

Badania symulacyjne przekładni magnetycznej

Streszczenie. W pracy przedstawiono budowę oraz zasadę działania zmodyfikowanej przekładni magnetycznej. Dla przykładowej konstrukcji przekładni, o przełożeniu 4:1, opracowano dwuwymiarowy i trójwymiarowy model numeryczny, dla których wykonano szereg obliczeń polowych za pomocą metody elementów skończonych. Przeprowadzono analizę rozkładu składowej promieniowej i stycznej indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych. Za pomocą metody tensora naprężeń Maxwella wyznaczono charakterystyki przenoszonego momentu magnetycznego. Przedstawiono również wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych pasywnej przekładni magnetycznej na moment magnetyczny. Określono parametry konstrukcyjne mające największy wpływ na zmianę wartości momentu magnetycznego. W dalszej części pracy zawarto analizę wpływu prądów wirowych na charakterystykę mechaniczną przekładni magnetycznej. Przeprowadzono analizę porównawczą dla materiałów o odmiennych charakterystykach magnesowania oraz konduktywności właściwej. Obliczenia zostały częściowo zweryfikowane na stanowisku pomiarowym na modelu fizycznym przekładni magnetycznej.

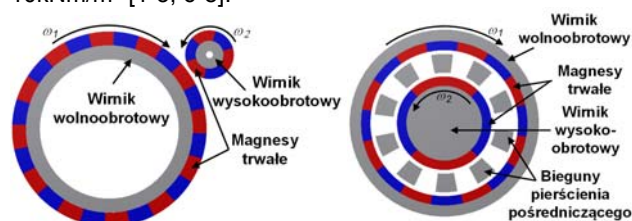
Abstract. This paper presents the construction and operation principle of the modified magnetic gear. For the presented gear construction (with gear ratio 4:1) a series of calculations was carried out using two- and three-dimensional numerical field models. On the base of field calculations, an analysis of the distribution of the radial and tangential components of the magnetic flux density in the air gaps is performed. The magnetic torque characteristics were calculated using the Maxwell Stress Tensor Method. The influence of choosing construction parameters on the magnetic torque is also examined. In the next part of the article, the influence of eddy currents induced in the ferromagnetic parts on the magnetic torque is considered. The differ kind of construction materials (differ magnetic characteristics and differ electric conductivity) are examined. The calculation results are verified by measurements on the physical model of the magnetic gear. (**Simulation of the magnetic gear.**)

Słowa kluczowe: przekładnia magnetyczna, metoda elementów skończonych, moment magnetyczny, prądy wirowe.

Keywords: magnetic gear, finite element method, magnetic torque, eddy currents.

Wstęp

Współczesne czasy to ustawiczny rozwój nowych technologii - czasy innowacji. Nieodzownym elementem znacznej części starych jak i nowych urządzeń są przekładnie mechaniczne. Z uwagi na bezpośredni kontakt pomiędzy współpracującymi elementami, każda przekładnia mechaniczna generuje straty w przenoszonym momencie, co obniża sprawność całego urządzenia, jak również wiąże się z powstawaniem wibracji i hałasu. Alternatywą dla tego rodzaju urządzeń mogą stać się przekładnie zapewniające fizyczną izolację pomiędzy napędem a odbiornikiem, bezstykowe przenoszenie momentu obrotowego - przekładnie magnetyczne. Dodatkowo takie przetworniki zapewnią również zmniejszenie poziomu hałasu i wibracji, naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem, wysoką sprawność. Pomimo tak wielu zalet, zastosowanie typowych przekładni magnetycznych (rys. 1a.) jest bardzo ograniczone. Głównym tego powodem jest stosunkowo mała gęstość przenoszenia momentu w porównaniu z przekładniami mechanicznymi, która nie przekracza 10kNm/m^3 [1-3, 6-8].



Rys. 1. Tradycyjna przekładnia magnetyczna (a), zmodyfikowana konstrukcja przekładni magnetycznej (b)

Przedstawiona w artykule zmodyfikowana konstrukcja przekładni magnetycznej, może z powodzeniem konkurować z klasycznymi przekładniami mechanicznymi. Budowę takiej przekładni magnetycznej zilustrowano na rysunku 1b. Przetwornik zbudowany jest z trzech podstawowych elementów tj. wirników wewnętrznego i zewnętrznego (zawierających magnesy trwałe) oraz z pierścienia pośredniczącego (w postaci biegunków ferromagnetycznych). Taka konstrukcja, dzięki dodatkowo zastosowanym wysokoenergetycznym magnesom trwałym,

umożliwia zwiększenie gęstości przenoszonego momentu magnetycznego, przekraczającą 100kNm/m^3 [1, 8, 10-11].

