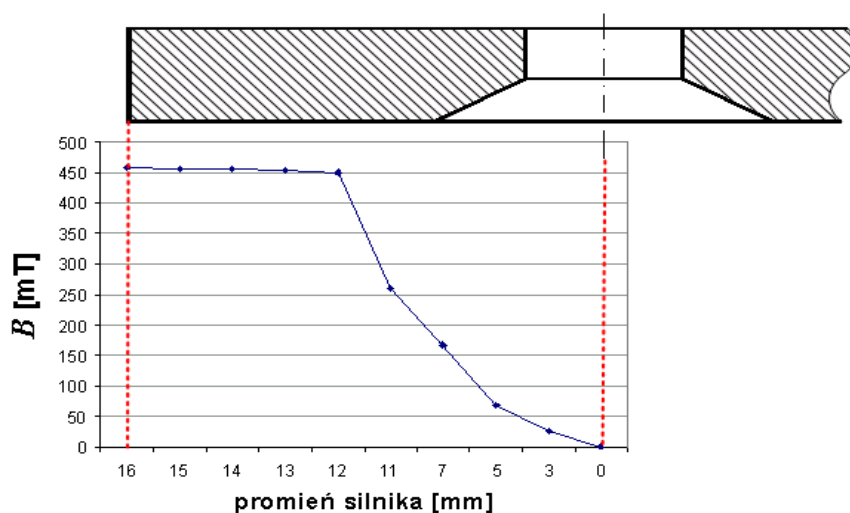
W celu dokładniejszego zobrazowania rozkładu indukcji magnetycznej w okolicy miejsca mocowania magnesu do tarczy jarzmowej wykonano pomiary indukcji magnetycznej wzdłuż linii wyznaczonej przez oś symetrii śrub mocujących.

TABELA 3

Pomiary indukcji wzdłuż linii, wyznaczonej przez śruby mocujące, wykonywane od punktu (4,1) począwszy z rysunku 3

Odległość od osi śruby [mm]	15	13	11	7	5	3	0
B [mT]	458	453	261	168	68	25	0

Pomiary rozpoczęto od krawędzi magnesu i przesuwano sondę pomiarową wzdłuż linii wyznaczonej przez osie śrub mocujących, aż do środka symetrii pierwszej śruby.

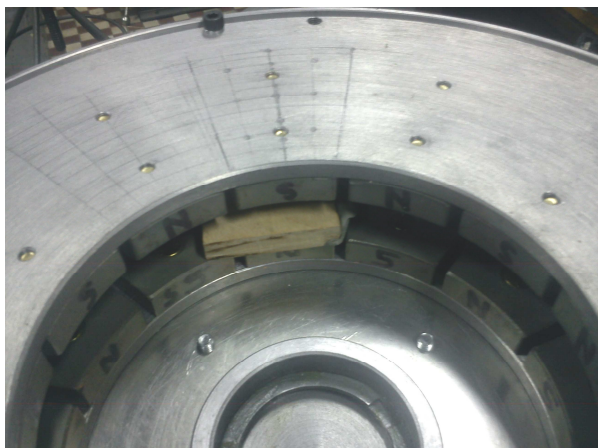


Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej B wzdłuż linii wyznaczonej osią śrub mocujących

Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż linii wyznaczonej przez osie śrub mocujących przedstawiono na rysunku 6. Wartość indukcji w osi śruby mocującej maleje do zera, a następnie wzrasta aż do wartości $B = 460$ mT przy krawędzi magnesu.

2.2. Pomiary indukcji magnetycznej w złożonym wirniku

Drugą serię pomiarów wykonano po zamontowaniu obu tarcz wirnika (bez twornika). Pomiary przeprowadzono w środku szczeliny powietrznej, tj. w połowie odległości pomiędzy powierzchniami magnesów.



Rys. 7. Widok silnika przygotowanego do pomiarów indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej (zdemontowana jedna tarcza łożyskowa oraz wyjęty twornik)

Z powodu dość trudnych warunków pomiaru – wąska szczelina pomiarowa pomiędzy szerokimi tarczami jarzmowymi – wykonano pomiary tylko w 9 charakterystycznych punktach magnesu, wyznaczonych przez siatkę przedstawioną na rysunku 8.



Rys. 8. Siatka pomiarowa naniesiona na magnes do pomiarów indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika po zmontowaniu obu tarcz wirnika

Pomiary indukcji magnetycznej w połowie długości szczeliny powietrznej obrazują znikomy wpływ sposobu mocowania magnesów (śruby mosiężne) na rozkład indukcji magnetycznej. W punkcie pomiarowym (2,1) wartość indukcji wynosi $B = 509$ mT, a w punkcie (2,3) – 497 mT nie odbiegają od wartości indukcji w pozostałych punktach pomiarowych.

Pomiary kontrolne wykonano również na powierzchni jarzma po przeciwnej stronie niż zamontowane magnesy w punktach określonych przez siatkę na rysunku 8.

