OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Piotr MYNAREK[1], Janusz KOŁODZIEJ[2], Marcin KOWOL[3], Rafał GABOR[4]
ORCID: [1]0000-0002-0545-7056, [2]0000-0003-0493-2174, [3]0000-0003-2253-3898, [4]0000-0001-7704-5088
DOI: 10.15199/48.2025.11.4

Kształt modulatora przekładni magnetycznej a straty mocy

The shape of the magnetic gear modulator in the context of power losses

[1] dr inż. Piotr Mynarek, Politechnika Opolska, Katedra Automatyzacji Napędów i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: p.mynarek@po.edu.pl
[2] dr inż. Janusz Kołodziej, Politechnika Opolska, Katedra Automatyzacji Napędów i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: ja.kolodziej@po.edu.pl
[3] dr hab. inż. Marcin Kowol, Politechnika Opolska, Katedra Automatyzacji Napędów i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: m.kowol@po.edu.pl
[4] dr inż. Rafał Gabor, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: r.gabor@po.edu.pl

Adres do korespondencji: p.mynarek@po.edu.pl

Streszczenie: W pracy opisano analizę wpływu kształtu modulatora koncentrycznej przekładni magnetycznej na parametry eksploatacyjne przetwornika. Porównano warianty przekładni magnetycznej z modulatorem zapewniającym minimalny poziom pulsacji momentu oraz maksymalną jego gęstość. Modele numeryczne dla analizowanych wariantów przetwornika zweryfikowano pomiarowo na prototypach. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych na dedykowanym stanowisku badawczym oraz obliczeń kluczowych parametrów magnetycznych i strat mocy zestawiono w formie tabelarycznej oraz graficznej.

Słowa kluczowe: koncentryczna przekładnia magnetyczna, tętnienia momentu, straty w żelazie, straty Joule'a

Abstract: The paper describes the analysis of the influence of the shape of the concentric magnetic gear modulator on the operating parameters of the transducer. The magnetic gear variants with the modulator ensuring the minimum level of torque pulsation and maximum torque density were compared. The results of measurements and calculations of key parameters and power losses were presented in graphs and tables.

Keywords: coaxial magnetic gear (CMG), torque ripple, iron losses, Joule losses

Wstęp

Przekładnie mechaniczne od dziesięcioleci stanowią podstawowy element systemów przeniesienia napędu w aplikacjach przemysłowych, motoryzacyjnych czy energetycznych. Charakteryzują się one relatywnie wysokim współczynnikiem przenoszenia momentu względem zajmowanej objętości, oferują szereg zalet, jednak posiadają również wady. Tarcie wynikające z kontaktu poszczególnych elementów generuje drgania i hałas, a w konsekwencji przyspiesza również zużycie mechaniczne współpracujących elementów. Przekładnie te wymagają zatem smarowania i regularnej konserwacji. Kolejną wadą tradycyjnych przekładni jest ich niska odporność na przeciążenia [1,2,3]. Wszystkie te aspekty stanowią istotne ograniczenia w zastosowaniach wymagających wysokiej niezawodności, minimalizacji obsługi serwisowej i kosztów eksploatacji.

Alternatywą dla klasycznych rozwiązań są przekładnie magnetyczne (Magnetic Gears, MGs), które dzięki bezkontaktowemu przenoszeniu momentu eliminują zjawisko przyspieszonego zużycia, hałas oraz drgania. Ich zasada działania opiera się na wykorzystaniu pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe umieszczone na wirnikach [3,4,5]. Dzięki takiej strukturze możliwe jest nie tylko prawie bezstratne przenoszenie momentu, ale także wprowadzenie ochrony przed przeciążeniem oraz możliwość transmisji momentu przez przegrody stałe bez konieczności dodatkowych połączeń lub uszczelnień. Ta zaleta czyni MGs atrakcyjnym rozwiązaniem dla zastosowań w warunkach ekstremalnych – takich jak strefy zagrożone wybuchem, przemyśle lotniczym, energetyce wiatrowej (MEW, ang. offshore wind) lub napędach pojazdów elektrycznych [1,5, 6].

Szczególnym zainteresowaniem cieszy się współosiowa przekładnia magnetyczna (ang. coaxial magnetic gear, CMG), której główną zaletą jest wysoka gęstość momentu obrotowego przy zachowaniu kompaktowej formy i dużej sprawności – sięgającej nawet 97% w warunkach nominalnych [1,5]. Pomimo oczywistych zalet, implementacja przekładni magnetycznych wymaga optymalizacji topologii i parametrów geometrycznych, przede wszystkim w zakresie modulatora, który odgrywa kluczową rolę w procesie modulacji strumienia magnetycznego między wirnikami [1,2,5,6].

