

Modelowanie charakterystyk pracy indukcyjnego przemiennika momentu

mgr inż. Arkadiusz Tomas
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

dr hab. inż. Tomasz Trawiński
Politechnika Śląska

Streszczenie:

W artykule przedstawiono przegląd rozwiązań przekładni magnetycznych. Zaprezentowano koncepcję indukcyjnego przemiennika momentu, który jest w założeniu przekładnią magnetyczną o zmiennym przełożeniu kinematycznym i dynamicznym, wykorzystującą do przeniesienia napędu zjawisko indukcji napięcia i momentu elektromagnetycznego w przewodniku w zmiennym polu magnetycznym. Łączy cechy przekładni magnetycznych z magnesami trwałymi, takie jak: tłumienie drgań, brak fizycznego styku pomiędzy elementami nadawczym i odbiorczym, cicha praca, z cechą hydrokinetycznego zmiennika momentu, czyli zmiennym przełożeniem kinematycznym i dynamicznym. Zaprezentowano model obwodowo-polewy i numeryczny przemiennika oraz wyznaczone charakterystyki pracy. Na podstawie charakterystyk pracy wariantów przemiennika przeprowadzono analizę możliwości jego zastosowania w napędach maszyn przerobczych.

Abstract:

The solutions of magnetic gears are reviewed. A concept of induction torque converter, which is a magnetic gear of variable kinematic and dynamic gear ratio, which uses the induction of voltage and electromagnetic torque in a conductor in a changeable magnetic field to transfer drive torque, is presented. It has the features of magnetic gear with permanent magnets such as suppression of vibrations, lack of physical contact between transmitting and receiving components, silent operation and the features of hydro-kinematic torque converter, i.e. variable kinematic and dynamic gear ratio. Circuit-and-field model and numerical model of converter as well as its operational characteristics are given. The possibilities of using the converter in drives of processing machines were analysed on the basis of operational characteristics of torque converter variants.

Słowa kluczowe: maszyny przerobcze, przekładnia magnetyczna, indukcyjny przemiennik momentu

Keywords: processing machines, magnetic gear, induction torque converter

1. Wstęp

Przekładnie magnetyczne to mechanizmy, w których do transmisji momentu obrotowego wykorzystywane są siły oddziaływań magnetycznych. Pierwsze koncepcje przekładni magnetycznych opracowano na początku ubiegłego wieku [14]. Stosowane w nich magnesy ferrytowe miały jednak ograniczenia. W porównaniu z innymi rodzajami przekładni, np. zębatymi, przenosiły niewielkie momenty obrotowe. Pod koniec lat 90-tych ubiegłego wieku, w celu zwiększenia zakresu przenoszonych momentów, w przekładniach magnetycznych zaczęto stosować magnesy neodymowe [7].

Przekładnie magnetyczne są ciche, nie występuje w nich tarcie pomiędzy elementami nadawczymi i odbiorczymi, nie wytwarzają ciepła związanego z tarciem, tłumią drgania oraz nie wymagają stosowania środków smarnych [8].

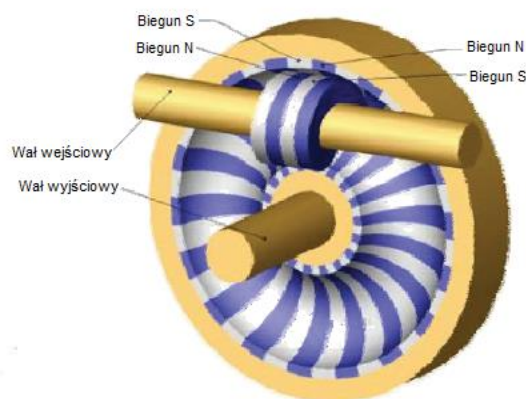
W ITG KOMAG podjęto prace nad szczególnym rodzajem przekładni magnetycznej, o zmiennym przełożeniu kinematycznym i dynamicznym – indukcyjnym przemiennikiem momentu obrotowego. Prowadzone prace mają na celu połączenie w jednym urządzeniu zalet przekładni magnetycznych z cechą hydrokinetycznego zmiennika momentu. Indukcyjny przemiennik momentu ma w założeniu znaleźć zastosowanie w napędach maszyn nierównomiernie obciążonych i narażonych na przeciążenia i rozruch pod obciążeniem.