TABELA 4

Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej po zmontowaniu obu tarcz z magnesami trwałymi B [mT]

Y [pkt] \ X [pkt]	1	2	3
1	513	509	461
2	583	613	519
3	483	497	476

TABELA 5

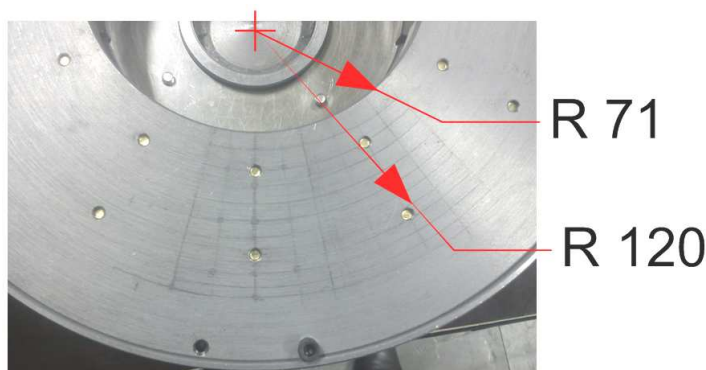
Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej na powierzchni jarzma wirnika B [mT]

Y [pkt] \ X [pkt]	1	2	3
1	19	12	18
2	18	12	16
3	17	15	16

Na zewnętrznej powierzchni tarczy jarzmowej silnika wartości indukcji magnetycznej (składowej normalnej do powierzchni jarzma) nie przekraczają 20 mT, co świadczy o braku rozpraszania strumienia magnetycznego poza jarzma silnika. Wartości indukcji w miejscach mocowania śrubami magnesów neodymowych nie odbiegają od wartości indukcji pozostałych punktów pomiarowych. Można zatem domniemywać, że w zamkniętym obwodzie magnetycznym (jak w pracującym silniku) wpływ mocowania magnesów na rozkład pola jest niewielki.

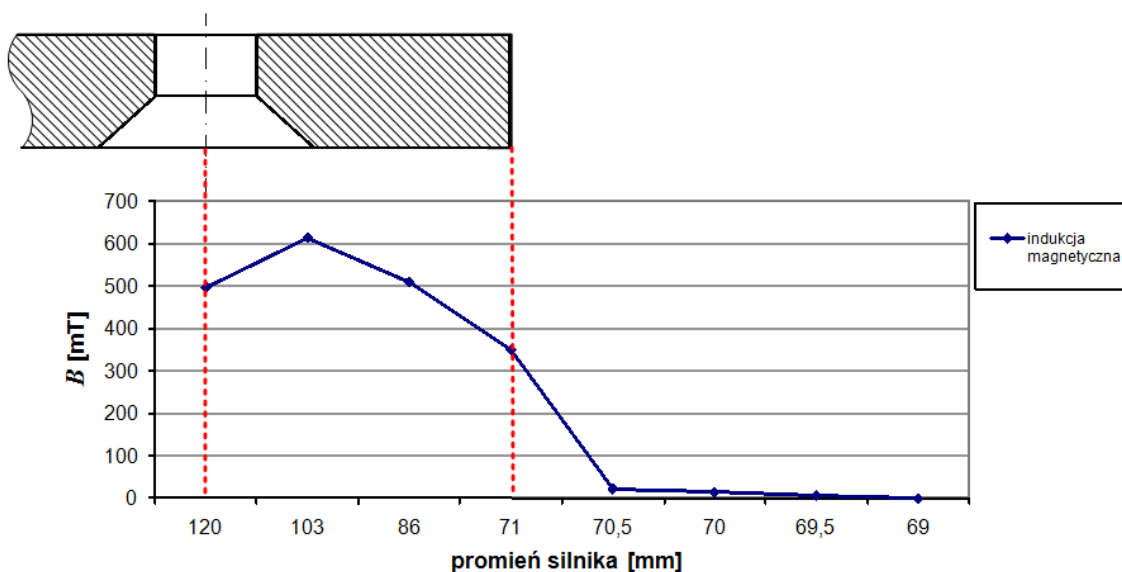
W następnej kolejności wykonano pomiary, mające na celu sprawdzenie szerokości obszaru, w jakim pole magnetyczne wytwarzane przez magnesy neodymowe jest rozpraszane. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 6.

Rys. 9. Obszar pomiaru indukcji magnetycznej wzdłuż promienia wewnętrznego silnika

**TABELA 6**

Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej wzdłuż promienia wewnętrznego silnika

B [mT]	497	613	509	350	22	14	6	0
Promień silnika [mm]	120	103	86	71	70,5	70	69,5	69



Rys. 10. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż promienia silnika, pomiar w środku szczeliny powietrznej

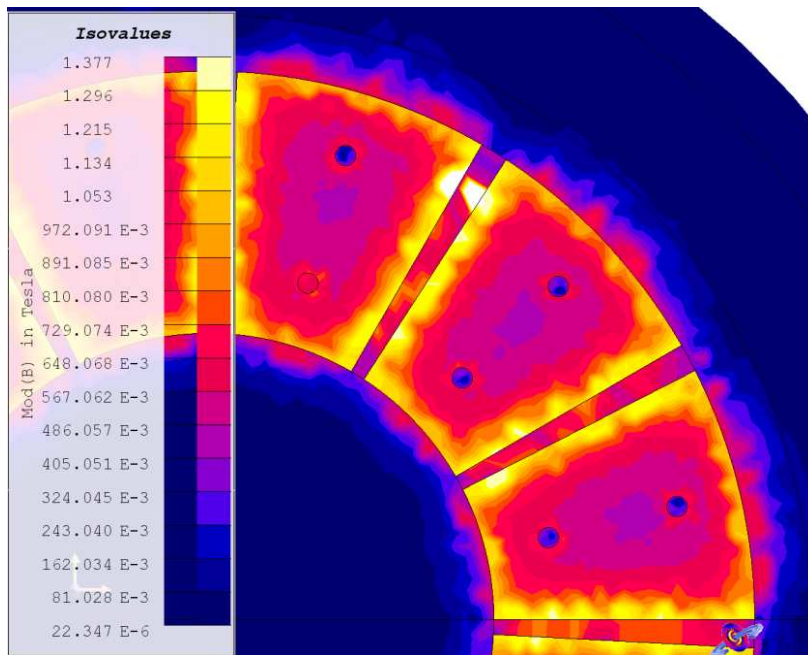
Na rysunku 10 przedstawiono wartości indukcji magnetycznej zmierzonej wzdłuż promienia silnika. Wewnętrzny promień jarzma silnika wynosi 71 mm. Pomiary wykonywano wzdłuż linii po promieniu w punktach od 69 do 120 mm. Gradient zmian wartości indukcji magnetycznej jest duży w przedziale 70-71 mm wzdłuż długości promienia silnika. Całkowity zanik indukcji magnetycznej rozproszenia obserwować można w przedziale od 0-69 mm wzdłuż promienia silnika. Obszar rozpraszania pola magnetycznego wynosi zatem ok. 2 mm.