W kontekście dalszego rozwoju technologii przekładni magnetycznych (MGs), niniejszy artykuł koncentruje się na analizie wpływu kształtu modulatora ferromagnetycznego w strukturze współosiowej przekładni magnetycznej na jej właściwości eksploatacyjne, a w szczególności na straty mocy występujące w przetworniku. W pracy przedstawiono dwie geometrie modulatora, wybrane w celu: maksymalizacji przenoszonego momentu obrotowego oraz minimalizację tętnień momentu.

Przekładnia magnetyczna współosiowa o strumieniu promieniowym – konstrukcja bazowa

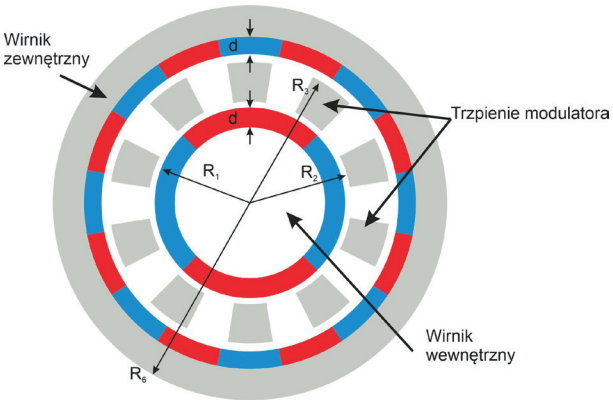
Geometria konstrukcji bazowej przekładni magnetycznej (MB), którą poddano analizie jest przedstawiona na rysunku 1. W tabeli 1 zamieszczono wartości istotnych parametrów konstrukcyjnych rozważanego przetwornika [7]. Składa się on z trzech głównych komponentów: wirnika wewnętrznego i zewnętrznego, na których zamontowane są magnesy trwałe oraz pierścienia modulującego pole magnetyczne, utworzonego z symetrycznie rozmieszczonych na obwodzie ferromagnetycznych trzpieni (biegunów). Dla poprawnego działania przekładni konieczne jest zablokowanie jednego z trzech elementów potencjalnie ruchomych, w analizowanym przypadku zablokowanym elementem jest wirnik zewnętrzny. Przyjęty układ sprawił, że zarówno element napędzany (wirnik wewnętrzny) jak i element stanowiący wyjście układu (modulator) wirują w zgodnym kierunku. Przełożenie takiej przekładni magnetycznej (i_r) można wyrazić wzorem:

$$i_r = \frac{p_s - p_r}{p_r} \tag{1}$$

gdzie:

p_s i p_r – liczba trzpieni modulatora i par biegunów wirnika

W przedstawionej konstrukcji przyjęto równe 2 mm szczeliny powietrzne. Wybór relatywnie dużej grubości szczelin wynikał z początkowych trudności technicznych podczas budowy prototypu maszyny i obawy o trwałość połączeń magnesów z wirnikami wykonanych za pomocą kleju epoksydowego. Jednak zjawiska wynikające ze zmiany szczeliny roboczej są dość łatwo skalowalne co po potwierdzeniu słuszności przyjętych założeń pozwoli na redukcję grubości szczelin roboczych i podniesienie walorów eksploatacyjnych maszyny. Szersza analiza zasady działania, stanów pracy przekładni magnetycznej oraz szczegóły dotyczące pola magnetycznego szczelinach powietrznych opisano w pracy [8].



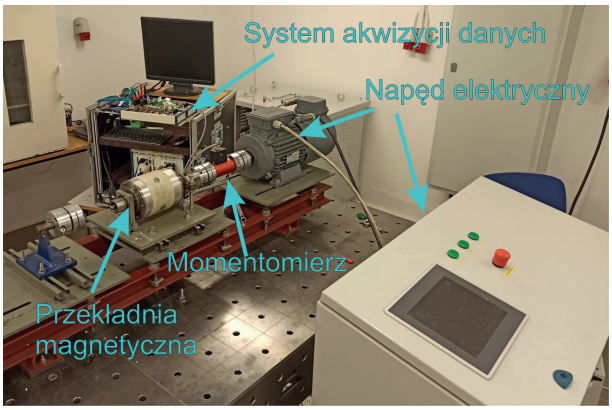
Rys. 1. Współosiowa przekładnia magnetyczna

