

Przegląd konstrukcji przekładni magnetycznych

Streszczenie. Niniejsza praca opisuje szerokie spektrum zagadnień związanych z transformacją energii za pośrednictwem pola magnetycznego, a w szczególności prac dotyczących modelowania, optymalizacji konstrukcji i weryfikacji pomiarowej przekładni magnetycznych zbudowanych w Katedrze Automatyk Napędów i Robotyki Politechniki Opolskiej. We wstępie przedstawiono rys historyczny przekładni magnetycznych, zasadę działania oraz najważniejsze cechy tych przetworników. Znaczną część pracy poświęcono przedstawieniu stanu zagadnienia, opisując istniejące obecnie konstrukcje przekładni magnetycznych oraz ich klasyfikację w odniesieniu do stosowanych powszechnie przekładni mechanicznych. W dalszej części pracy przedstawiono i omówiono istotne charakterystyki oraz parametry współosiowej przekładni magnetycznej, zaprezentowano prototyp, stanowisko badawcze, wyniki obliczeń i weryfikację pomiarową. Następnie przeanalizowano wpływ parametrów konstrukcyjnych przekładni pod kątem zwiększenia wartości momentu magnetycznego. Omówiono także modele dyskretne i fizyczne przekładni magnetycznych ze strumieniem radialnym i strumieniem osiowym, o przełożeniu całkowitym i ułamkowym. Opisano również zyskujące współcześnie na popularności hybrydowe przetworniki elektromagnetyczne z wbudowaną przekładnią magnetyczną.

Abstract. This work describes a wide spectrum of issues related to the transformation of energy through the magnetic field, in particular, the work on modeling, design optimization and measurement verification of magnetic gears built at the Department of Drive Automation and Robotics at the Opole University of Technology. The introduction presents a history of magnetic gears, the principle of operation and the most important features of these converters. A significant part of the work was devoted to the presentation of the state of the art, describing the currently existing designs of magnetic gears and their classifications in relation to the commonly used mechanical transmissions. In the further part of the work, the essential characteristics and parameters of the coaxial magnetic gear are presented and discussed, also the prototype, test stand, calculation results and measurement verification are presented. Then, the influence of the design parameters of the gears was analyzed in terms of increasing the value of the magnetic torque. Discrete and physical models of magnetic gears with radial flux and axial flux, with integer and fractional ratios, are also discussed. There are also described hybrid electromagnetic transducers with a built-in magnetic gear, which are becoming more and more popular nowadays. (*The transformation of energy through the magnetic field*)

Słowa kluczowe: przekładnia magnetyczna, metoda elementów skończonych, moment magnetyczny, przełożenie całkowite i ułamkowe, hybrydowe przetworniki elektromagnetyczne.

Keywords: magnetic gear, finite element method, magnetic torque, integer and fractional gear ratio, hybrid electromagnetic transducers.

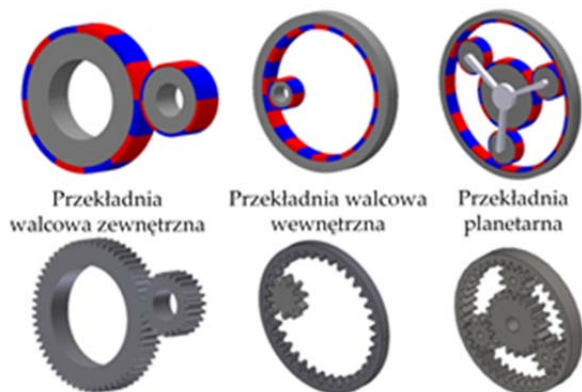
Wstęp

Zastosowanie przekładni jako układu transformacji energii mechanicznej wynika z konieczności dostosowania prędkości i momentu obrotowego do wymagań obciążenia. Przekładnie są stosowane w różnych gałęziach przemysłu, a szczególnie tam, gdzie aplikacja wymaga wysokiego momentu przy niskiej prędkości obrotowej. 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, czyli bezstykowe przenoszenie momentu obrotowego - przekładnie magnetyczne (rys. 1). Dodatkowo takie przetworniki zapewnią również zmniejszenie poziomu hałasu i wibracji, naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem oraz wysoką sprawność.

W artykule przedstawiono koncepcję i rozwój przekładni magnetycznych oraz stan prac dotyczących modelowania, optymalizacji konstrukcji i badań na obiektach fizycznych przekładni magnetycznych, realizowanych w Katedrze Automatyk Napędów i Robotyki Politechniki Opolskiej. Omówiono modele dyskretne dwu- i trójwymiarowe oraz prototypy przekładni magnetycznych ze strumieniem radialnym i strumieniem osiowym. Przeanalizowano zarówno przekładnie magnetyczne o przełożeniu całkowitym jak i ułamkowym. Zwrócono również uwagę na wpływ zastosowanych materiałów na sprawność tej klasy przetworników.

Rozwój przekładni magnetycznych

Koncepcja przekładni magnetycznej powstała ponad sto lat temu. Pierwsza wzmianka dotycząca bezstykowej transformacji momentu obrotowego pojawiła się w patencie z 1901r. opracowanym przez Armstronga, przedstawiającym elektromagnetyczną przekładnię zębatą [1]. Zasada działania przetwornika, według przedstawionego patentu jest bardzo podobna do zębatej przekładni mechanicznej jednak transformacja momentu obrotowego odbywa się za pośrednictwem pola elektromagnetycznego. W 1941r. Faus [2] jako pierwszy zaproponował przekładnię magnetyczną o konstrukcji podobnej do zębatej przekładni mechanicznej, w której wykorzystane zostały magnesy trwałe (eliminując tym samym konieczność zasilania przetwornika). Niestety ze względu na niską gęstość energii magnesów ferrytowych, zastosowanie przetwornika w przemyśle było bardzo ograniczone. Oprócz parametrów magnesów trwałych, na wartość przenoszonego momentu wpływa również ograniczony obszar oddziaływania pomiędzy elementami przekładni. Pod koniec lat 60-tych dwudziestego wieku Martin [3] opracował nową konstrukcję, w której zastosował trzy współosiowe elementy, tj. wirnik wewnętrzny oraz zewnętrzny, na obwodach których naklejono magnesy trwałe oraz modulator wykonany w postaci