3. OBLICZENIA POŁOWE

W celu zobrazowania rozkładu pola magnetycznego w całej strukturze silnika tarczowego wykonane zostały obliczenia wartości indukcji magnetycznej z wykorzystaniem oprogramowania Flux 3D.

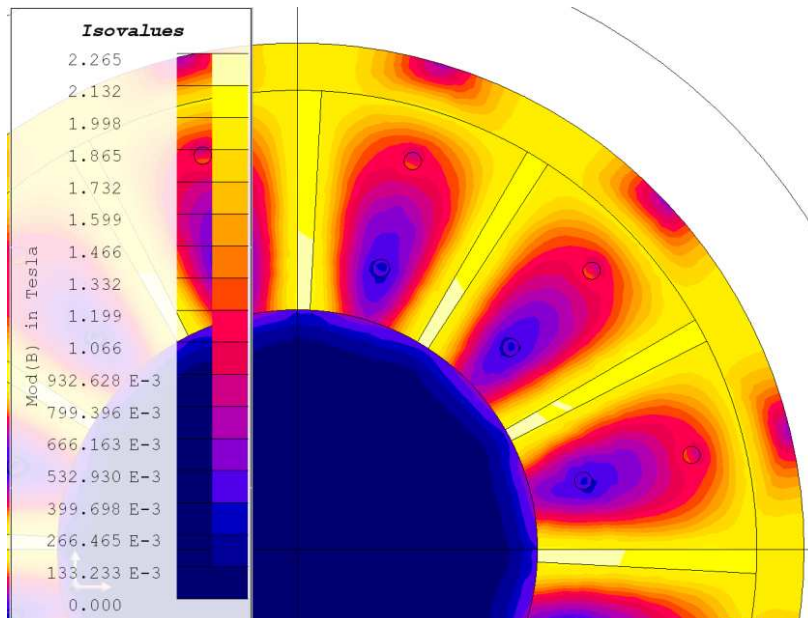
W pierwszej kolejności, podobnie jak w przypadku pomiarów, wykonano obliczenia dla pojedynczej tarczy jarzmowej z magnesami.

Rozkład indukcji na powierzchni magnesów przedstawiono na rysunku 11. Wartość tej indukcji otrzymana z obliczeń zwiększa się na krawędziach magnesów, co zaobserwowano również w pracy [8] i znacznie maleje w miejscach mocowania śrubami. Widoczny jest obszar rozpraszania pola magnetycznego wewnątrz otworu w tarczach jarzmowych.



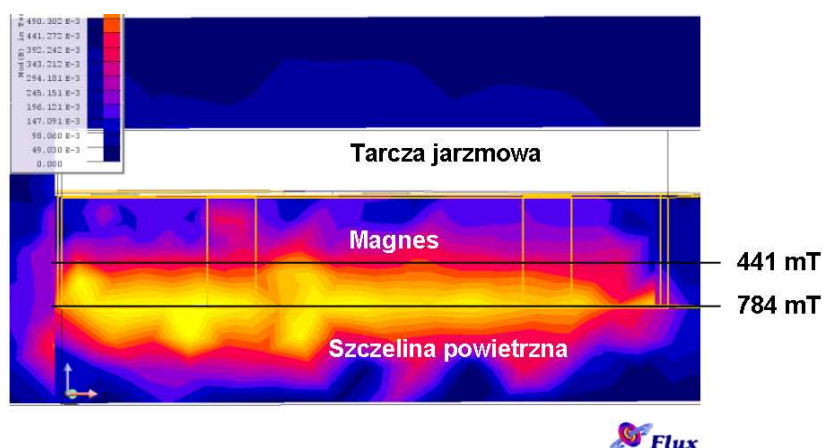
Rys. 11. Rozkład indukcji na powierzchni magnesów trwałych przy otwartym obwodzie magnetycznym, w przedziale $B = 400\text{-}1130\text{ mT}$

Od strony zewnętrznej powierzchni tarczy jarzmowej maksymalne wartości indukcji magnetycznej dochodzą do 2 T (naprzeciw szczelin pomiędzy magnesami) i znacznie maleją w obszarach odpowiadających środkom magnesów.