Tab. 1. Parametry konstrukcyjne modelu bazowego MG

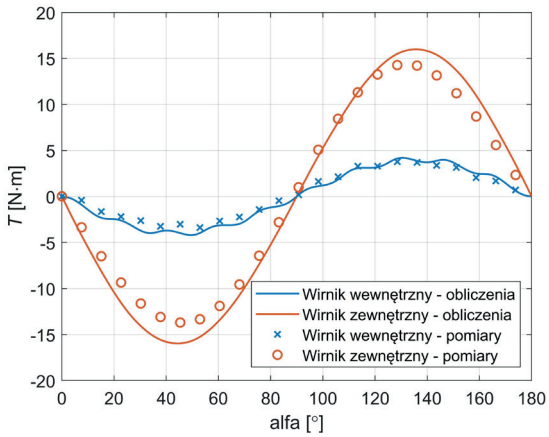
Parametr	Oznaczenie	Wartość
Liczba par biegunów wirnika wewnętrznego	p_{r_wew}	2
Liczba par biegunów wirnika zewnętrznego	p_{r_zew}	8
Liczba biegunów modulatora	p_s	10
Promień zewnętrzny wirnika wewnętrznego	*R1*	25 mm
Promień wewnętrzny modulatora	*R2*	27 mm
Promień zewnętrzny modulatora	*R3*	37 mm
Promień zewnętrzny wirnika zewnętrznego	*R4*	52 mm
Grubość magnesu trwałego N35	*d*	5 mm
Długość czynna przekładni magnetycznej	*l*	50 mm

Na podstawie przyjętych założeń i przyjętych parametrów maszyny zbudowano jej dwuwymiarowy model numeryczny oraz fizyczny, który posłużył do weryfikacji pomiarowej przeprowadzonej na stanowisku doświadczalnym (rys. 2).

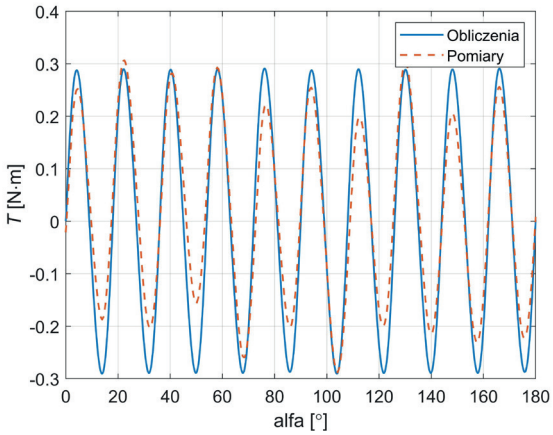
Na rysunku 3 przedstawiono zestawienie wyników analizy numerycznej oraz pomiarów zmienności momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego, przy nieruchomym modulatorze. Natomiast rysunek 4 przedstawia porównanie wyników badań dotyczących zmienności momentu zaczepowego.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe



Rys. 3. Kątowa zmienność momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego, przy nieruchomym modulatorze (MB)

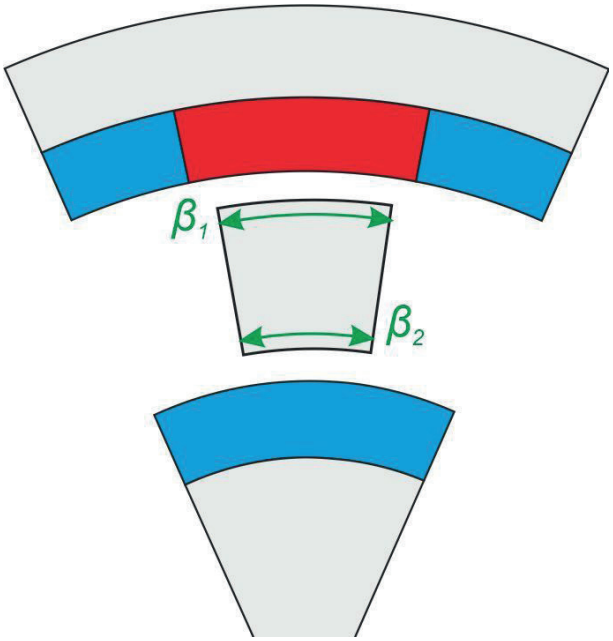


Rys. 4. Moment zaczepowy dla konstrukcji bazowej (MB)