Zasada działania

Przekładnia magnetyczna, przedstawiona na rysunku 1b, posiada aż trzy elementy ruchome. Zakładając, że elementem napędzanym będzie wirnik wewnętrzny należy dokonać wyboru elementu stanowiącego wyjście oraz elementu blokowanego. W sytuacji, w której unieruchomiony jest pierścień pośredniczący, moment przekazuje do odbiornika wirnik zewnętrzny, obracając się w przeciwnym kierunku do kierunku obrotu wirnika wewnętrznego. Natomiast w stanie pracy, w którym zablokowany jest wirnik zewnętrzny, wyjście przetwornika stanowi pierścień pośredniczący obracając się zgodnie z kierunkiem obrotu wirnika wewnętrznego. Przełożenie przekładni jest ściśle związane z liczbą par biegunów każdego z trzech elementów składowych - wirnika wewnętrznego i zewnętrznego oraz pierścienia pośredniczącego. Rozkład składowych promieniowej i stycznej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej opisują zależności (1) i (2) [1, 8-9]:

$$B_r(r, \theta) = B_r(r, \theta)' \times \lambda_r(r, \theta) = \left(\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{r_m}(r) \cos(mp_r(\theta - \omega_r t) + mp_r \theta_0) \right) \times \left(\lambda_{r0}(r) + \sum_{n=1,2,3,\dots} \lambda_{rn}(r) \cos(np_s(\theta - \omega_s t)) \right) \quad (1)$$

$$B_\theta(r, \theta) = B_\theta(r, \theta)' \times \lambda_\theta(r, \theta) = \left(\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mp_r(\theta - \omega_r t) + mp_r \theta_0) \right) \times \left(\lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{n=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta n}(r) \cos(np_s(\theta - \omega_s t)) \right) \quad (2)$$

gdzie: B_r, B_θ – składowa promieniowa i styczna indukcji magnetycznej bez pierścienia pośredniczącego; $\lambda_r, \lambda_\theta$ – składowe funkcji modulującej, wynikającej z wprowadzenia pierścienia ferromagnetycznego; p_r – liczba par biegunów wirnika z magnesami trwałymi; p_s – liczba nabiegunków pierścienia ferromagnetycznego; ω_r, ω_s – prędkość obrotowa wirnika z magnesami trwałymi oraz pierścienia pośredniczącego; $b_{rm}, b_{\theta m}, \lambda_{rm}, \lambda_{\theta m}$ – współczynniki szeregu Fouriera.

Zasada działania przekładni magnetycznej oparta jest na modulacji pola magnetycznego magnesów trwałych z zastosowaniem biegunów ferromagnetycznych pierścienia pośredniczącego zwanego również modulującym. Liczbę biegunów pierścienia modulującego dobiera się tak, aby liczba par biegunów w przestrzeni harmonicznego rozkładu indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej odpowiadała liczbie par biegunów wirnika z magnesami trwałymi.

Rozwiązując układ równań (1) i (2), otrzymujemy zależności opisujące liczbę par biegunów oraz prędkość wirowania pola magnetycznej w przestrzeni harmonicznego [1, 8]:

$$(3) \quad p_{m,n} = |mp_r + np_s|$$

gdzie: $m = 1, 3, 5, \dots, \infty$ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$

$$(4) \quad \omega_{m,n} = \frac{mp_r}{mp_r + np_s} \omega_r + \frac{np_s}{mp_r + np_s} \omega_s$$

gdzie: p_r – liczba par biegunów wirnika z magnesami trwałymi; p_s – liczba nabiegunków pierścienia ferromagnetycznego; ω_r, ω_s – prędkość obrotowa wirnika z magnesami trwałymi oraz pierścienia pośredniczącego;

Analizując równanie (4) można zauważyć, że widmo harmonicznego prędkości obrotowej, które powstaje w wyniku wprowadzenia pierścienia ferromagnetycznego ($n \neq 0$), różni się od prędkości obrotowej wirnika, którego pole magnetyczne jest modulowane. Dlatego aby zaistniała możliwość transmisji momentu magnetycznego przy różnych prędkościach obrotowych, liczba par biegunów drugiego wirnika musi być równa liczbie par biegunów w widmie harmonicznego dla którego $n \neq 0$. Ponieważ dla $m=1$ i $n=-1$ uzyskujemy największą wartość składowych indukcji magnetycznej w przestrzeni harmonicznego, liczba par biegunów drugiego wirnika musi być równa różnicy liczby biegunów pierścienia pośredniczącego i liczby par biegunów wirnika modulującego. Na tej podstawie można wyznaczyć przełożenie przekładni magnetycznej (i_r), która dla opisywanej konstrukcji w przypadku nieruchomego pierścienia ferromagnetycznego wyraża się zależnością [1]:

$$(5) \quad i_r = \frac{p_s - p_r}{p_r}$$

W sytuacji, w której nieruchomy jest jeden z wirników z magnesami trwałymi, przełożenie przekładni określa się zależnością:

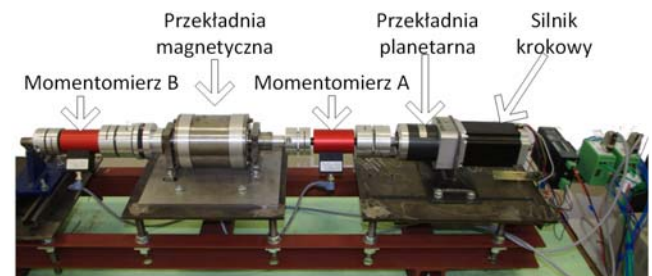
$$(6) \quad i_r = \frac{p_s}{p_r}$$

Równania (5) i (6) pokazują, że dla wybranego przełożenia przekładni, istnieje stosunkowo duża liczba kombinacji doboru par biegunów wirnika wewnętrznego, zewnętrznego oraz liczby biegunów ferromagnetycznych. Pewne ograniczenia wynikają głównie ze względów

konstrukcyjnych i konieczności zapewnienia odpowiednich parametrów pracy przekładni. Wpływ modyfikacji wybranych parametrów konstrukcyjnych, w tym również wpływ doboru kombinacji par biegunów przekładni, przedstawiono w dalszej części pracy.