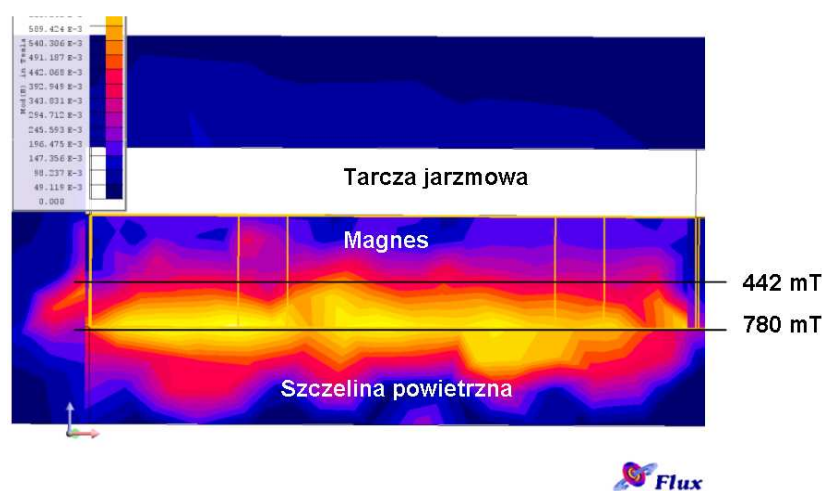


Rys. 12. Rozkład indukcji na zewnętrznej powierzchni tarczy wirnika, do której przymocowane są magnesy. Obliczenie przy otwartym obwodzie magnetycznym, wartość $B = 0,1\text{-}2,12\text{ T}$

Podobnie jak w przypadku pomiarów wykonano obliczenia wartości indukcji w przestrzeniach pomiędzy sąsiednimi magnesami. Płaszczyzny obliczeniowe przeprowadzono wzdłuż linii pomiarowych A i B z rysunku 3.



Rys. 13. Rozkład indukcji wzdłuż linii A według rysunku 3



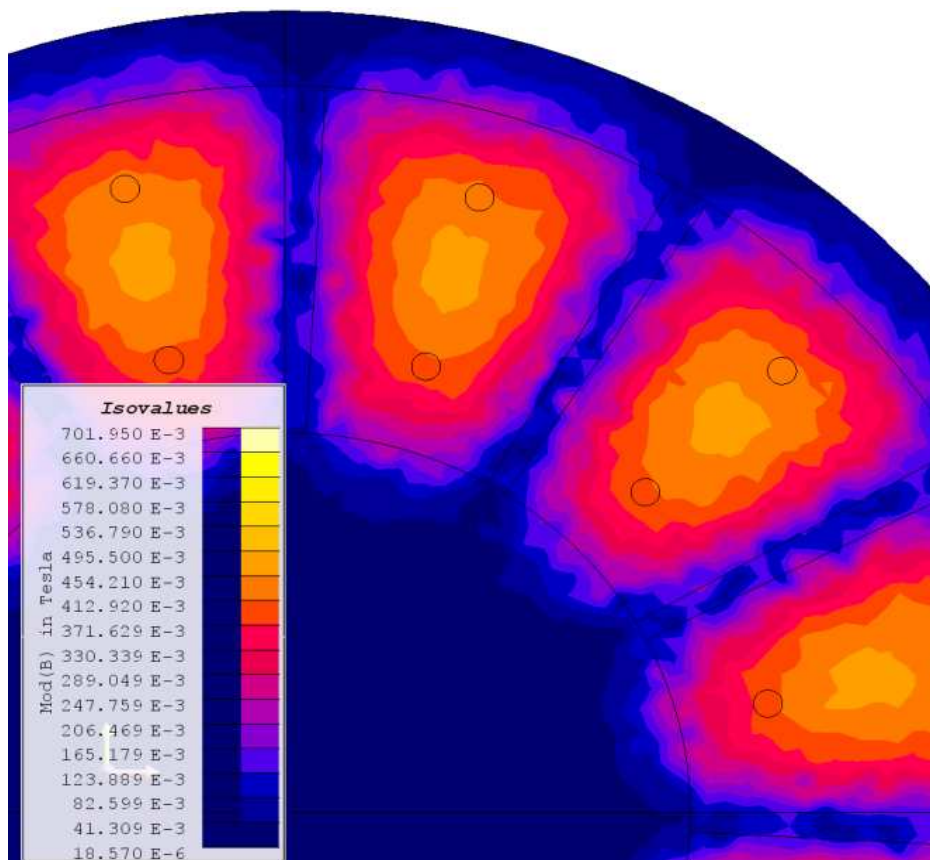
Rys. 14. Rozkład indukcji wzdłuż linii B według rysunku 3

Z obliczeń polowych 3D wynika, że wartość indukcji magnetycznej wzdłuż obu linii pomiarowych A i B wyznaczonych przez siatkę pomiarową z rysunku 3 stopniowo wzrasta od ok. 100 mT aż do 780 mT.