Modyfikacja konstrukcji modulatora

Kształt modulatora jest jednym z krytycznych parametrów przekładni magnetycznej, ponieważ to głównie modulator warunkuje efektywność przenoszenia momentu między wirnikami [2,5]. Dobrze zaprojektowany modulator pozwala zwiększyć moment obrotowy, ograniczyć jego tętnienia i drgania przetwornika podczas pracy, co bezpośrednio przekłada się na wydajność całego napędu. Na podstawie doświadczeń z modelem bazowym przekładni magnetycznej dokonano modyfikacji konstrukcji modulatora. Przystępując do zmiany geometrii modulatora zdecydowano się na jednoczesne zmniejszenie grubości szczelin powietrznych do 1 mm, aby w pełni uwypuklić walory magnetycznej transformacji momentu – podnieść jego gęstość.

W trakcie modyfikacji modulatora, konstrukcja wirnika wewnętrznego (ww) jak i zewnętrznego (wz) pozostaje bez zmian, a zmianom ulega jedynie kształt modulatora. W czasie przeprowadzonych prac przeanalizowano 2 parametry: β_1 – rozpiętość kątową łuku górnego trzpienia oraz β_2 – rozpiętość kątową łuku podstawy trzpienia modulatora (rys. 5).



Rys. 5. Parametry geometryczne modulatora podlegające modyfikacji

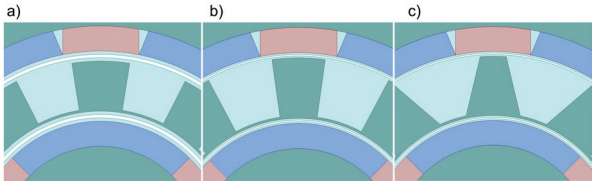
W procesie przeszukiwania przestrzeni możliwych konstrukcji zastosowano analizę jednokryterialną:

1. pod kątem maksymalizacji przenoszonego momentu: $max=T_e$ (model MO1)
2. minimalizacji moment tętnień przenoszonego momentu: $min=\varepsilon$ (model MO2)

Końcowe wyniki modyfikacji przedstawiono w tabeli 2, natomiast na rysunku 6 przedstawiono geometrię trzpieni modulatora dla wszystkich 3 analizowanych modeli.

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń dla założonych kryteriów

Kryterium	Konstrukcja	β_1 [°]	β_2 [°]
ξ_1	*MO1*	*16*	16
ξ_2	*MO2*	*8*	24
-	*MB*	*18*	18



Rys. 6. Kształty trzpieni modulatora dla modeli a) MB, b) MO1, c) MO2

Na rysunkach 7 i 9 przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów kątowej zmienności momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego, przy nieruchomym modulatorze dla wykonanych konstrukcji MO1 i MO2. Natomiast na 8 i 10 przedstawiono otrzymane momenty zaczepowe dla zmodyfikowanych konstrukcji modulatora.

W celu przeprowadzenia oceny jakościowej otrzymanych konstrukcji przekładni wprowadzono dwa dodatkowe parametry: τ – współczynnik zawartości momentu zaczepowego w momencie użytkowym (2) oraz ε – współczynnik tętnień (3).

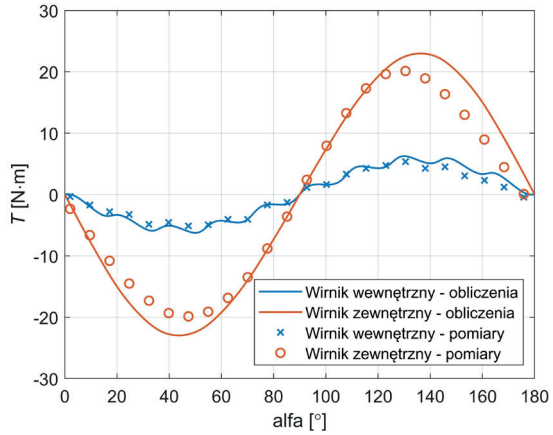
Ze względów eksploatacyjnych szczególnie istotne są tętnienia momentu, wielkość tą wyznaczonego w oparciu o przebiegi momentu (rys. 11) uzyskane w czasie pracy synchronicznej przekładni dla maksymalnego obciążenia. Współczynnik ten wyznaczono jedynie dla wirnika wewnętrznego ze względu na to, że charakteryzuje się on największymi tętnieniami. W tabeli 3 zestawiono wyniki jakie otrzymano dla analizowanych konstrukcji MB, MO1, MO2, wyniki są zgodne z oczekiwaniami.