2. Przegląd rozwiązań przekładni magnetycznych

Na przestrzeni kilkudziesięciu lat badań nad przekładniami magnetycznymi, powstało wiele koncepcji i rozwiązań tych mechanizmów. Analizując ich rozwiązania, można dokonać podziału ze względu na następujące kryteria [3, 8]:

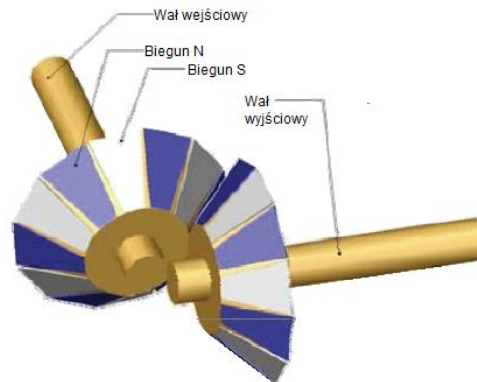
1. Sposób przeniesienia momentu obrotowego:
 - elektromagnetyczne:
 - zasilane elektrycznie,
 - bez zasilania,
 - z magnesami trwałymi (nazywane magnetycznymi, ang. magnetic gear):
 - z elementem pośrednim,
 - bezpośrednie.
2. Wzajemne ułożenie osi koła napędzającego i napędzanego:
 - współosiowe:
 - cykloidalne,
 - planetarne:
 - z kołami satelitarnymi,
 - z wirującym polem,
 - harmoniczne,
 - niewspółosiowe:
 - o osiach równoległych:
 - promieniowe,
 - czołowe,
 - koncentryczne,
 - o osiach nierównoległych:
 - ślimakowe,
 - kątowe.
3. Własności kinematyczne:
 - stałe przełożenie,
 - zmienne przełożenie.

Na rysunku 1 pokazano magnetyczną przekładnię ślimakową.



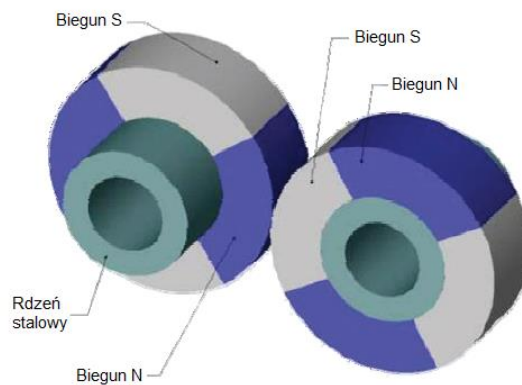
Rys. 1. Magnetyczna przekładnia ślimakowa [1]

Przekładnię tę można analizować jedynie teoretycznie, ze względu na trudności w uzyskaniu wymaganego kształtu i ułożenia biegunów magnetycznych. Wartość gęstości momentu obrotowego $g_m=2 \text{ Nm/dm}^3$ [1] jest wynikiem obliczeń teoretycznych.



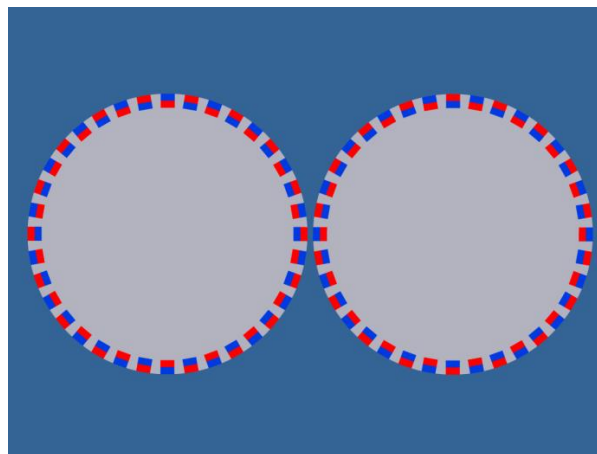
Rys. 2. Magnetyczna przekładnia kątowa [1]

Na rysunku 2 pokazano magnetyczną przekładnię kątową. Obliczona wartość gęstości momentu dla tej przekładni wynosi $g_m=5 \text{ Nm/dm}^3$ [1].