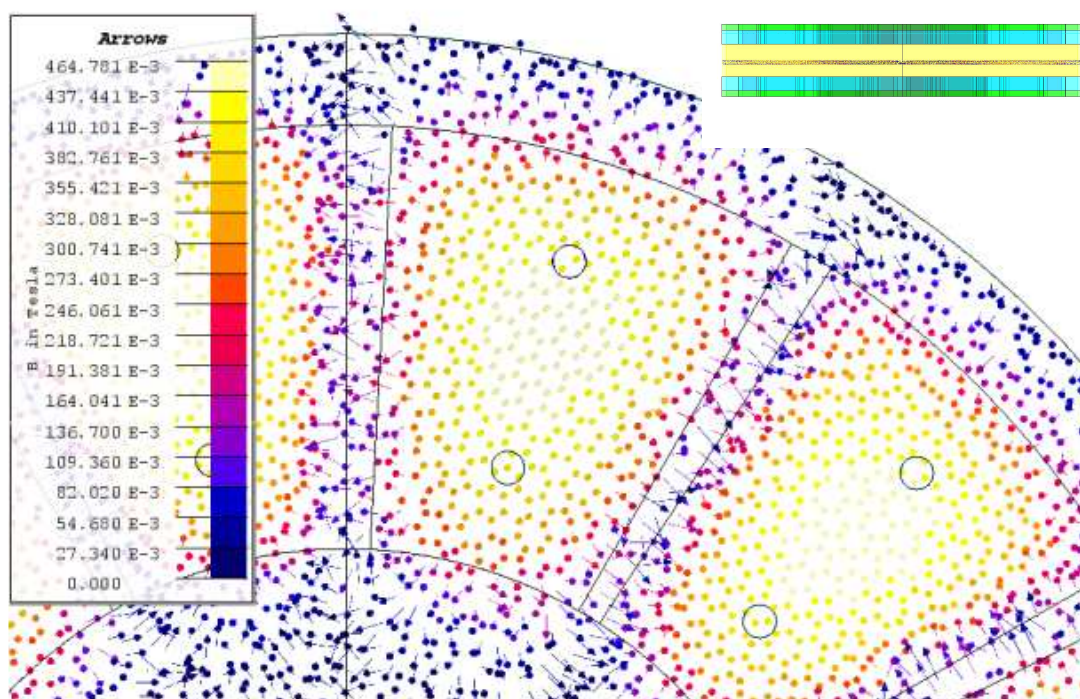
Następnie, podobnie jak w przypadku pomiarów, wykonano obliczenia dla zmontowanego wirnika zewnętrznego silnika, złożonego z dwóch tarcz jarzmowych z magnesami.

Wykonano obliczenia indukcji w środku szczeliny powietrznej silnika, co ilustrują rysunki 15 i 16.

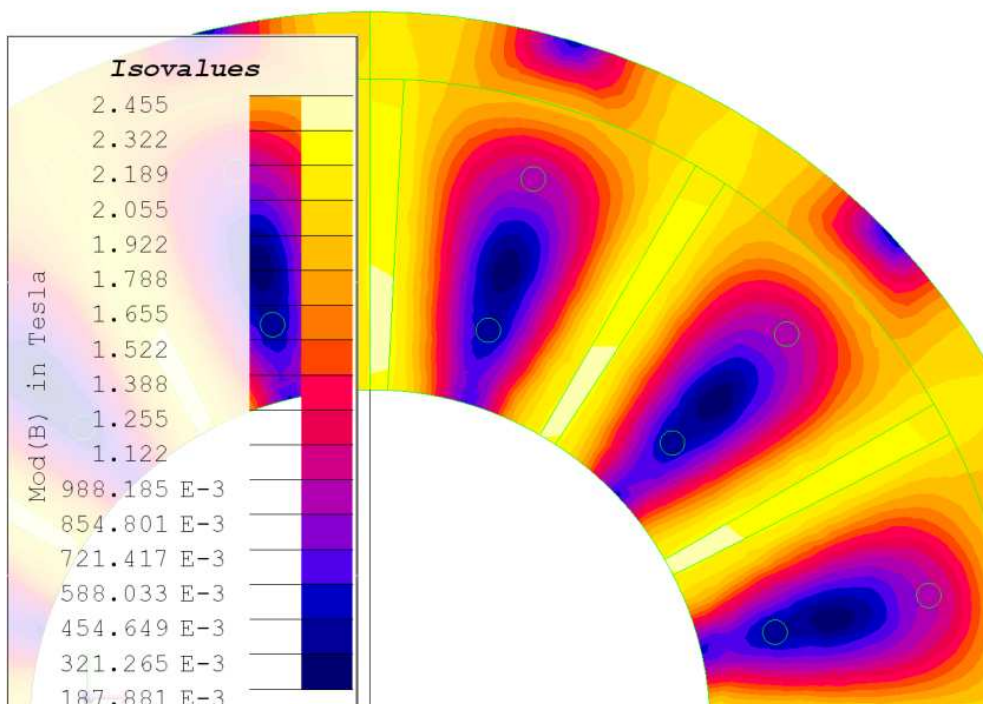
Kierunek i zwrot wektora indukcji magnetycznej obliczonej w środku szczeliny powietrznej silnika przedstawiono na rysunku 16. Mapę rozkładu indukcji magnetycznej przedstawiono na rysunku 15 w tym samym przekroju. Wartości indukcji B w obszarze magnesów osiągają maksimum ok. 500 mT (średnia wartość indukcji to ok. 300 mT), natomiast w szczelnie pomiędzy magnesami wartość ta spada do ok. 80 mT.