(2) $$\tau = \frac{T_c}{T_{max}} \cdot 100\%$$

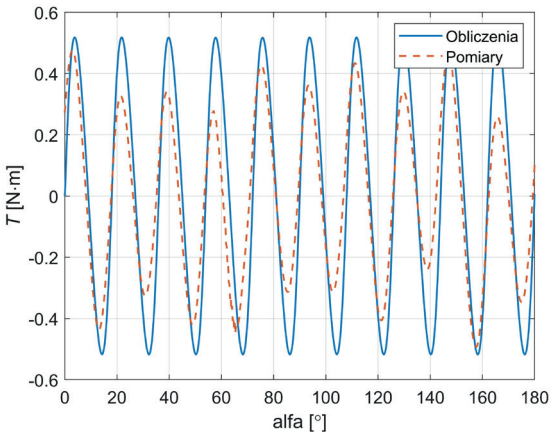
(3) $$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_{min}}{2T_{av}} \cdot 100\%$$

Tab. 3. Zestawienie wyników dla analizowanych konstrukcji przekładni

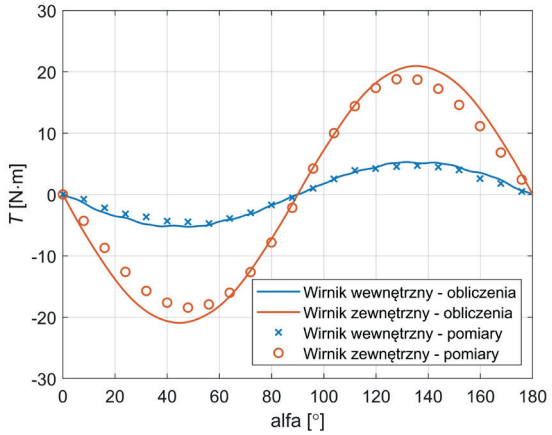
	MB	MO1	MO2
$T_{max\,w}$ [N·m]	4,2	5,98	5,28
$T_{max\,m}$ [N·m]	15,98	23,5	20,9
T_c [N·m]	0,3	0,52	0,19
τ [%]	1,9	2,2	1,0
ε [%]	9,6	15,4	4,4



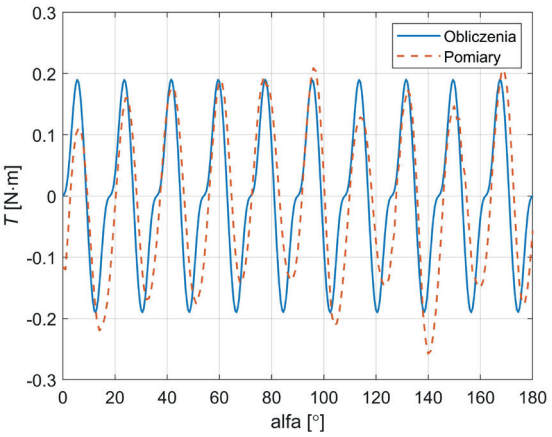
Rys. 7. Kątowa zmienność momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego (MO1)



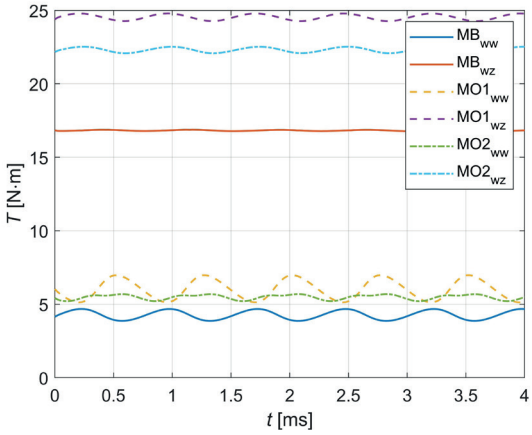
Rys. 8. Moment zaczepowy dla wykonanej konstrukcji MO1



Rys. 9. Kątowa zmienność momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego (MO2)



Rys. 10. Moment zaczepowy dla wykonanej konstrukcji MO2



Rys. 11. Zmienność momentu w czasie przy maksymalnym obciążeniu dla analizowanych konstrukcji przekładni