Rys.1. Wybrane przekładnie mechaniczne i ich magnetyczne odpowiedniki

ferromagnetycznych trzpieni. Dalsze badania były prowadzone przez Lainga, który przedstawił różne kształty i układy modulatorów [4]. Wraz z pojawieniem się w latach 80-tych wysokoenergetycznych magnesów trwałych bazujących na pierwiastkach ziem rzadkich, badania nad przekładnią magnetyczną nabrały znacznego tempa. Kolejne prace pod kierunkiem Ackermanna [5] przedstawiają konstrukcje, w których wszystkie magnesy biorą udział w transformacji momentu obrotowego, co w dużym stopniu podnosi parametry mechaniczne przetwornika. Ponadto dokonano opisu matematycznego relacji między liczbą par biegunów wirników z magnesami trwałymi a liczbą trzpieni modulatora. W tym czasie doszło do przełomu, głównie za sprawą możliwości osiągnięcia zadawalających parametrów funkcjonalnych przetwornika. Wiele ośrodków badawczych na całym świecie, jak również przemysł, zaczęły interesować się bezkontaktową transformacją energii mechanicznej realizowanej za pośrednictwem pola magnetycznego. Współosiowa przekładnia magnetyczna, której zasadę działania oparto na oddziaływaniach magnetycznych, pozwoliła na wyeliminowanie fizycznego kontaktu współpracujących elementów, a tym samym tarcia, hałasu oraz konieczności smarowania i cyklicznej obsługi. Możliwa do uzyskania bardzo wysoka sprawność, bezobsługowość oraz niski koszt eksploatacji jeszcze bardziej podkreślają walory tego przetwornika. Obecnie wiele ośrodków badawczych prowadzi badania w aspekcie konstrukcyjnym, materiałowym oraz eksploatacyjnym. Duży wpływ na zainteresowanie tą tematyką ma również możliwość integracji przekładni magnetycznej z silnikiem elektrycznym skutkującej powstaniem przetwornika hybrydowego i jego potencjalne zastosowanie jako bezpośredni napęd pojazdu.

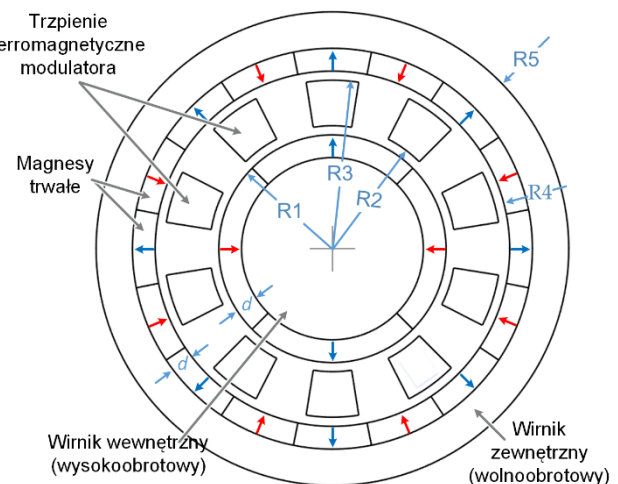
Podstawowym kryterium oceny jakości przekładni magnetycznej jest gęstość przenoszonego momentu, którą wyznacza się jako stosunek wartości maksymalnej momentu do całkowitej objętości przetwornika [6]. Przekroczenie wartości maksymalnej obciążenia skutkuje zerwaniem synchronizacji przekładni, pojawieniem się drgań, a w konsekwencji zatrzymaniem pracy układu mechanicznego. W 2001r. Atallah i Howe przedstawili wydajną przekładnię magnetyczną, gdzie uzyskano gęstość przenoszonego momentu przekraczającą $100 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ [7]. Parametry jakie osiągnięto dla tego typu przetwornika sprawiają, iż może on konkurować z wybranymi konstrukcjami mechanicznymi.

Przekładnia magnetyczna współosiowa o strumieniu promieniowym

Magnetyczne przekładnie walcowe charakteryzują się prostą budową. Składają się z dwóch wirników, na których naklejone są magnesy trwałe [6-8]. Ze względu na umiejscowienie kół/wirników rozróżnia się przekładnie walcowe wewnętrzne oraz zewnętrzne (rys. 1). Przełożenie przekładni magnetycznej (i_r) zależy od liczby par biegunów. W większości układów przełożenie jest większe niż jeden, co odpowiada wysokim obrotom na wał wyjściowym i niskim na wał wejściowym. Innym rozwiązaniem, które wywodzi się z przekładni walcowych, redukującym w dużym stopniu wspomniane wcześniej wady, jest współosiowa przekładnia magnetyczna zaprojektowana w oparciu o przetwornik Atallaha.

Szczegóły budowy współosiowej przekładni magnetycznej zilustrowano na rysunku 2. Przetwornik taki składa się z trzech podstawowych elementów tj. wirników wewnętrznego i zewnętrznego (zawierających magnesy trwałe) oraz z pierścienia pośredniczącego (w postaci rozłożonych symetrycznie na całym obwodzie biegunów - trzpieni/biegunów ferromagnetycznych). Taka konstrukcja,

umożliwia znacznie bardziej efektywne wykorzystanie magnesów trwałych, w transformacji momentu biorą udział już wszystkie magnesy i trzpień [9-11].



Rys.2. Zmodyfikowana konstrukcja przekładni magnetycznej

Przekładnia magnetyczna (rys. 2.), posiada aż trzy elementy ruchome, jeden z nich zawsze powinien być zablokowany. Zakładając, że elementem napędzanym będzie wirnik wewnętrzny należy dokonać wyboru elementu stanowiącego wyjście z układu. 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 elementów składowych - wirnika wewnętrznego i zewnętrznego oraz trzpieni modulatora.