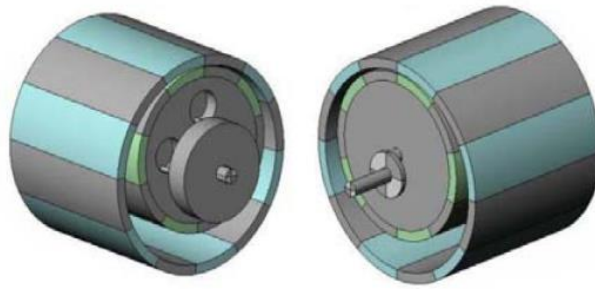
Rys. 3. Magnetyczna przekładnia promieniowa [1]

Kolejną analizowaną jest magnetyczna przekładnia promieniowa – rysunek 3. Teoretycznie obliczono wartość $g_m=7 \text{ Nm/dm}^3$ [1].



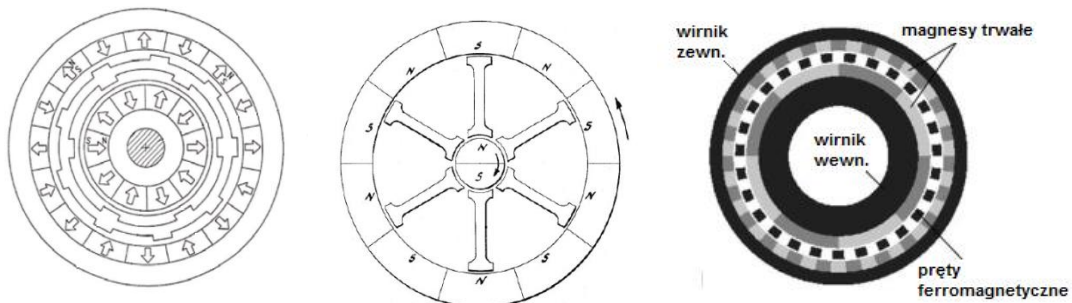
Rys. 4. Magnetyczna przekładnia czołowa. Źródło: opracowanie własne

Magnetyczną przekładnię czołową pokazano na rysunku 4. Doświadczalnie wyznaczony zakres wartości gęstości momentu obrotowego wynosi $g_m=(10-20) \text{ Nm/dm}^3$ [1].



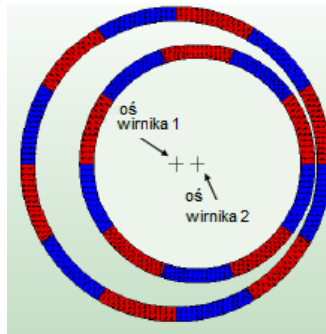
Rys. 5. Magnetyczna przekładnia cykloidalna 2-stopniowa, wysokie przełożenie [1]

Magnetyczna przekładnia cykloidalna (rys. 5), w wykonaniu 2-stopniowym, o wysokim przełożeniu, była budowana doświadczalnie. Uzyskano gęstość momentu obrotowego $g_m=75 \text{ Nm/dm}^3$ [1].



Rys. 6. Magnetyczna przekładnia planetarna [1]

Na rysunku 6 pokazano różne warianty przekładni magnetycznych planetarnych. Wartości g_m , uzyskiwane praktycznie, mieszczą się w zakresie $(45-90) \text{ Nm/dm}^3$ [1].



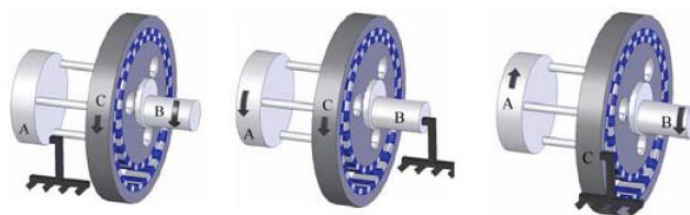
Rys. 7. Magnetyczna przekładnia koncentryczna 1-stopniowa, niskie przełożenie [1]

Schemat magnetycznej przekładni koncentrycznej 1-stopniowej, o niskim przełożeniu pokazano na rysunku 7. Przekładnie uzyskują wartości $g_m=(70-100) \text{ Nm/dm}^3$ [1].