Rys. 15. Rozkład indukcji w środku szczeliny powietrznej

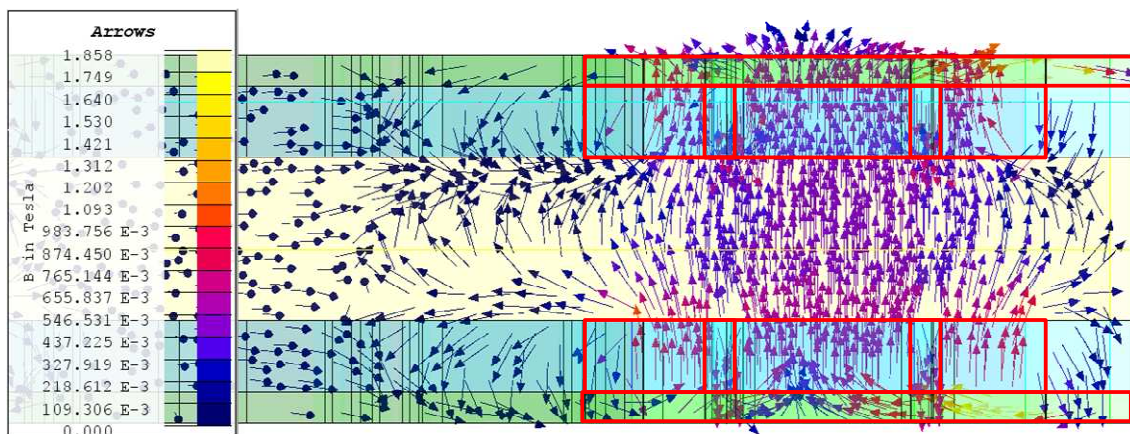


Rys. 16. Wektory indukcji w płaszczyźnie przecinającej silnik w środku szczeliny powietrznej

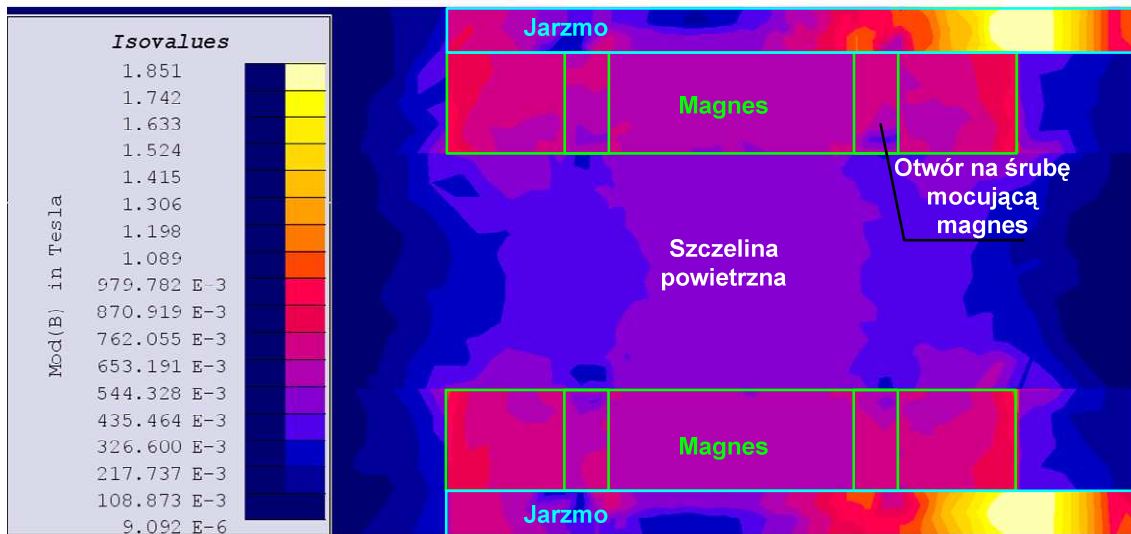


Rys. 17. Rozkład indukcji na zewnętrznej powierzchni tarczy wirnika, do której przymocowane są magnesy. Obliczenie przy zmontowanym obwodzie magnetycznym, wartość $B = 0,18-2,05$ T

Wartość indukcji magnetycznej na powierzchni tarczy jarzmowej wirnika przy złożonym wirniku jest zbliżona do wartości obliczonej na pojedynczej tarczy jarzmowej i mieści się w przedziale 187 mT na wysokości środków geometrycznych magnesów do 2,05 T na krawędziach magnesów i szczelin pomiędzy magnesami.



Rys. 18. Wektory indukcji magnetycznej na powierzchni przecinającej wyznaczonej wzdłuż linii przebiegającej przez osie otworów w magnesie



Rys. 19. Rozkład indukcji wzdłuż linii przebiegającej przez osie otworów w magnesie