Zasada działania przekładni magnetycznej oparta jest na modulacji pola magnetycznego magnesów trwałych poprzez bieguny/trzpień ferromagnetyczne pierścienia pośredniczącego zwanego również modulującym. Liczbę biegunów pierścienia modulującego dobiera się tak, aby liczba par biegunów w przestrzeni harmonicznych rozkładu indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej, odpowiadała liczbie par biegunów wirnika z magnesami trwałymi. Na tej podstawie można wyznaczyć przełożenie przekładni magnetycznej (i_r), które dla opisywanej konstrukcji w przypadku nieruchomego pierścienia modulatora wyraża się zależnością [8]:

$$(1) \quad i_r = \frac{p_s - p_r}{p_r}$$

W sytuacji, w której nieruchomy jest jeden z wirników zawierających magnesy trwałe, przełożenie przekładni określa się zależnością:

$$(2) \quad i_r = \frac{p_s}{p_r}$$

gdzie: p_r - liczba par biegunów wirnika z magnesami trwałymi; p_s - liczba nabiegunników pierścienia ferromagnetycznego.

Równania (1) i (2) pokazują, że dla wybranego przełożenia przekładni, istnieje stosunkowo duża liczba kombinacji doboru liczby par biegunów wirnika wewnętrznego, zewnętrznego oraz biegunów modulatora.

Pewne ograniczenia wynikają głównie ze względów konstrukcyjnych i konieczności zapewnienia odpowiednich parametrów pracy przekładni [8, 9].

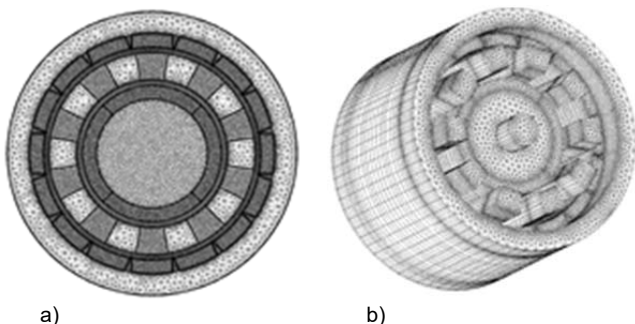
Modele numeryczne i prototypy współosiowej przekładni magnetycznej o przełożeniu całkowitym

Pierwsze badania dotyczące przekładni magnetycznych na Politechnice Opolskiej rozpoczęto w 2012 roku. W wyniku prowadzonych prac powstały modele oraz prototyp przekładni magnetycznej (o parametrach jak w tab. 1), na których wykonano szereg badań pozwalających na pogłębienie wiedzy na temat zasady działania i stanów pracy przetwornika. Opracowano programy komputerowe umożliwiające analizę zjawisk, jak również wyznaczenie parametrów przekładni. Ważnym etapem prac było przygotowanie oraz zestawienie dwu- i trójwymiarowych modeli polowych współosiowej przekładni magnetycznej, umożliwiające ocenę wpływu zastosowanych uproszczeń na jakości otrzymanych wyników w różnych stanach pracy (rys. 3.) [8-10].

Tabela 1. Parametry konstrukcyjne modelu podstawowego przekładni magnetycznej

| 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 wewnętrzny wirnika zewnętrznego | $R4$ | 39 mm |
| Promień zewnętrzny wirnika zewnętrznego | $R5$ | 52 mm |
| Grubość magnesu trwałego | d | 5 mm |

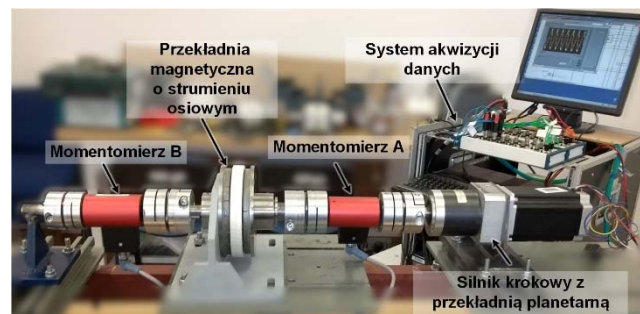
Do obliczeń wykorzystano opis pola elektromagnetycznego za pomocą równań Maxwella, których rozwiązanie uzyskano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Modele polowe zostały opracowane przy użyciu pakietów Flux3D oraz Matlab, w którym zaimplementowano autorskie programy [8, 10, 11.]. W pracach [12, 13] autorzy szczegółowo omówili rozkłady składowych promieniowej i stycznej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.



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

W pracach [8, 10, 11] przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, w oparciu o które przeprowadzono analizę porównawczą parametrów przekładni magnetycznej, obejmującą wykorzystanie modeli dwuwymiarowych i trójwymiarowych. Wyniki dodatkowo zweryfikowano pomiarami na skonstruowanych prototypach przekładni (stanowisko pomiarowe – rysunek 4). Zastosowane modele polowe wykorzystano również do poprawy parametrów całkowitych badanego przetwornika. W ramach omawianych prac przeprowadzono również modyfikację oraz optymalizację współosiowej przekładni magnetycznej pod

kątem zwiększenia gęstości przenoszonego momentu [8, 14]. W początkowym etapie tych badań określono wpływ doboru kombinacji par biegunów przekładni na wartość momentu magnetycznego. Na uwagę zasługuje również znaczna redukcja tętnień oraz momentu zaczepowego w pozostałych modelach [9]. Na podstawie analizy wyników obliczeń dokonano wyboru kombinacji par biegunów zastosowanej w prototypie, który stanowił kompromis między względami konstrukcyjnymi oraz zapewnieniem odpowiednich parametrów pracy przekładni.