Rys. 8. Magnetyczna przekładnia harmoniczna 1-stopniowa, niskie przełożenie [1]

Magnetyczna przekładnia harmoniczna (falowa), o 1 stopniu i niskim przełożeniu – rysunek 8, umożliwia uzyskanie gęstości momentu obrotowego, wynoszącej $g_m=110 \text{ Nm/dm}^3$ [1], zaś dla magnetycznej przekładni cykloidalnej 1-stopniowej, o niskim przełożeniu – rysunek 9, uzyskiwane wartości g_m mieszczą się w zakresie $140\text{-}290 \text{ Nm/dm}^3$ [1, 2].



Rys. 9. Magnetyczna przekładnia cykloidalna 1-stopniowa, niskie przełożenie [1]

Kryterium porównawczym dla przekładni magnetycznych jest gęstość momentu obrotowego (torque density), definiowana jako stosunek maksymalnego przenoszonego momentu przekładni, do jej objętości [15]. Kryterium nie precyzuje jednak, czy moment odnoszony jest do całkowitej objętości przekładni, opisującej ją bryły czy też jej części roboczej. W pracy [10] podano, że moment nie rośnie proporcjonalnie ze zmianą objętości. Gęstość momentu obrotowego może być zatem traktowana jako parametr porównawczy. Wymagane jest wprowadzenie nowej wielkości, dokładniej opisującej zależność transmitowanego momentu w zależności od wielkości przekładni (objętości, masy).

Przykładowo gęstość momentu obrotowego magnetycznej przekładni ślimakowej wynosi ok. 2 Nm/dm^3 , natomiast magnetycznej przekładni cykloidalnej ok. $140\text{-}290 \text{ Nm/dm}^3$. W tabeli 1 podano gęstości momentu obrotowego dla różnych przekładni magnetycznych [1, 2].

Gęstość momentu obrotowego dla różnych przekładni magnetycznych [1, 2]

Tabela 1

Lp.	Typ przekładni magnetycznej	Gęstość momentu obrotowego [Nm/dm^3]
1.	ślimakowa	2
2.	kątowa	5
3.	promieniowa	7
4.	czołowa	10-20
5.	cykloidalna 2-stopniowa (wysokie przełożenie)	75
6.	planetarna	45-90
7.	koncentryczna 1-stopniowa (niskie przełożenie)	70-100
8.	harmoniczna 1-stopniowa (niskie przełożenie)	110
9.	cykloidalna 1-stopniowa (niskie przełożenie)	140-290

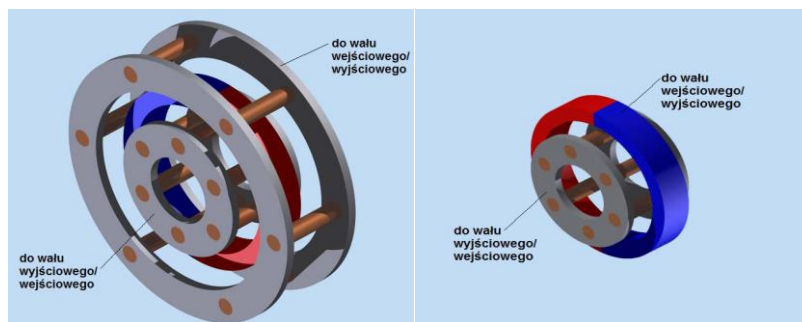
3. Koncepcja indukcyjnego przemiennika momentu

Indukcyjny przemiennik momentu jest w założeniu przekładnią magnetyczną o zmiennym przełożeniu kinematycznym i dynamicznym, wykorzystującą do przeniesienia napędu zjawisko indukcji napięcia w przewodniku w zmiennym polu magnetycznym. Łączy cechy przekładni

magnetycznych z magnesami trwałymi, takie jak: tłumienie drgań, brak fizycznego styku pomiędzy elementami nadawczym i odbiorczym, cicha praca, z cechą hydrokinetycznego zmiennika momentu, czyli zmiennym przełożeniem kinematycznym i dynamicznym.