Modele numeryczne i prototyp przekładni

Mając na uwadze względy badawcze, autorzy przystępując do budowy prototypu założyli, iż elementem napędzanym będzie wirnik wewnętrzny a blokowane mogą być zarówno pierścień pośredniczący jak i wirnik zewnętrzny. Takie podejście w znacznym stopniu wpłynęło na stopień złożoności przekładni jednak umożliwiło przeprowadzenie znacznie szerszych badań. W oparciu o przedstawione w pracy równania, na wirniku zewnętrznym naklejono magnesy neodymowe (N35) wytwarzające pole magnetyczne o ośmiu parach biegunów, zaś na wirniku wewnętrznym o dwóch parach biegunów. Liczba biegunów ferromagnetycznych pierścienia pośredniczącego wynosi dziesięć. W przypadku nieruchomego pierścienia pośredniczącego, przełożenie przekładni, zgodnie z zależnością (5), wynosi 4:1, natomiast w przypadku nieruchomego wirnika zewnętrznego przełożenie, na podstawie zależności (6), wynosi 5:1. Wykonane wstępne obliczenia numeryczne (2D MES) nowego prototypu pozwoliły na dobór pozostałych istotnych parametrów konstrukcyjnych (Tab. 1.). Prototyp przekładni magnetycznej na stanowisku badawczym pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Prototyp przekładni magnetycznej na stanowisku badawczym

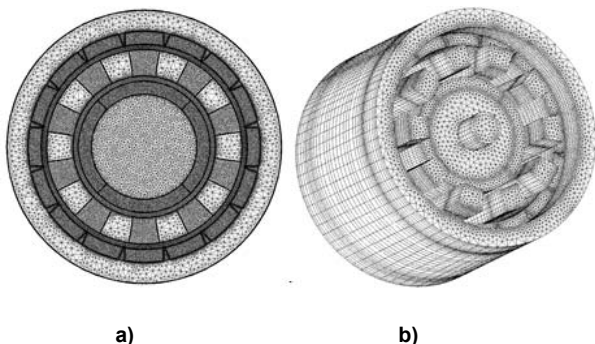
Tabela 1. Parametry modelu podstawowego (MP) przekładni magnetycznej

Liczba par biegunów wirnika wewnętrznego ($p_{r, wew}$)	2
Liczba par biegunów wirnika zewnętrznego ($p_{r, zew}$)	8
Liczba biegunów pierścienia pośredniczącego (p_s)	10
Promień zewnętrzny wirnika wewnętrznego	25 mm
Promień wewnętrzny pierścienia pośredniczącego	27 mm
Promień zewnętrzny pierścienia pośredniczącego	37 mm
Promień wewnętrzny wirnika zewnętrznego	39 mm
Promień zewnętrzny wirnika zewnętrznego	52 mm
Grubość magnesu trwałego	5 mm

Przeprowadzona wstępna weryfikacja pomiarowa obliczeń modelu dwuwymiarowego (rys. 3a) wykazała znaczne rozbieżności (Tab. 2.). Skomplikowana budowa przekładni, zbliżona do siebie wartość średnicy i długości czynnej wirników, wskazały na zasadność przygotowania modelu trójwymiarowego (rys. 3b). Obliczenia numeryczne wykonane dla modelu MES 3D wykazały bardzo dobrą zgodność z pomiarami na obiekcie rzeczywistym i ujawniły ukryte wady konstrukcyjne prototypu, które w zasadniczy sposób pogorszyły parametry mechaniczne przetwornika. Usunięcie elementów konstrukcji bocznikujących strumień magnetyczny znacznie zbliżyło wartość przenoszonego momentu do modelu 2D.

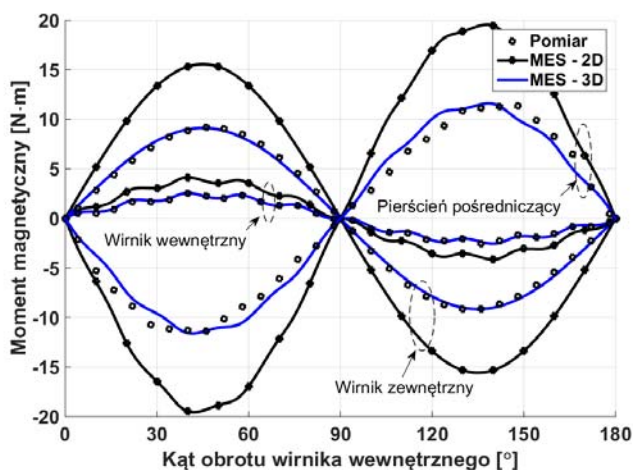
Tabela 2. Porównanie wartości maksymalnych momentu magnetycznego