Rys. 4. Stanowisko badawcze z przekładnią magnetyczną

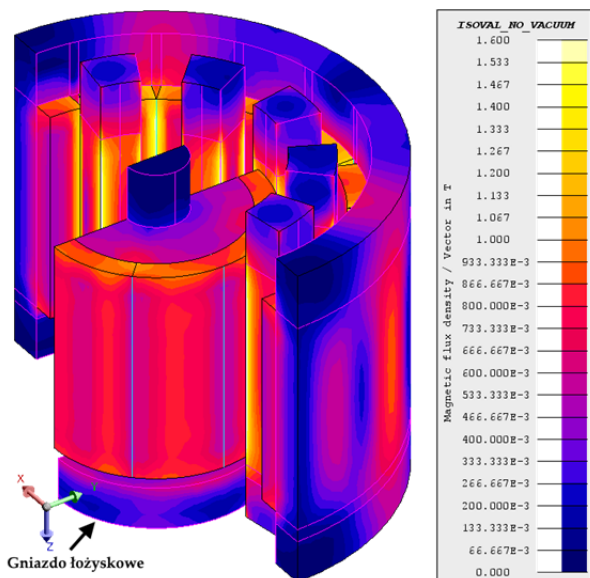
Podstawowymi elementami przekładni są magnesy trwałe. To ich wzajemne oddziaływanie stanowi podstawę przetwarzania – transformacji momentu i prędkości obrotowej. W dalszych symulacjach autorzy określili wpływ grubości magnesów na pracę przekładni, zakładając jednocześnie, iż wszystkie zastosowane magnesy są typu N35. Wykazano, że zwiększanie grubości magnesu pociąga za sobą wzrost wartości przenoszonego momentu przy jednoczesnym niewielkim wahaniom wartości momentu zaczepowego i współczynnika pulsacji [8].

W ostatnim etapie 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 o montażu powierzchniowym, trudne jest utrzymanie stosunkowo wąskiej i jednakowo szerokiej szczeliny. Wynika to z konieczności klejenia magnesów. Przyjęta w modelach szerokość szczeliny wynosi 2mm, gdyż istotną barierą dla zmniejszania szerokości szczeliny stanowią również względy konstrukcyjne [8].

Wstępne wyniki pomiarów przeprowadzonych na prototypie wykazały jednak, trudne do wytłumaczenia, znacznie mniejsze wartości momentu magnetycznego na wyjściu układu [15]. Aby uzyskać odpowiedzi sięgnięto po trójwymiarowe modele polowe. Obliczenia trójwymiarowe ukazały wcześniej niewidoczną dodatkową ścieżkę dla strumienia magnetycznego, skutkującą znacznym osłabieniem oddziaływań harmonicznych – co wytłumaczyło rozbieżności i ubytek momentu. Na rysunku 5 pokazano rozkład indukcji magnetycznej uzyskany z obliczeń trójwymiarowych, obrazujący niepożądane sprzężenia magnetyczne. Porównanie obliczeń i pomiarów zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie obliczeń i pomiarów momentów [16]

| Moment magnetyczny | Obliczenia [N·m] | Pomiary [N·m] |
|--------------------|------------------|---------------|
| Wirnik wewnętrzny | 3,90 | 3,50 |
| Wirnik zewnętrzny | 15,61 | 14,01 |
| Modulator | 19,51 | 17,51 |



Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej dla trójwymiarowego modelu przekładni magnetycznej

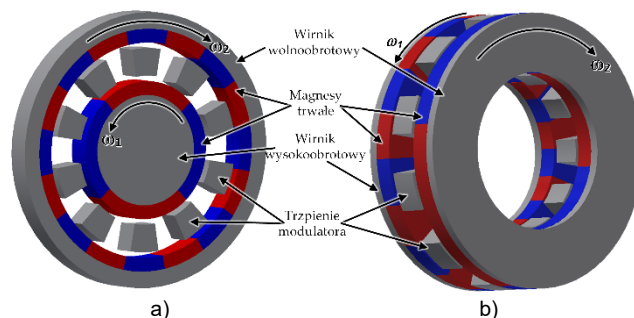
W trakcie pomiarów zaobserwowano również nieoczekiwane, znaczne straty na biegu jałowym przekładni. Bardzo dobra zgodność obliczeń statycznych MES 3D z pomiarami nie tłumaczy tak znacznych rozbieżności. Mając to na uwadze autorzy uwzględnili w analizach również zjawisko indukowania się w masywnych elementach magnetowodu prądów wirowych [8, 15]. Jako że wszystkie elementy pierwszego prototypu przekładni, ze względów konstrukcyjnych, 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. 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 opracowali dodatkowo modele numeryczne z zastosowaniem materiałów, które pozwalają na ograniczenie powstawania strat w przekładni magnetycznej. W tym przypadku wykorzystano proszek magnetyczny miękki somaloy500 oraz somaloy700 [8, 16]. Elementami stanowiącymi potencjalnie duże źródła strat są modulator oraz wirnik wolnoobrotowy, co jest związane ze znacznymi fluktuacjami pola magnetycznego w ich obszarze. Zastosowanie materiałów kompozytowych do budowy modulatora oraz pakietowania jarkza zewnętrznego spowodowało niemal całkowitą eliminację prądów wirowych. Wykazano, również że straty mocy zostały zmniejszone ponad 200 razy [8-11].

Kluczowym elementem, niezbędnym dla zapewnienia poprawnej pracy przekładni, jest pierścień pośredniczący. W pracach [8, 16, 17], autorzy zwracają uwagę na konieczność stosowania modulatora ferromagnetycznego oraz na liczne problemy konstrukcyjne. Kształt, grubość, długość czynna i materiał trzpieni modulatora determinują wartość rozwijanego momentu magnetycznego, zaczepowego oraz współczynnik tętnień. Artykuł [16] dotyczył analizy trzech autorskich, alternatywnych konstrukcji modulatora i wirnika zewnętrznego wykonanych z litego materiału i laminatu. Wyniki analizy zawierają szczegółowe informacje o wpływie konstrukcji i zastosowanych materiałów na zmiany momentu magnetycznego i sprawność przekładni magnetycznej. Wyniki badań jednoznacznie wskazują na najlepsze rozwiązanie pod względem projektowym [16].