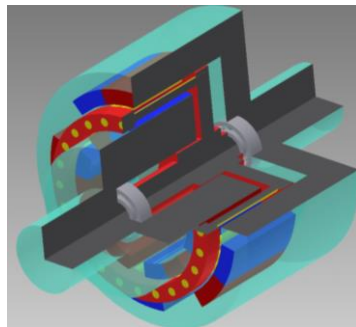
Przeziennik w układzie cylindrycznym, według pierwotnej koncepcji, składał się z co najmniej jednej klatki indukcyjnej i co najmniej jednego obwodu magnesów trwałych. Ruch magnesów trwałych wywołany zewnętrznym źródłem momentu obrotowego względem klatki, skutkowało powstaniem momentu elektromagnetycznego i ruchem obrotowym klatki. Jego zasada działania była analogiczna do silnika asynchronicznego, z tym że źródłem wirującego pola magnetycznego był wzajemny ruch obrotowy klatki i biegunów magnetycznych, wywołany podany na wejściu momentem obrotowym.

Koncepcję indukcyjnego przeziennika momentu w układzie cylindrycznym w wariantach: klatka indukcyjna/magnesy/klatka oraz magnesy/klatka pokazano na rysunku 10.

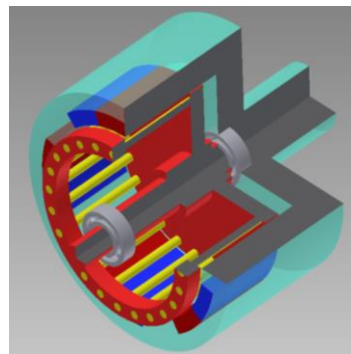


Rys.10. Koncepcja indukcyjnego przeziennika momentu w układzie cylindrycznym [3]

Utworzono model komputerowy wariantu z elementem pośrednim – rysunek 11 oraz wariantu bez elementu pośredniego – rysunek 12.

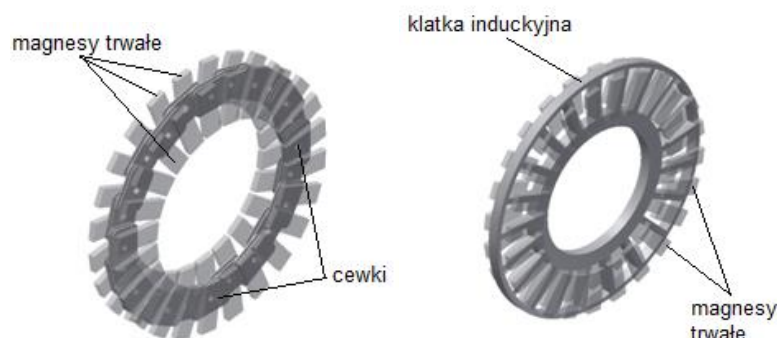


Rys. 11. Model przeziennika z elementem pośrednim – klatką indukcyjną [8]



Rys. 12. Model przeziennika w układzie bezpośrednim – magnesy/klatka indukcyjna [8]

Ze względu na złożoność modelu, ograniczenia sprzętowe i programowe, a także trudności z wykonaniem modelu fizycznego, podjęto decyzję o przejściu na układ tarczowy (rys. 13).



Rys. 13. Koncepcja indukcyjnego przemiennika momentu w układzie tarczowym [9]

W układzie tarczowym zasada działania jest taka sama jak w cylindrycznym, jednak magnesy rozmieszczono promieniowo, a element, w którym indukowane są napięcia, miał postać tarczowej klatki indukcyjnej lub rozłożonych po obwodzie cewek. Cewki lub klatka indukcyjna, umieszczone są pomiędzy magnesami trwałymi, ułożonymi na tarczach, sprzężonych mechanicznie.