Analiza strat mocy w przekładni magnetycznej

W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę wpływu wprowadzonych modyfikacji konstrukcyjnych na charakterystykę strat mocy w wybranych modelach przekładni magnetycznej w funkcji prędkości obrotowej. W tym celu wykonano serię symulacji numerycznych dla każdego z rozpatrywanych wariantów geometrycznych, przy założeniu pracy wirnika wysokoobrotowego w zakresie prędkości od 0 do 4000 obr/min. Straty w rdzeniu przekładni (blachy M400-50A) obliczono przy użyciu wzoru (4), natomiast straty w magnesach trwałych w oparciu o równanie (5) [9].

$$P_{Fe} = k_h f(B_m)^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1,5} \tag{4}$$

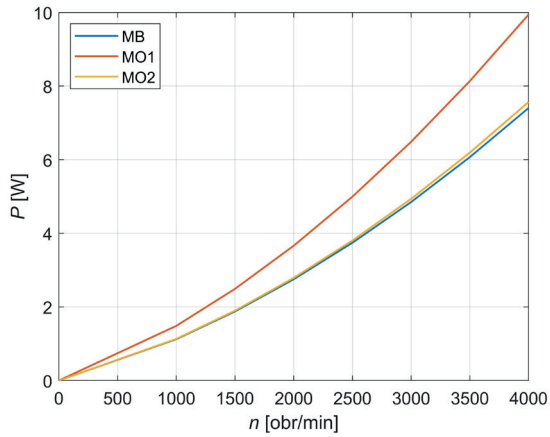
gdzie:
K_h – współczynnik strat histerezowych
K_c – współczynnik strat wiroprądowych
K_e – współczynnik strat nadmiarowych
B_m – Maksymalna wartość indukcji B
f – częstotliwość zmiany pola

$$P_{mag} = \frac{1}{\sigma} \int_V J^2 \cdot dV \tag{5}$$

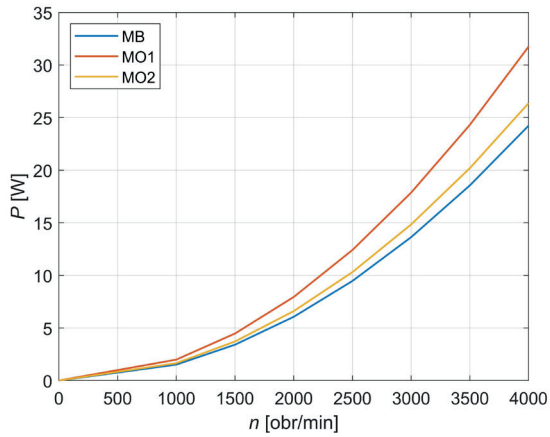
gdzie:
σ – przewodność elektryczna
J – gęstość prądów wirowych w magnesach

Na rysunkach 12-13 przedstawiono odpowiednio zależność straty w żelazie oraz w magnesach trwałych w funkcji prędkości obrotowej wirnika wysokoobrotowego.

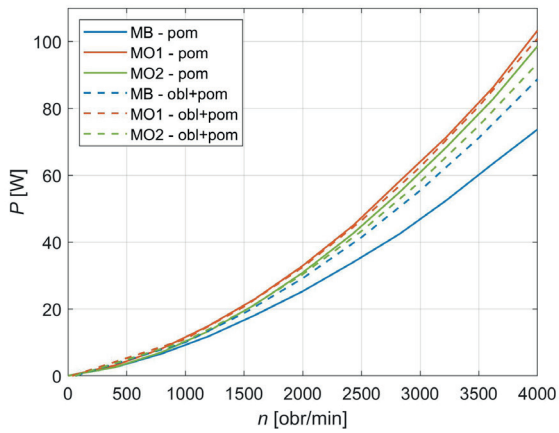
W celu walidacji pomiarowej otrzymanych wyników, konieczne jest wyznaczenie strat mechanicznych. Na wstępie wyznaczono pomiarowo straty mechaniczne, które zostały dodane do wyników start magnetyczne otrzymanych z modeli numerycznych, a otrzymany wynik w ten sposób porównano z wyznaczonymi na stanowisku pomiarowym stratami całkowitymi dla poszczególnych konstrukcji (rys.14). Natomiast w tabeli 4 zestawiono starty mocy występujące w poszczególnych konstrukcjach przekładni przy prędkości wirnika wewnętrznego n = 4000obr/min.