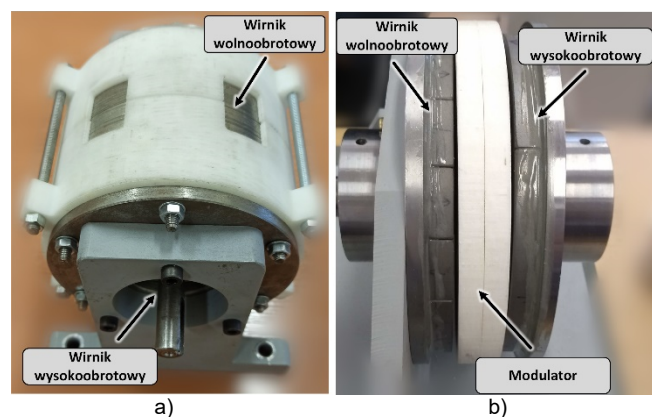
Ciekawym zagadnieniem analizowanym w pracy [17] jest porównanie wpływu parametrów geometrycznych i materiałowych modulatorów współosiowej przekładni magnetycznej, w kontekście oddziaływań lokalnych i globalnych oraz na analizie wpływu obciążenia przekładni na kierunek i wartość tych sił. W szczególności autorzy analizują również siły lokalne w otoczeniu trzpieni modulatora o anizotropii wynikającej ze sposobu pakietowania [16].

Modele numeryczne i prototypy przekładni współosiowej o przełożeniu ułamkowym

Rosnące wymagania stawiane aplikacjom współczesnych napędów wymusiły również badania w obszarze przetworników – przekładni magnetycznych o strumieniu osiowym (AF - ang. axial flux). Podyktowane jest to uwarunkowaniami wynikającymi z ograniczonej przestrzeni montażowej, koniecznością zapewnienia hermetyzacji i separacji elementów czynnych, a często również potencjałem tworzenia struktur wielosegmentowych. Mając dobre doświadczenia badawcze, autorzy postanowili podjąć również analizę przekładni magnetycznych współosiowych o przełożeniu ułamkowym (rys. 6.) oraz strumieniach promieniowym (RFMG – ang. radial flux magnetic gear) i osiowym (AFMG ang. axial flux magnetic gear) [18]. Zastosowanie przełożenia ułamkowego wpływa na obniżenie poziomu pulsacji momentu, gdyż następuje kompensacja momentu zaczepowego [19-21]. Brak symetrii obu maszyn wpływa na złożoność modeli numerycznych, gdyż obliczenia należy prowadzić dla całego przetwornika. Zbudowane prototypy przekładni magnetycznych ze strumieniem promieniowym i osiowym pokazano na rysunku 7.



Rys. 6. Budowa współosiowej przekładni magnetycznej o strumieniu promieniowym (a) oraz osiowym (b).

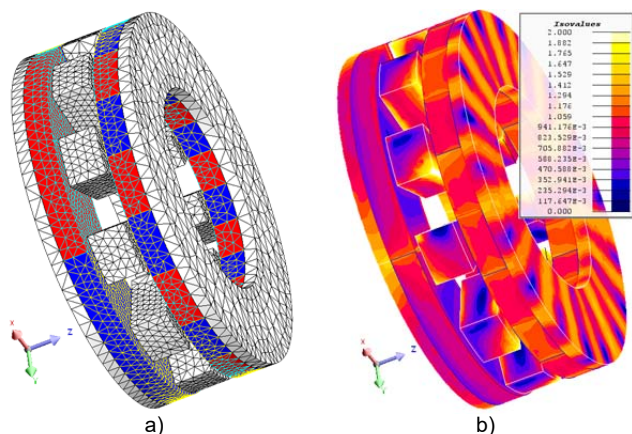


Rys. 7. Prototypy przekładni magnetycznych o przełożeniu ułamkowym a) RFMG, b) AFMG

Z uwagi na posiadane zaplecze pomiarowe obydwaj przetworniki są małej mocy – do 2kW (podstawowe dane zebrano w tabeli 3). W obu konstrukcjach do budowy

wirników wolno i wysokoobrotowego zastosowano magnesy neodymowe N42. Mając na uwadze redukcję strat mocy, jarmzo zewnętrzne oraz modulator w RFMG wykonano z pakietu blach zaś wirnik wysokoobrotowy z uwagi na niewielkie fluktuacje pola magnetycznego z litej stali konstrukcyjnej. Specyficzna konstrukcja AFMG utrudnia jednak zastosowanie pakietowania z uwagi na zapewnienie odpowiedniej sztywności tarcz wirników. Z racji tego jarmza dla obydwu wirników AFMG wykonano z litej stali zaś do budowy modulatora zastosowano kompozyt magnetyczny Somaloy 700. Pozostałe elementy konstrukcyjne centrujące wirniki oraz modulator, w związku z koniecznością eliminacji sprzężeń magnetycznych, wykonano ze stali kwasoodpornej, mosiądzu oraz tworzywa sztucznego (ABS). W porównywanych prototypach koncentrycznej przekładni magnetycznej, zastosowano ułamkowe przełożenie $G_r=5,5:1$ (zgodnie z dobrze znaną zależnością $G_r=1+p_r/p_h$, gdzie p_r , p_h oznaczają odpowiednio liczbę par biegunów wirników wolnoobrotowego i wysokoobrotowego).

Szczególnie interesującym zagadnieniem w tych dwóch diametralnie różnych strukturalnie prototypach przekładni magnetycznych, jest analiza naciągów w układach niesymetrycznych, niezbalansowanych magnetycznie. Podstawową cechą wspólną obu prototypów jest identyczna liczba par biegunów wirników i trzpieni modulatora skutkująca tym samym przełożeniem oraz wyjściowy moment na poziomie ok. 30 N·m. Istotne parametry konstrukcyjne i materiałowe prototypów zebrano w tabeli 3. Specyficzna budowa przekładni o strumieniu osiowym oraz brak symetrii, wymusiły zastosowanie modelu trójwymiarowego (rys. 8a). Obliczenia numeryczne wykonane dla modelu MES 3D wykazały bardzo dobrą zgodność z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Na rysunku 8b przedstawiono przykładowy rozkład indukcji magnetycznej w przekładni AFMG. Wykonane wstępne obliczenia numeryczne (3D MES) nowego prototypu pozwoliły na dobór pozostałych istotnych parametrów konstrukcyjnych.