4. Przemiennik z układem cewek indukcyjnych

W przeprowadzonych symulacjach przemiennika w układzie tarczowym z klatką indukcyjną, uzyskano zmienne przełożenie kinematyczne i dynamiczne, jednak przy niskich wartościach momentu obrotowego, dochodzących do 6,14 Nm [8]. Aby zwiększyć wartości przenoszonych momentów, podjęto decyzję o przejściu na układ z cewkami indukcyjnymi. W układzie takim rośnie długość przewodnika w polu magnetycznym w porównaniu do klatki indukcyjnej, co skutkuje wzrostem generowanego momentu elektromagnetycznego, to zaś przekłada się na wzrost przenoszonego przez przemiennik momentu obrotowego.

Indukcyjny przemiennik momentu służy do transmisji momentu obrotowego (bez bezpośredniego kontaktu mechanicznego części ruchomych) za pośrednictwem pola magnetycznego. Wykorzystuje on magnesy trwałe do generacji pola magnetycznego – tzw. pola wzbudzenia w jego szczelinie powietrznej. Układ magnesów trwałych (układ wzbudzenia) wprowadzony jest w ruch przez źródło napędu, zaś dostarczona energia mechaniczna przekształcana jest w energię wirującego pola magnetycznego. W szczelinie powietrznej przemiennika mogą znajdować się magnesy trwałe, uzwojenia lub inne pomocnicze elementy, które poprzez interakcję z polem wzbudzenia, dokonują kolejnej przemiany energii pola magnetycznego na energię mechaniczną, o innych parametrach niż energia mechaniczna dostarczana do przemiennika.

W przemienniku momentu z cewkami indukcyjnymi, o konstrukcji tarczowej, układ wzbudzenia pola magnetycznego uformowany został w postaci tarcz z magnesami trwałymi, pomiędzy którymi umieszczono tzw. układ odbierający. Układ odbierający, którego rolą jest wejście w interakcję z wirującym polem magnetycznym w szczelinie powietrznej i przetworzenie energii tego pola na energię mechaniczną, zbudowano w postaci uzwojeń (w formie cewek) formujących tarczę. Tarcze układu wzbudzenia i tarcza układu odbierającego tworzą pojedynczy moduł, o określonych parametrach maksymalnych (moc, moment, prędkości kątowe). Moduły można ze sobą łączyć, dostosowując parametry indukcyjnego przemiennika momentu do wymagań docelowego układu napędowego.

Konstrukcja tarczowa indukcyjnego przemiennika momentu, w wycinku obwodu magnetycznego ograniczonego do dwóch biegunów magnesu trwałego oraz przy ograniczeniu liczby uzwojeń układu odbierającego do jednej cewki, cechuje się pewnymi podobieństwami do tzw. silników VCM (stosowany powszechnie do napędu systemów pozycjonowania w pamięciach masowych – w dyskach twardych HDD) [11]. Moment elektromagnetyczny generowany przez układ pojedynczej cewki silnika VCM [11] można określić na podstawie następującej zależności:

$$T_e = NB(2r_l l + l^2)i \quad (1)$$

gdzie:

N – liczba zwojów cewki,

B – indukcja w szczelinie powietrznej,

r_l – promień od osi obrotu do początku cewki (dolnej części cewki),

l – długość boku cewki znajdująca się w obrysie magnesów trwałych,

i – natężenie prądu w cewce.

W przypadku silnika VCM na moment elektromagnetyczny możemy dodatkowo wpływać poprzez wymuszony przepływ prądu, w przypadku przemiennika momentu płynący prąd jest efektem indukowania się napięcia w uzwojeniach cewek, na skutek ruchu układu wzbudzenia (uzwojenia są zwarte). Ze względu na niewielki zakresu ruchu kąтового w typowych silnikach VCM (30-40 stopni) rozkład indukcji w szczelinie powietrznej przyjmuje się jako równomierny (wartości indukcji są takie same przy różnych położeniach kątowych uzwojenia).

Odmienna sytuacja występuje w indukcyjnym przemienniku momentu. Na obwodzie tarczy może się znaleźć kilka lub kilkanaście biegunów magnesu trwałego. Przyjęcie stałej wartości indukcji jest zatem błędne. Na podstawie zależności (1) można wstępnie oszacować wymiary geometryczne tarcz obwodu wzbudzenia – średnica tarcz będzie co najmniej równa sumie r_l i l . W obliczeniach należy uwzględnić rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej, w szczelinie powietrznej pomiędzy magnesami. Kierunek wektora B_z jest zgodny z osią „Z”, będącą osią obrotu tarcz przemiennika.