Rys. 12. Zmiana strat mocy w rdzeniu maszyny w funkcji prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego



Rys. 13. Zmiana strat mocy w magnesach maszyny w funkcji prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego



Rys. 14. Wyniki weryfikacji pomiarowej strat mocy w przekładniach w funkcji prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego

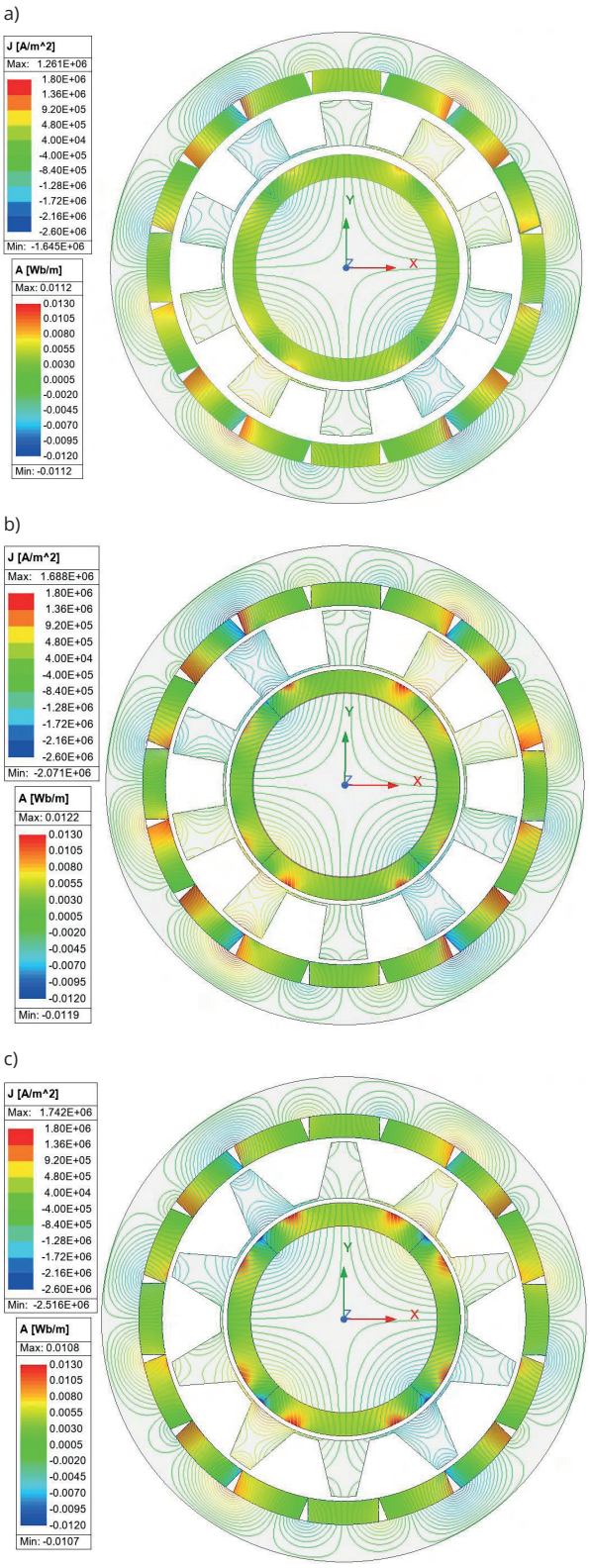
Tab. 4. Zestawienie strat mocy dla analizowanych konstrukcji przekładni dla prędkości wirnika wewnętrznego *n* = 4000obr/min

	MB	*MO1*	*MO2*
P_{Fe} [W]	*7,6*	10	7,4
$P_{Mag\ ww}$ [W]	*2,4*	*5,1*	11,7
$P_{Mag\ wz}$ [W]	*21,8*	*27,2*	15,1
$\sum P$ [W]	*31,8*	40,2	34,2

Analizując wyniki zawarte w tabeli 4 można zauważyć, że w bilansie strat części elektromagnetycznej dominują straty w magnesach – z tytułu prądów wirowych. Dodatkowo można zauważyć, że zmiana geometrii modulatora wpływa nie tylko na sumaryczne straty w przekładni, ale także na proporcję rozkładu strat w magnesach w obu wirnikach (ww i wz). Kształt modulatora determinuje rozkład pola magnetycznego w przetworniku a w konsekwencji również lokalizację i gęstość prądów wirowych *J* w magnesach (rys.15). Pomimo, że konstrukcja MO1 cechuje się największymi stratami mocy, to w konstrukcji MO2 występują największe punktowe wartości prądu *J*. Straty Joule'a w magnesach w wirniku wewnętrznym są ponad 2-krotnie większe niż w konstrukcji MO1 i prawie 5-krotnie większe niż w MB. Tak duży wzrost strat jest niekorzystny pod kątem eksploatacji takiego przetwornika. Wirnik wewnętrzny jest elementem o najgorszych warunkach chłodzenia, a punktowa duża gęstość prądu *J* może znacząco przyspieszyć degradację magnesów trwałych.