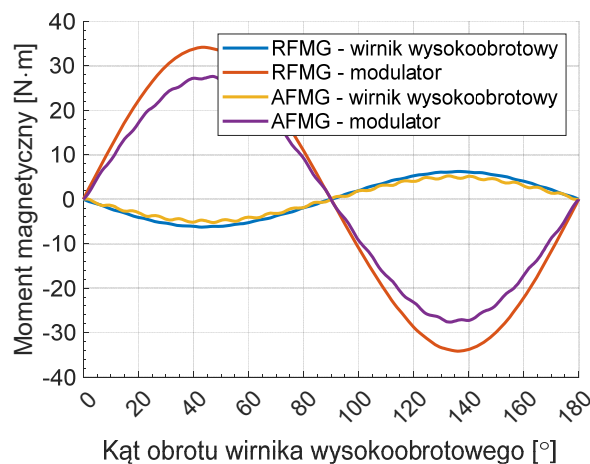
Rys. 8. Model dyskretny przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym (a) i rozkład indukcji magnetycznej (b)

Przekładnia AFMG pomimo większej średnicy i objętości cechuje się wyraźnie niższą gęstością momentu. Wynika to głównie z wyboru grubości zastosowanych szczelin powietrznych, podyktowanego koniecznością redukcji naciągu osiowego. Współcześnie trudno sobie wyobrazić prototypowanie bez zastosowania technologii addytywnej [22]. Użyta w omawianej konstrukcji technologia druku 3D, nie pozwala jednak na uzyskanie odpowiedniej sztywności tarczy modulatora przy szczelinie 1mm. Mając to na uwadze autorzy zaproponowali opisaną w pracy [18] metodę redukcji siły osiowej poprzez asymetrię szczelin powietrznych.

Tabela 3. Porównanie parametrów przekładni magnetycznych ze strumieniem promieniowym RFMG i osiowym AFMG

| Parametr | Oznaczenie | RFMG | AFMG |
|------------------------------------------|---------------------------------|------|------|
| Liczba par biegunów wirnika wewnętrznego | $p_{r_{wew}}$ | 2 | |
| Liczba par biegunów wirnika zewnętrznego | $p_{r_{zew}}$ | 9 | |
| Liczba biegunów modulatora | p_s | 11 | |
| Średnica zewnętrzna | D_z [mm] | 112 | 150 |
| Długość w osi Z | L_z [mm] | 50 | 52 |
| Grubość szczeliny powietrznej | δ [mm] | 1 | 2,5 |
| Objętość magnesów trwałych | V_{PM} [mm ³] | 120 | 204 |
| Gęstość momentu magn. | ρ_T [kN·m/m ³] | 63,8 | 38,9 |

Porównując materiały użyte do budowy obydwu prototypów, zauważano podobny udział procentowy magnesów trwałych w obu konstrukcjach, co przy znacznej różnicy objętości wskazuje jednak na różny wskaźnik ich wykorzystania, a w przypadku AFMG na możliwość znacznego podniesienia wartości momentu magnetycznego. Zastosowanie pakietu blach eliminuje konieczność stosowania kompozytu magnetycznego do budowy modulatora w RFMG, co jednocześnie redukuje koszty budowy, jednak podnosi procentowy udział żelaza w konstrukcji przekładni. Dodać również należy, że w obliczeniach objętości uwzględniono elementy czynne magnetycznie z pominięciem mocowań, wału, łożysk, itp. Porównanie charakterystyk momentów magnetycznych dla dwóch rozpatrywanych wariantów przekładni pokazano na rysunku 9.

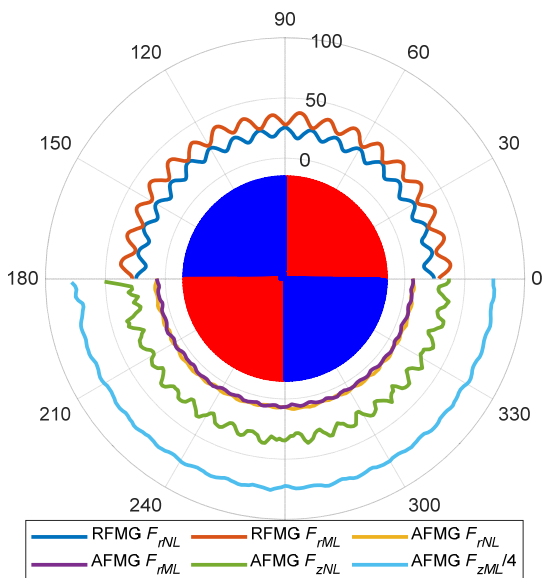


Rys. 9. Charakterystyki momentów magnetycznych przekładni RFMG oraz AFMG

Skutki niesymetrii magnetycznej, naciągów uzewnętrzniają się poprzez niespodziewane drgania i hałas. Kluczową rolę w tym zakresie odgrywają siły lokalne, siła promieniowa oraz osiowa. Analiza oddziaływań lokalnych jest jednak złożona, czasochłonna i wymaga dokładnego opisu geometrycznego elementów – rdzeni modulatora, obliczeń lokalnych, a następnie ich syntezy [18]. W niniejszej pracy autorzy koncentrują się jedynie na siłach globalnych.

Rozpatrując w ujęciu całościowym zbalansowaną przekładnię magnetyczną, składowa promieniowa siła działająca na wirniki i modulator nie występuje. Rozpatrywane prototypy z racji niecałkowitego przełożenia charakteryzują się jednak występowaniem naciągu promieniowego, dodatkowo zależnego również od obciążenia. Zmienność modułu składowych promieniowych zarówno w stanie jałowym (F_{rNL}) jak i pod maksymalnym obciążeniem (F_{rML}) wyraźnie wskazuje na większe

obciążenie łożysk w prototypie RFMG. Co ciekawe obserwowana wartość naciągu promieniowego dla RFMG jest na porównywalnym poziomie ze składową osiową (F_{zNL}) w nieobciążonym prototypie AFMG. Niestety naciąg w kierunku osiowym dla AFMG rośnie bardzo szybko wraz ze wzrostem obciążenia. Dla maksymalnego obciążenia wartość składowej osiowej (F_{zML}) wzrasta prawie 10 krotnie (rys. 10). Wartości te potwierdzają konieczność zachowania ostrożności przy prototypowaniu i używaniu materiałów konstrukcyjnych o odpowiedniej sztywności. Z punktu widzenia konstruktora istotną rolę odgrywa również wspomniana wyżej szczegółowa analiza oddziaływań lokalnych. Siły działające na poszczególne rdzenie modulatora są znacznie wyższe niż te wyznaczone w analizie globalnej [18].