	Wirnik			
	wewnętrzny		zewewnętrzny	
	T_{max} [Nm]	ΔT_{max} [%]	T_{max} [Nm]	ΔT_{max} [%]
MES 2D	4,21	+64,5	15,60	+68,8
MES 3D	2,60	+1,6	9,20	-0,4
Pomiar	2,56	-	9,24	-

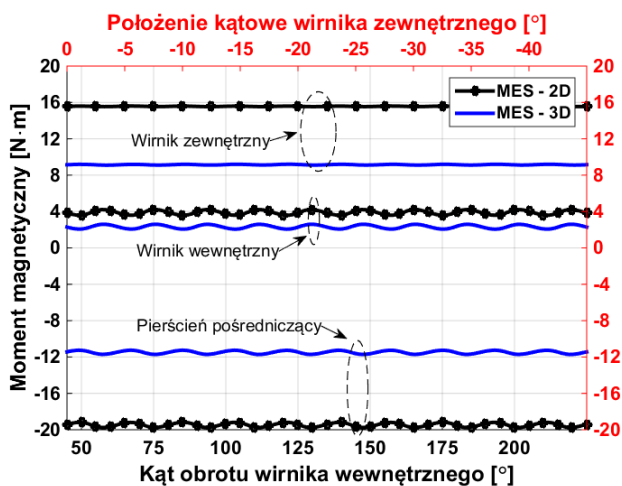


Rys.3. Modele numeryczne 2D (a) i 3D (b) przekładni magnetycznej

Na rysunku 4 przedstawiono zmienność momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego (wirnik zewnętrzny oraz pierścień pośredniczący jest nieruchomy).



Rys.4. Zmienność momentu magnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego



Rys.5. Kątowa zmienność momentu magnetycznego z uwzględnieniem przesunięcia kąтового wirnika zewnętrznego

Natomiast na rysunku 5 zilustrowano zmianę momentu magnetycznego, przy nieruchomym pierścieniu pośredniczącym, podczas gdy wirnik zewnętrzny obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu wirnika wewnętrznego zgodnie z zależnością [8]:

$$(7) \quad \alpha_{zew} = -\frac{p_{r_wew}}{p_{r_zew}} \alpha_{wew}$$

gdzie: α_{wew} , α_{zew} – kąt obrotu wirnika wewnętrznego oraz zewnętrznego.

Jako punkt startowy przyjęto przesunięcie o 45 stopni mechanicznych wirnika wewnętrznego względem zewnętrznego.

Badania symulacyjne - modyfikacje parametrów obwodu magnetycznego przekładni

Mimo tego, iż przeprowadzona weryfikacja pomiarowa modelu MES 2D wykazała znaczne rozbieżności, autorzy pracy zastosowali w analizie wpływu parametrów magnetowodu przetwornika modele dwuwymiarowe. Stosunkowo niskie nakłady obliczeniowe pozwoliły na przeprowadzenie znacznie szerszego zakresu obliczeń. W trakcie badań symulacyjnych założono, iż:

- promień zewnętrzny przekładni jest stały,
- napędzany jest tylko wirnik wewnętrzny,
- przełożenie przekładni wynosi 4:1.

Na początkowym etapie badań określono wpływ doboru kombinacji par biegunów przekładni. Obliczenia przeprowadzono w dwóch etapach. W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń przy zablokowanym pierścieniu pośredniczącym (modele MA1 - MA3). Otrzymane wyniki wyraźnie wskazują na przewagę modelu podstawowego ze względu na wartość przenoszonych momentu. Na uwagę zasługuje jednak znaczna redukcja tętnień oraz momentu zaczepowego w pozostałych modelach.

Tabela 3. Wyniki obliczeń dla zmiany liczby par biegunów – zablokowany pierścień pośredniczący (PP)

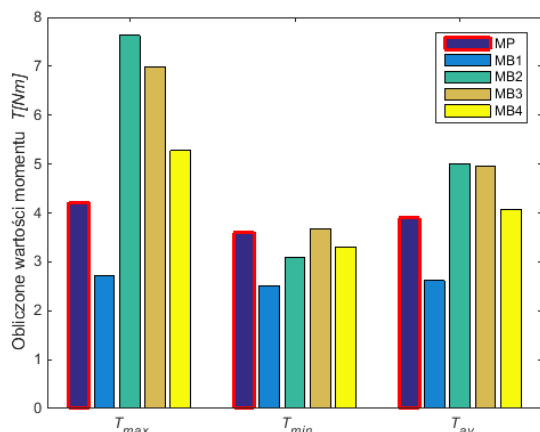
	MA1	MP	MA2	MA3
p_{r_wew}	1	2	3	4
p_s	5	10	15	20
p_{r_zew}	4	8	12	16
T_{max} [Nm]	2,39	4,21	3,69	2,74
T_{min} [Nm]	2,38	3,60	3,25	2,5
T_{avin} [Nm]	2,38	3,90	3,47	2,62
T_{avout} [Nm]	9,54	15,60	13,84	10,42
T_z [Nm]	0	0,31	0,22	0,12
ε [%]	0,1	8,0	6,3	4,5
Td [kNm/m ²]	22,5	36,7	32,6	24,5

Jako uzupełnienie rozważań na temat wpływu doboru kombinacji par biegunów dla zadanego przełożenia autorzy przeprowadzili również serię symulacji komputerowych dla przekładni z zablokowanym wirnikiem zewnętrznym (tab. 4). Kombinacje par biegunów dobrano tak, aby przełożenie miało również wartość 4:1. Elementem stanowiącym wyjście z przetwornika jest w takim przypadku pierścień pośredniczący. Wyniki obliczeń istotnych wielkości mechanicznych odniesiono do modelu podstawowego (MP) i przedstawiono na rysunkach 6-7. Wzrost wartości przenoszonego momentu (MB2 - MB4) wiąże się jednak ze znacznie większymi pulsacjami co negatywnie wpływa na kulturę pracy przetwornika.