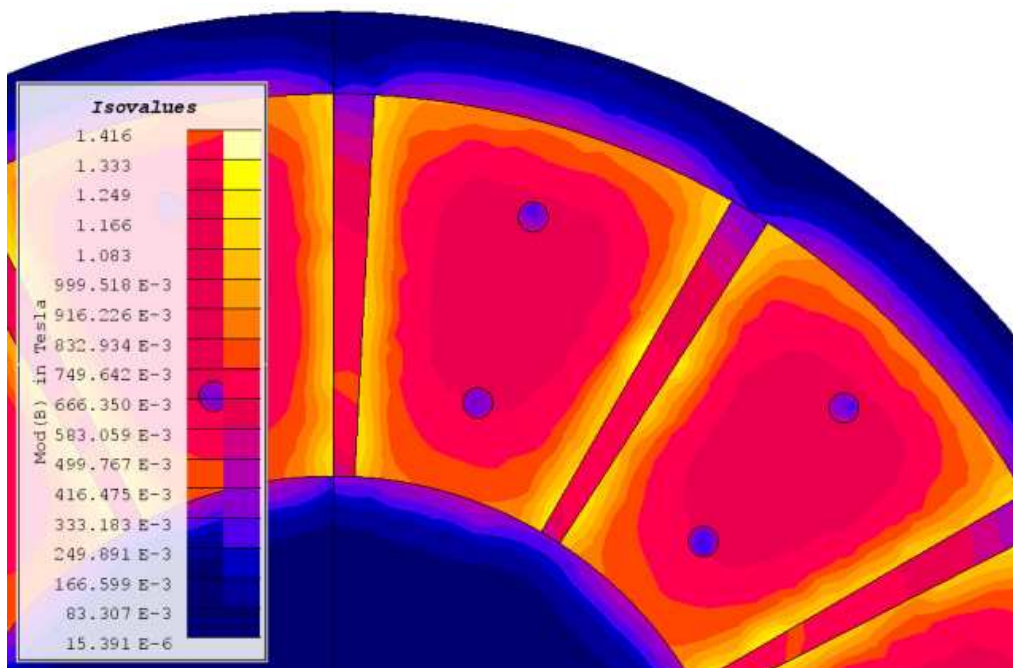
Przy użyciu metody elementów skończonych (MES) wykonano obliczenia indukcji magnetycznej w płaszczyźnie przecinającej silnik wzdłuż linii przebiegającej przez osie otworów na śruby mocujące. Wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej na wysokości geometrycznego środka magnesu jest rzędu 540 mT, na wysokości śrub mocujących wartość indukcji wynosi ok. 430 mT i zmniejsza się wraz z przemieszczaniem się poza obszar magnesu, aż do wartości bliskich zeru. Obszar rozpraszania pola magnetycznego w kierunku wewnętrznego promienia tarczy jarzmowej silnika wynosi ok. 5 mm.

Dodatkowo wykonano obliczenia indukcji magnetycznej na powierzchni magnesów na styku z tarczą jarzmową (rys. 20). Wartości te nie mają odpowiedników wartości pomiarowych, gdyż pomiar indukcji w tym miejscu jest fizycznie niemożliwy. Obliczenia te zostały wykonane w celu dokładniejszego zobrazowania pola magnetycznego w magnesach i elementach ferromagnetycznych.

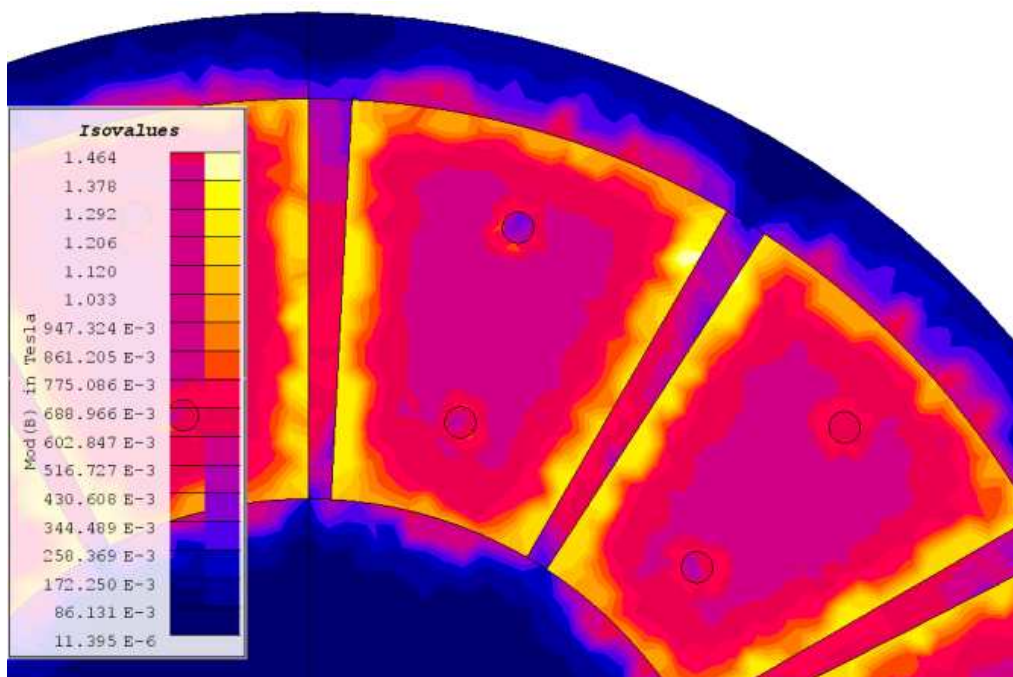
Wartości indukcji magnetycznej na powierzchni magnesów na styku z tarczą jarzmową wynoszą od 660 mT w środkowej części magnesu aż do 1160 mT przy bocznych krawędziach magnesu. W szczelinie pomiędzy magnesami $B = 660$ mT.

Na rysunku 21 przedstawiono obliczony rozkład indukcji na powierzchni magnesów od strony szczeliny powietrznej. Jej wartość w obrębie środka magnesu wynosi ok. 600 mT i wzrasta w kierunku krawędzi magnesów aż do wartości 1,3 T. Na wysokości otworów widać lekki wpływ mocowania magne-

sów na rozkład pola magnetycznego, na krawędziach otworów śrub mocujących indukcja rośnie do wartości ok. 680 mT, wewnątrz otworów spada do ok. 600 mT.