Rys. 10. Wyniki obliczeń składowych promieniowych i osiowych w funkcji obrotu wirnika wysokoobrotowego, w stanie jałowym i dla maksymalnego obciążenia (prototypy RFMG i AFMG)

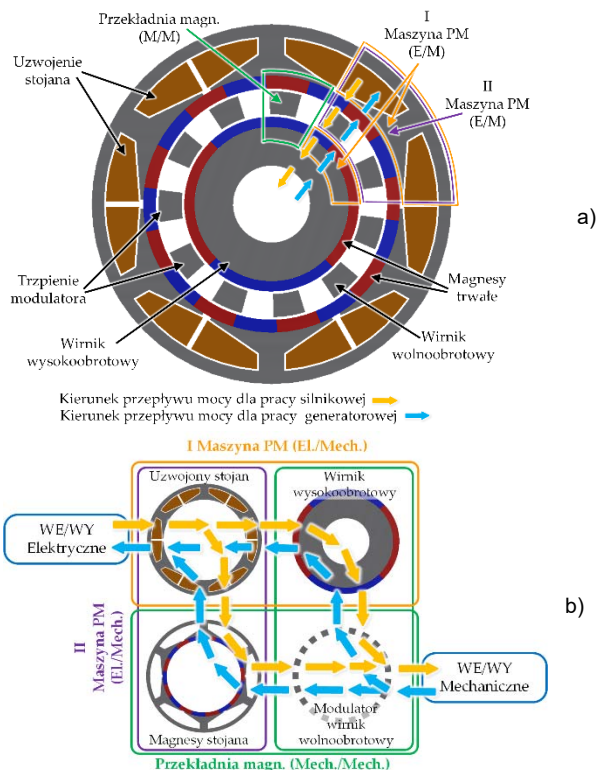
Maszyna elektryczna ze zintegrowaną przekładnią magnetyczną

W aplikacjach wymagających wysokiego momentu obrotowego przy niskich prędkościach obrotowych wykorzystuje się zazwyczaj maszynę wysokoobrotową wraz z przekładnią mechaniczną. Wynika to przede wszystkim z masy, rozmiarów oraz kosztów takiego napędu [23-28].

Rozwój technologii przekładni magnetycznych doprowadził do opracowania nowej klasy przetworników ze zintegrowaną przekładnią magnetyczną (MGPM lub MGM). Zarówno gęstość momentu obrotowego jak i współczynnik mocy tej grupy przetworników, są większe od tych wskazanych dla maszyn ze strumieniem poprzecznym. Rozwiązanie to jest również korzystniejsze w porównaniu do urządzeń łączonych w sposób kaskadowy (silnik i przekładnia). Ze względu na dużą gęstość momentu obrotowego, przetworniki te stały się konkurencyjne na tle napędu bezpośredniego [26]. Koncepcja MGPM została po raz pierwszy opisana przez Venturini'ego w 1993 r. [25]. Obecnie istnieje kilka rozwiązań konstrukcyjnych, które głównie zależą od zastosowania w danym układzie. Na rysunku 11a zilustrowano przykładową konstrukcję przetwornika, który zbudowany jest z trzech elementów: stojana i dwóch wirników. Stojan tworzy część zewnętrzną przetwornika, w którym zastosowano jawne bieguny magnetyczne, dodatkowo na powierzchni wewnętrznej naklejono magnesy trwałe. Modulator pełni rolę wirnika,

k który sprzęgnięty jest z napędzanym układem, natomiast wirnik wewnętrzny zbudowany jest w taki sam sposób jak we współosiowej przekładni magnetycznej. Zasada doboru liczby par biegunów magnesów trwałych wirników i trzpieni modulatora jest taka sama jak w przypadku współosiowej przekładni magnetycznej. Uzwojenia umieszczone w stojanie są zaprojektowane tak, aby ich liczba par biegunów była równa liczbie par biegunów wirnika wewnętrznego.

Pole magnetyczne wytworzone przez zasilone uzwojenie stojana oddziałuje nie tylko na modulator, ale również na wirnik wewnętrzny. Zatem, na schemacie przepływu energii (rys. 11b) można wyszczególnić dwie maszyny elektryczne oraz przekładnię magnetyczną. W przypadku pracy silnikowej przetwornika w wyniku oddziaływania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez stojan, wirnik wewnętrzny wiruje z wysoką prędkością. Z kolei modulator, z którym sprzęgnięte jest zewnętrzne obciążenie, będzie wirował zgodnie z kierunkiem obrotu wirnika wewnętrznego, lecz mniejszą prędkością, wynikającą z przełożenia przekładni magnetycznej. Analizując przepływ energii, można stwierdzić równoległe oddziaływanie dwóch maszyn elektrycznych sprzęgniętych za pomocą przekładni magnetycznej (rys. 11b). Należy zaznaczyć, że największy wpływ na transmisję energii w przetworniku ma I maszyna PM oraz przekładnia magnetyczna. Natomiast druga maszyna elektryczna ma wpływ na efektywność modulacji pola magnetycznego i może powodować osłabienie dominującej harmonicznej.



Rys. 11. Struktura maszyny MGPM a) oraz przepływ energii b)

W Politechnice Opolskiej podjęto również prace związane z konstrukcją przetwornika ze zintegrowaną przekładnią magnetyczną (rys. 12). Zbudowany model fizyczny przetwornika MGPM ma na celu wykonanie weryfikacji pomiarowej wyników otrzymanych z analizy numerycznej. W dalszej etapie badań planuje się prace związane z modelowaniem oraz optymalizacją konstrukcji przetwornika.