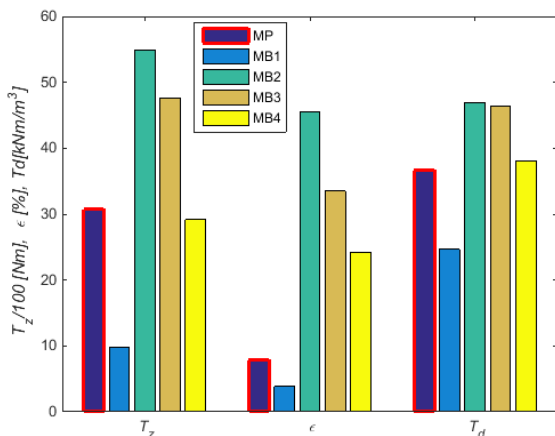
Na podstawie wyników obliczeń można zauważyć, że wybór kombinacji par biegunów zastosowanej w prototypie nie był przypadkowy, a stanowił kompromis między względami konstrukcyjnymi oraz zapewnieniem odpowiednich parametrów pracy przekładni. W pozostałych modyfikacjach przedstawionych w niniejszej pracy, przyjęto jako elementy ruchome obydwie wirniki w konfiguracji par biegunów jak dla modelu podstawowego.

Tabela 4. Wybrane kombinacje par biegunów – zablokowany wirnik zewnętrzny

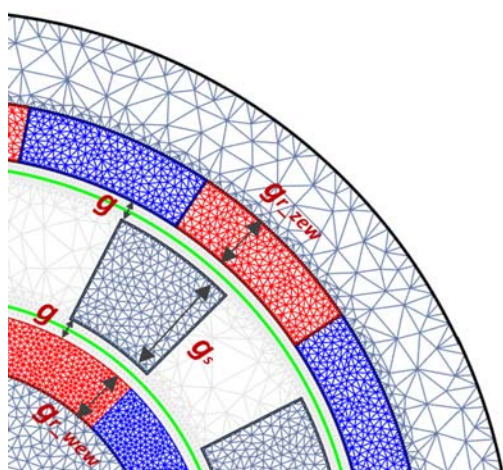
	MB1	MB2	MB3	MB4
P_{r_wew}	1	2	3	4
P_s	4	8	12	16
P_{r_zew}	3	6	9	12



Rys.6. Wyniki obliczeń momentów magnetycznych dla wybranych kombinacji par biegunów (WW, WZ, PP) przy zablokowanym wirniku zewnętrznym



Rys.7. Wyniki obliczeń momentu zaczepowego, współczynnika tężnień oraz gęstości momentu dla wybranych kombinacji par biegunów (WW, WZ, PP) przy zablokowanym wirniku zewnętrznym

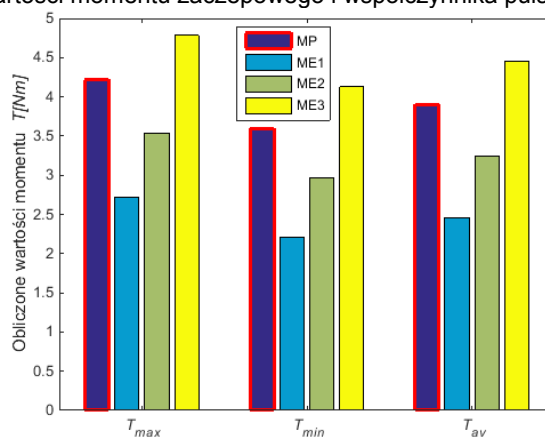


Rys.8. Umiejscowienie parametrów zmienianych w trakcie obliczeń

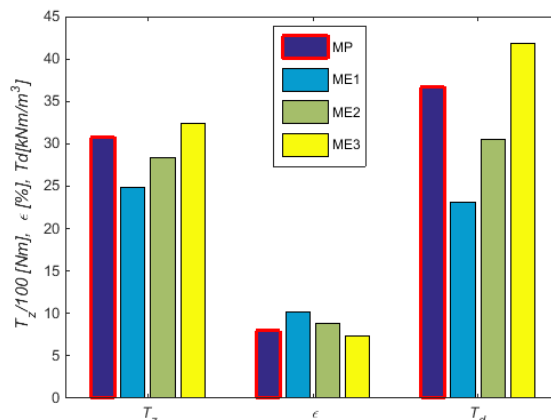
Podstawowymi elementami przedstawionej w pracy przekładni są magnesy trwałe. To ich wzajemne oddziaływanie stanowi podstawę przetwarzania –

transformacji momentu i prędkości obrotowej. W dalszych symulacjach autorzy skupili się na określeniu wpływu grubości magnesów na pracę przekładni, zakładając jednocześnie, iż wszystkie zastosowane magnesy są typu N35. Parametry odpowiedzialne za grubość magnesów (rys. 8) zmieniano w zakresie od 3 – 6mm.