Wnioski

Konkurencyjność rozwiązań napędowych opartych na CMG wynika przede wszystkim z jej charakterystycznej cechy – bezstykowej transformacji momentu i prędkości. Często jednak potencjał aplikacyjny musi być wsparty dużą gęstością momentu i płynną pracą (bez drgań i pulsacji momentu). Dostępny współcześnie metody optymalizacji geometrii pozwalają na relatywnie szybkie i skuteczne osiągniecie założeń, jednak często pomija się inne aspekty eksploatacyjne. Zmieniona geometria modulatora warunkująca niski poziom tętnień momentu lub maksymalna jego wartość jednocześnie wpływa na zmianę rozkładu pola magnetycznego, jego fluktuacje a w konsekwencji również straty mocy w żelazie i magnesach trwałych. Trwałość, uchodzącej za bardzo odporną na zużycie przekładni magnetycznej, zależy ściśle od doboru typu magnesów trwałych. Wrogiem są straty mocy w ujęciu lokalnym, a w konsekwencji punktowo podwyższona temperatura w obszarze magnesów. Pomimo relatywnie bardzo wysokiej sprawności wybranych wariantów przetworników, kluczowa w długotrwałej eksploatacji jest analiza i lokalizacja źródeł strat a w konsekwencji również podjęcie zabiegów pozwalających na ich minimalizację.



Rys. 15. Rozkład gęstości prądu J w magnesach oraz linie pola w konstrukcji a) MB, b) MO1, c) MO2

Przyjęto: 29.09.2025, **zaakceptowano:** 24.10.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Halim, M. F. M. A., Rahman, A. A., & Sulaiman, E., Concentric Magnetic Gear Structure Review. Przeglad Elektrotechniczny, 8 (2024), 140–147. https://doi.org/10.15199/48.2024.08.29.

[2] Kim, S. J., Park, E. J., Jung, S. Y., & Kim, Y. J., Transfer Torque Performance Comparison in Coaxial Magnetic Gears with Different Flux-Modulator Shapes. IEEE Transactions on Magnetics, 53(6) (2017). https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2663429.

[3] Mao, Y., & Yang, Y., Optimization of Magnetic Gear Patterns Based on Taguchi Method Combined with Genetic Algorithm. Energies, 15(14) (2022), https://doi.org/10.3390/en15144963.

[4] Sepaseh, J., Rostami, N., Feyzi, M. R., & Sharifian, M.B. B., Optimal design of an axial magnetic gear by using particle swarm optimisation method. IET Electric Power Applications, 16(6), (2022), 723–735. https://doi.org/10.1049/elp2.12189.

[5] Yan, B., Li, X., Wang, X., & Yang, Y. A review on the field--modulated magnetic gears: Development status, potential applications, and existent challenges. In IET Electric Power Applications (Vol. 18, Issue 1, pp. 1–19), (2024). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1049/elp2.12365

[6] McGilton, B., & Crozier, R., Mueller M., Optimization Procedure for Designing a Magnetic Gear, The Journal of Engineering Volume 2017, Issue 13, 840 – 843, https://doi.org/10.1049/joe.2017.0448

[7] Kowol, M., Kołodziej, J., & £ukaniszyn, M. Optymalizacja pasywnej przekładni magnetycznej. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 93, 78–82, (2017), https://doi.org/10.15199/48.2017.02.19

[8] Kowol M., Przetwarzanie energii mechanicznej we współosiowej przekładni magnetycznej, Politechnika Opolska, nr 552, 2021, Opole, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.

[9] Nguyen, M. D., Jung, W. S., Hoang, D. T., Kim, Y. J., Shin, K. H., & Choi, J. Y., Fast Analysis and Optimization of a Magnetic Gear Based on Subdomain Modeling. Mathematics, 12(18) (2024). https://doi.org/10.3390/math12182922.