Rys. 20. Rozkład indukcji na styku powierzchni magnesów z tarczą jarzmową



Rys. 21. Rozkład indukcji na styku powierzchni magnesów ze szczeliną powietrzną silnika

4. WNIOSKI

Przeprowadzono badania laboratoryjne bezrdzeniowego silnika tarczowego z magnesami trwałymi. Do budowy silnika użyto magnesów neodymowych o indukcji remanencji $B_r = 1,3093$ T (wg danych producenta).

Pomiary wykonano teslomierzem sprawdzonym za pomocą wzorca 1 T.

Pierwsze pomiary przeprowadzono przy otwartym obwodzie magnetycznym, na jednej tarczy. Zmierzona wartość średnia indukcji magnetycznej wynosi $B = 470$ mT. W osiach otworów na śruby mocujące magnes do tarczy jarzma indukcja maleje do zera, natomiast przy krawędzi magnesu wzrasta do ok. $B = 650$ mT.

Kolejne pomiary przeprowadzono przy wyjętym tworniku. Zmierzona wartość indukcji w połowie grubości szczeliny powietrznej jest rzędu $B = 540$ mT, natomiast na zewnętrznej powierzchni jarzma (po przeciwnej stronie niż magnes) średnia indukcja wynosiła $B = 16$ mT.

Zbadany został również obszar rozpraszania strumienia magnetycznego. Z pomiarów wynika, że indukcja maleje praktycznie do zera w odległości ok. 1 mm od wewnętrznej łukowej krawędzi magnesu (rys. 10).

W takich samych warunkach jak przeprowadzone pomiary, wykonano obliczenia rozkładu pola magnetycznego za pomocą metody elementów skończonych z wykorzystaniem modelu polowego 3D zbudowanego w środowisku Flux 2D/3D.

Dla pojedynczej tarczy z magnesami z obliczeń otrzymano następujące wartości indukcji:

- na powierzchni magnesów jest $B = 660 \div 740$ mT;
- na zewnętrznej powierzchni jarzma po przeciwnej stronie magnesów indukcja w przedziale od ok. 400 mT aż do ok. 1990 mT;
- w szczelinie pomiędzy magnesami: przy krawędzi magnesu ok. 780 mT w połowie wysokości magnesu ok. 440 mT.

Dla zmontowanego wirnika złożonego z dwóch tarcz z magnesami podczas obliczeń otrzymano następujące wartości indukcji:

- w środku długości szczeliny powietrznej silnika średnia indukcja w obszarach odpowiadających powierzchniom magnesów wynosi ok. 300 mT, wartości obliczone wahają się w przedziale od 200 ÷ 500 mT;
- na zewnętrznej powierzchni jarzma po przeciwnej stronie magnesów 187 ÷ 2050 mT;
- wzdłuż promienia silnika od 9 mT w odległości ok. 10 mm od wewnętrznej krawędzi magnesu do 544 mT na wysokości środka geometrycznego magnesu.

LITERATURA

1. Aydin M., Huang S., Lipo T. A.: Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines, IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, CA, 2001.
2. Błażejczyk T., Rudeński A.: Zastosowanie magnesów trwałych o różnym kierunku namagnesowania w silniku magnetoelektrycznym tarczowym, XLVII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2011, Szczecin, 19-22 czerwca 2011.
3. Caricchi F., Crescimbin F., Fedeli E., Noia G.: Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994, pp. 254-261.
4. Caricchi F., Crescimbin F., Honorati O.: Modular, axial-flux, permanent-magnet motor for ship propulsion drives, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, 1998, pp. 673-679.
5. Ficheux R.L., Caricchi F., Crescimbin F., Honorati O.: Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems without machine room, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, Nov/Dec 2001, pp. 1693-1701.
6. Kliman G.B.: Permanent magnet AC disc motor electric vehicle drive, SAE Technical Paper Series, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1983.
7. Łukaniszyn M., Jagieła M., Wróbel R.: Wpływ liczby par biegunów wzbudzenia na pracę bezszczotkowego silnika tarczowego ze strumieniem osiowym w stanie, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 216, 2003, s. 31-39.
8. Pawluk K., Sulima R.: Boundary-integral model of permanent magnet of a tube segment as shape, Archives of Electrical Engineering, vol. 60(4), 2011, pp. 413-432.
9. Post R.F., Fowler T.K., Post S.: A high efficiency electromechanical battery, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-110861, 1992.

Rękopis dostarczono dnia 29.02.2012 r.

DISC MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLES –
– CHARACTERISTIC OF MAGNETIC FIELD

Renata SULIMA
Andrzej RUDENSKI

ABSTRACT *A coreless disc motor with permanent magnets, made in IEL was investigated with respect to the distribution and leakage of its magnetic field. Computations of the 3D field were made for verification.*

Neodymium magnets with remanence induction of $B_r = 1,3093$ T were used to build the motor. The measurements were made using an FM 210 teslometer with a Hall probe, calibrated with an 1 T etalon.

The investigations were performed using an open magnetic circuit (both discs mounted without armature). In the first case the measurements were made at the surface of magnets according to the net shown in Figure 3. The results are presented in Table 1 and Figure 4. Measurements with closed magnetic circuit were made at half width of the air gap at 9 points (Table 3). The magnet was divided into 16 measuring fields, symmetrically with respect to axes x and y . The measurements were made at the edges of the middle 9 fields. Results of measurements and 3D computations are very close.

Keywords: *disc motor, coreless motor, permanent magnets, magnetic induction measurement, FEM 3D field analysis*