Symulacje prowadzono w kilku etapach – zmiany wprowadzono osobno dla każdego z wirników, a w ostatnim wariancie zbadano wpływ jednoczesnej zmiany grubości magnesu dla obydwu wirników (modele **ME1-ME3** - $g_{r_wew} = g_{r_zew} = 3; 4; 6mm$). Wszystkie wyniki zgodnie z oczekiwaniami wskazują na silną korelację grubości magnesu z wartością przenieszonego momentu. Największy wpływ zanotowano w przypadku jednoczesnej zmiany grubości magnesów dla obydwu wirników. Wzrost grubości magnesu pociąga za sobą wzrost wartości przenieszonego momentu przy jednoczesnym niewielkim wahaniami wartości momentu zaczepowego i współczynnika pulsacji.



Rys.9. Wyniki obliczeń momentów magnetycznych dla modyfikacji grubości magnesu wirnika wewnętrznego i zewnętrznego



Rys.10. Wyniki obliczeń momentu zaczepowego, współczynnika tężnień oraz gęstości momentu dla modyfikacji grubości magnesu wirnika wewnętrznego i zewnętrznego

Istotnym elementem niezbędnym dla zapewnienia poprawnej pracy przekładni jest pierścień pośredniczący. Autorzy licznych publikacji związanych z tą tematyką zwracają uwagę na konieczność jego stosowania oraz na liczne problemy konstrukcyjne [4,8,11]. Przeprowadzone w pracy symulacje (modele **MF1- MF3**) miały za zadanie określenie wpływu jego grubości - parametr g_s (rys. 8.), na pracę przekładni. Ograniczenie jego grubości do 6 mm w niewielkim stopniu wpłynęło na osiąganą wartość momentu magnetycznego, natomiast zauważyć można, dużo większy wpływ grubości pierścienia pośredniczącego na moment zaczepowy oraz współczynnik tężnień.

Tabela 5. Wyniki obliczeń dla zmian grubości biegunów pierścienia pośredniczącego

	MF1	MF2	MP	MF3
g_s [mm]	6	8	10	12
T_{max} [Nm]	4,33	4,32	4,21	4,07
T_{min} [Nm]	3,52	3,61	3,60	3,53
T_{avin} [Nm]	3,91	3,95	3,90	3,8
T_{avout} [Nm]	16,06	15,79	15,60	15,17
T_z [Nm]	0,42	0,36	0,31	0,26
ε [%]	10,5	9,0	8,0	7,2
Td [kNm/m ³]	36,7	37,2	36,7	35,7

W ostatnim elemencie analizy wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na pracę przekładni magnetycznej zbadano wpływ szerokości szczelin powietrznych g . Każda szczelina powietrzna w znaczący sposób wpływa na strumień magnetyczny, determinuje siłę oddziaływania elementów magnetycznych nią oddzielonych, jak również często generuje liczne problemy obliczeniowe. Na etapie budowy prototypów szczególnie z magnesami trwałymi, bardzo trudne jest utrzymanie stosunkowo wąskiej i jednakowo szerokiej szczeliny. Wynika to z procesu klejenia magnesów. Mając to na uwadze, jak również konieczność zapewnienia w prototypie możliwości ruchu i blokowania wszystkich trzech elementów (WW, PP, WZ), przyjęta w modelu podstawowym szerokość szczeliny wynosi 2mm. W obliczeniach uwzględniono trzy przypadki, które zestawiono w tabeli 6. Uzyskany znaczny wzrost przenoszonego momentu dla mniejszych grubości szczelin przekłada się jednak również na „kulturę” pracy przekładni. Poziom pulsacji momentu jest ponad trzykrotnie wyższy. Istotną barierą dla zmniejszania szerokości szczeliny stanowią również względy konstrukcyjne.

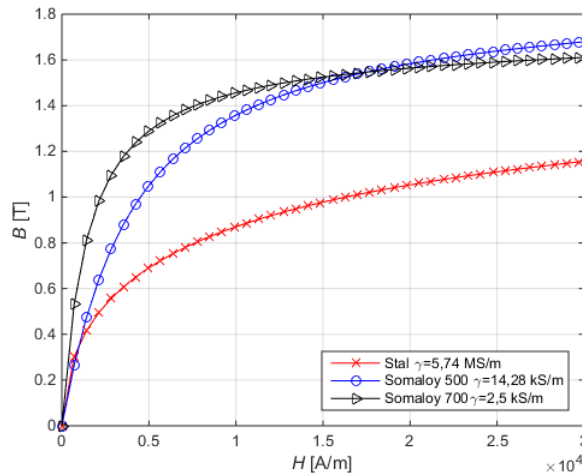
Tabela 6. Wyniki obliczeń dla zmian grubości szczeliny powietrznej