Rys. 11. Prototyp maszyny elektrycznej z zintegrowaną przekładnią magnetyczną o strukturze MGPM

Podsumowanie

Duży wzrost zainteresowania w ostatnich latach bezstykową transformacją momentu, dotyczy nie tylko ośrodków naukowo-badawczych, ale również przemysłu. W pierwszej części artykułu przedstawiono rozwój przekładni magnetycznych oraz aktualny stan zagadnienia. W kolejnej części zamieszczono przegląd prac dotyczących modelowania, optymalizacji konstrukcji i weryfikacji pomiarowej na obiektach fizycznych przekładni magnetycznych realizowanych w Katedrze Automatyk Napędów i Robotyki Politechniki Opolskiej. Omówiono szczegółowo analizę w ustalonych stanach pracy przekładni oraz modyfikacje obwodu magnetycznego MG, mające na celu sprawdzenie wpływu parametrów konstrukcyjnych na gęstość momentu przenoszonego. Na podstawie opisanej w pracy metodologii i oprogramowania można stwierdzić, że użyte narzędzia są wystarczające do analizy i projektowania nowoczesnych przekładni magnetycznych. Ciekawym

i ważnym aspektem analizowanym przez autorów jest analiza rozkładu sił lokalnych i ich wpływ na wytrzymałość konstrukcji oraz poziom hałasu. Podjęto analizę przekładni magnetycznych współosiowych o przełożeniu ułamkowym, o strumieniu promieniowym i osiowym. Omówiono modele dyskretne i fizyczne takich przekładni magnetycznych. Pokazano możliwość integracji przekładni magnetycznej z silnikiem elektrycznym i potencjalne zastosowanie jako bezpośredni napęd pojazdu. Hybrydowe przetworniki elektromagnetyczne z wbudowaną przekładnią magnetyczną są obecnie na etapie badań związanych z optymalizacją zaproponowanej konstrukcji. 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 hab. inż. Marcin Kowol, dr inż. Janusz Kołodziej, dr inż. Piotr Mynarek, 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, p.mynarek@po.opole.pl.

LITERATURA

- [1] Armstrong C.G., Power transmitting device, US Patent No. 687 292, (1901)
- [2] Faus H.T., Magnet gearing, US Patent No. 2 243 555, (1941)
- [3] Martin T.B., Magnetic transmission, US Patent No. 3 378710, (1968)
- [4] Laing N., Magnetic transmission, US Patent No. 3 645 650, (1972)

- [5] Ackermann B., Magnetic drive arrangement, US Patent No. 5 994 809, (1999)
- [6] Jorgensen F.T., Design and construction of permanent magnetic gears, Aalborg Universitet, (2010)
- [7] Atallah K., Howe D., A novel high performance magnetic gear, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, (2001), No. 4, 2844-2846
- [8] Kowol M., Przetwarzanie energii mechanicznej we współosiowej przekładni magnetycznej, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, (2021)
- [9] Kowol M., Łukaniszyn M., Budowa i zasada działania przekładni magnetycznej, *Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki, WZEE, Ustroń*, (2012) (Conf. CD – 25.pdf)
- [10] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pola magnetycznego w przekładni magnetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 100/3 (2013), Komel, 163-168
- [11] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pracy przekładni magnetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 104/4 (2014), Komel, 125-130
- [12] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Badania symulacyjne przekładni magnetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1, (2016), 96-101
- [13] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na pracę przekładni magnetycznej, *Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki, WZEE*, Kielce, (2015), 89-94
- [14] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Optymalizacja pasywnej przekładni magnetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2, (2017), 78-82
- [15] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Gabor R.: Analiza własności dynamicznych współosiowej przekładni magnetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, (2019), 246 - 249
- [16] Kowol M., Kołodziej J., Jagiela M., Łukaniszyn M.: Impact of modulator designs and materials on efficiency and losses in radial passive magnetic gear, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 34, (2019), No. 1, 147-154
- [17] Kowol, M., Kołodziej, J., Gabor, R., Łukaniszyn, M., Jagiela, M., On-Load Characteristics of Local and Global Forces in Co-Axial Magnetic Gear with Reference to Additively Manufactured Parts of Modulator, *Energies*, Vol. 13, (2020)
- [18] Kołodziej J., Kowol M., Mynarek P., Gabor R., and Łukaniszyn M., Forces in Axial Flux Magnetic Gears with Integer and Fractional Gear Ratios, *Energies*, Vol. 14, (2021), No. 4, 855
- [19] Constantinides S., De Leon, J., Permanent Magnet Materials and Current Challenges, *Arnold Magnetic Technologies* (2011)
- [20] Gardner M. C., Johnson M., and Toliyat H. A., Comparison of surface permanent magnet axial and radial flux coaxial magnetic gears, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 33, (2018) No. 4, 2250-2259
- [21] Gerber S., Wang R.-J., Design and Evaluation of a Magnetically Geared PM Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, (2015) Issue. 8
- [22] Wrobel, R., Mecrow, B. Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines – A Review, *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, (2019) Athens, Greece, 15-22
- [23] 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)* (2011), 995-1000
- [24] 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.*, (2011) 3982 -3989
- [25] Venturini M., Leonardi F., High torque, low speed joint actuator based on PM brushless motor and magnetic gearing, in *IEEE- IAS Annual Meeting*, (1993), 37-42
- [26] Zhu Z. Q., Overview of novel magnetically geared machines with partitioned stators, *IET Electric Power Applications*, Vol. 12, (2018), No. 5, 595-604
- [27] Niguchi N., Hirata K., Torque ripple analysis of a magnetic-g geared motor, in *Int. Conf. on Electr. Machines (ICEM)*, (2012) 789-794
- [28] Tlali P. M., Wang R., Gerber S., Magnetic gear technologies: a review, *International Conference on Electrical Machines*, (2014) 544-550