	MG1	MG2	MG3	MP
g [mm]	0,5	1,0	1,5	2,0
T_{max} [Nm]	7,85	6,3	5,12	4,21
T_{min} [Nm]	5,52	4,78	4,16	3,60
T_{avin} [Nm]	6,57	5,49	4,62	3,90
T_{avout} [Nm]	26,3	21,97	18,46	15,60
T_z [Nm]	1,09	0,71	0,47	0,31
ε [%]	17,7	13,8	10,4	8,0
Td [kNm/m ³]	61,9	51,7	43,5	36,7

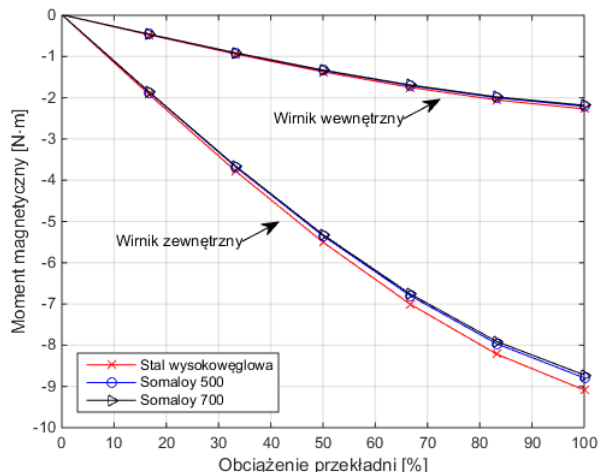
Analiza prądów wirowych w pasywnej przekładni magnetycznej

Wstępne wyniki pomiarów dynamiki przeprowadzonych na prototypie wykazały znacznie mniejsze wartości momentu magnetycznego na wyjściu układu. Dodatkowo zaobserwowano nieoczekiwane znaczne straty na biegu jałowym przekładni. Bardzo dobra zgodność obliczeń statycznych MES 3D z pomiarami nie tłumaczy tak znacznych rozbieżności. Mając to na uwadze autorzy postanowili uwzględnić w analizach również zjawisko indukowania się w masywnych elementach magnetowodu prądów wirowych. Jako że wszystkie elementy przekładni zostały wykonane z litej stali wysokowęglowej zaś pole magnetyczne w czasie pracy przekładni podlega znacznym i częstym zmianom, indukowane prądy wirowe w znacznym stopniu wpływają na pracę przekładni. Na podstawie analizy pola magnetycznego oraz na potrzeby weryfikacji wykonano szereg obliczeń z uwzględnieniem występowania prądów wirowych w pierścieniu pośredniczącym. Jak wiadomo, szczególną rolę w obliczeniach dotyczących zagadnień związanych ze zjawiskiem indukowania prądów wirowych w elementach masywnych odgrywa również przewodność elektryczna. Na tej podstawie autorzy postanowili opracować dodatkowo modele numeryczne z zastosowaniem materiałów, które pozwolą na ograniczenie powstawania strat w przekładni magnetycznej. W tym

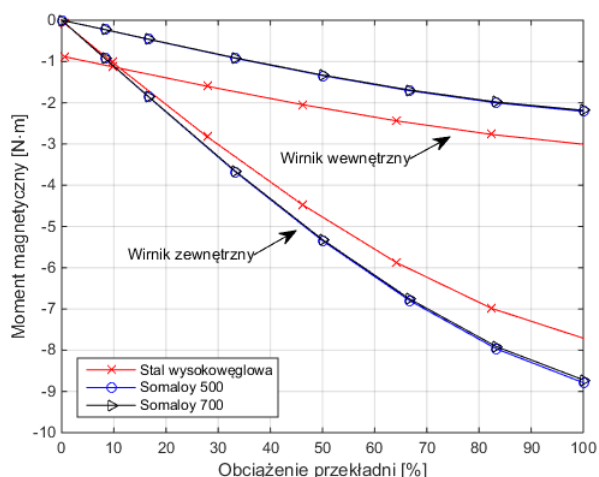
przypadku wykorzystano proszek magnetyczny miękki somaloy500 oraz somaloy700 [5, 12]. Na rysunku 11 przedstawiono aproksymowane charakterystyki magnesowania elementów masywnych wykorzystane w modelach numerycznych oraz podano ich przewodność właściwą.



Rys.11. Charakterystyki magnesowania elementów masywnych przekładni magnetycznej



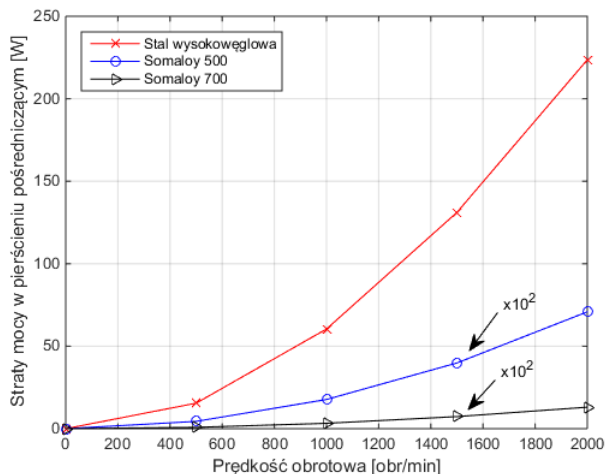
Rys.12. Charakterystyki momentu magnetycznego w funkcji obciążenia przekładni dla prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego 2000 obr/min z pominięciem zjawiska prądów wirowych



Rys.13. Charakterystyki momentu magnetycznego w funkcji obciążenia przekładni dla prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego 2000 obr/min z uwzględnieniem zjawiska prądów wirowych

Na rysunku 12 przedstawiono charakterystyki momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny i zewnętrzny dla różnych wartości obciążenia, dla prędkości wejściowej 2000 obr/min z pominięciem prądów wirowych. Z kolei charakterystyki zilustrowane na rysunku 13 uwzględniają zjawisko indukowania się prądów wirowych w biegunach pierścienia pośredniczącego.

Na podstawie przedstawionych charakterystyk można zauważyć bardzo duży wpływ indukowanych prądów wirowych na moment magnetyczny dla litej stali zastosowanej do budowy pierścienia pośredniczącego. Zastosowanie materiałów kompozytowych powoduje niemalże całkowite wyeliminowanie prądów wirowych, straty mocy zostały zmniejszone ponad 200 razy.



Rys.14. Straty mocy w pierścieniu pośredniczącym w funkcji prędkości obrotowej wirnika wewnętrznego

Wyniki symulacji wykazały również brak znaczących różnic pomiędzy zastosowanymi w symulacjach materiałami proszkowymi somaloy 500 i 700. Zastosowanie odpowiednich materiałów w pasywnej przekładni magnetycznej może wpłynąć na znaczne zmniejszenie strat związanych z indukowaniem prądów wirowych w elementach masowych przy niewielkim zmniejszeniu momentu magnetycznego, a tym samym poprawę sprawności i niezawodności przetwornika. Ograniczenie strat jest bardzo ważnym elementem z punktu widzenia własności zastosowanych magnesów trwałych, które są podstawowym elementem przekładni. Na rysunku 14 przedstawiono charakterystyki strat mocy w pierścieniu pośredniczącym w funkcji prędkości obrotowej.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zmodyfikowaną konstrukcję przekładni magnetycznej, umożliwiającą znaczne zwiększenie transmisji momentu obrotowego. Opisano zasadę działania oraz wykonano obliczenia dla wybranej konfiguracji przekładni o przełożeniu 4:1, dla której uzyskano gęstość przenieszonego momentu przekraczającą 35kNm/m^3 . Zaprezentowany w pracy przetwornik jest pierwszym wykonanym przez autorów prototypem. Jego skomplikowana konstrukcja pozwoliła na znaczne rozszerzenie badań, jednak przyczyniła się również do

obniżenia istotnych parametrów pracy przetwornika. W dalszym etapie badań autorzy przeprowadzą optymalizację zaproponowanej konstrukcji. Zawarte w pracy symulacje miały na celu określenie intensywności wpływu danych parametrów konstrukcyjnych na pracę przekładni. Analiza ta pozwoli na właściwe sformułowanie oraz dobór kryteriów optymalizacji. Pokazane elementy analizy materiałowej z zastosowaniem materiałów kompozytowych potwierdziły konieczność starannego doboru materiałów ze względu na ograniczenie strat mocy a tym samym zwiększenie sprawności przetwornika.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, dr inż. Marcin Kowol, dr inż. Janusz Kołodziej, Politechnika Opolska, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl, m.kowol@po.opole.pl, ja.kolodziej@po.opole.pl.

LITERATURA

- [1] Atallah K., Howe D., A novel high-performance magnetic gear, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.37, Issue.4 Part. 1, pp. 2844-2846, 2001.
- [2] Atallah K., Calverley S., Howe D., Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear, *IEE Proc. Electric Power Appl.*, Vol. 151, no. 2, pp. 135-143, 2004.
- [3] Evans J. D., Zhu Z., Optimal torque matching of a magnetic gear within a permanent magnet machine, in *IEEE Int. Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*, pp. 995-1000, 2011.
- [4] Gerber S., Wang R.-J., Design and Evaluation of a Magnetically Geared PM Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.51, Issue.8, 8107010, 2015.
- [5] Jankowski B., Przybylski M., Ślusarek B., Kapelski D., Karbowski M., Analysis and measurements of brushless dc motor with magnetic circuit made of soft magnetic composite and ND-FE-B bonded magnet, *Elektryka, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2011, p 17-26.
- [6] Niguchi N., K. Hirata, Cogging Torque Analysis of Magnetic Gear, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 2189-2197, 2012.
- [7] Niguchi N., Hirata K., Torque ripple analysis of a magnetic-gear motor, in *Int. Conf. on Electr. Machines (ICEM)*, pp. 789-794, 2012.
- [8] Kowol M., Łukaniszyn M., Budowa i zasada działania przekładni magnetycznej, *Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki*, WZEE, Ustroń, 27-29 września 2012 (Conf. CD – 25.pdf).
- [9] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pola magnetycznego w przekładni magnetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 100/3/2013, Komel, s.163-168.
- [10] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pracy przekładni magnetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 104/4/2014, Komel, s.125-130.
- [11] Rasmussen O. P., Frandsen V. T., Jensen K. K. and Jessen K., Experimental evaluation of a motor integrated permanent magnet gear, *Proc.IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp.3982 -3989 2011
- [12] Ślusarek B., Szczygłowski J., Chwastek K., Jankowski B., The effects of excitation conditions and annealing temperature on power loss in SMC cores, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 4, 2015, s. 14-19.