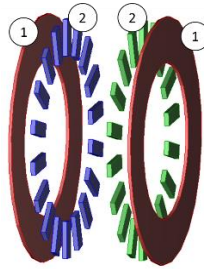
5. Procedura formułowania modelu matematycznego przemiennika

Model matematyczny przemiennika momentu tworzony jest w trzech etapach:

- w etapie pierwszym wyznaczone są rozkłady przestrzenne pola magnetycznego w szczelinie powietrznej przemiennika momentu; analiza polowa prowadzona jest tak, aby magnesy trwały pracowały w swoim optymalnym punkcie pracy (iloczyn natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej jest bliski maksymalnej gęstości energii magnesów); obliczane są uśrednione wartości indukcji, w objętości jednego boku cewki uzwojenia,
- w etapie drugim tworzony jest model matematyczny (model obwodowy), tarczy z uzwojeniami układu odbierającego; rozważane są – układ jedno-, dwu- i trójfazowy uzwojeń (uzwojenia nie są ze sobą połączone galwanicznie).
- w etapie trzecim tworzony jest model matematyczny integrujący wyniki obliczeń polowych z modelem obwodowym układu odbierającego.

Przedstawiony sposób postępowania pozwala na utworzenie modelu indukcyjnego przemiennika momentu do optymalizacji konstrukcji, bądź też analizy zjawisk cieplnych.

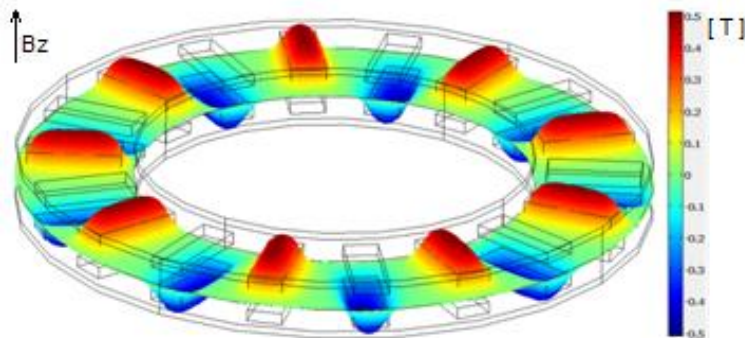
Przykładowa postać tarcz (elementy składowe tarcz zostały rozsunięte) układu wzbudzenia, utworzona w programie Comsol Multiphysics, przedstawiona została na rysunku 14.



Rys. 14. Pierścienie reprezentujące jarzma obwodu magnetycznego – (1), segmentowe magnesy trwałe – (2).
Źródło: opracowanie własne

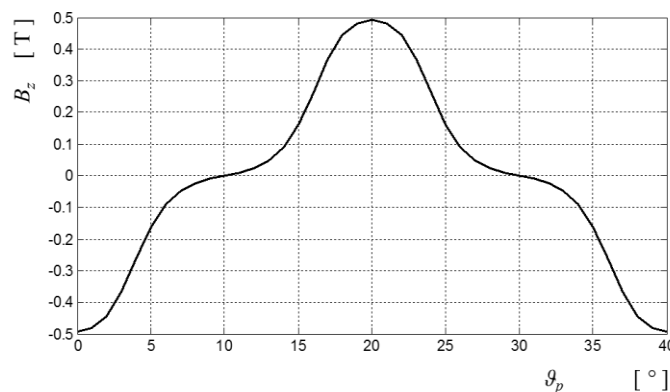
W pierwszej kolejności analizowano geometrię złożoną z 18 magnesów trwałych (wariant 1), rozłożonych równomiernie na obwodzie tarcz (pierścienie na rys.1). W obliczeniach polowych przyjęto neodymowe magnesy trwałe o wymiarach 5x15x40 mm, indukcji remanentu 1,2 T, wartości promienia r_1 90 mm i długości 140 mm. Szerokość szczeliny powietrznej wynosiła 10 mm, natomiast grubość pierścieni jarzm obwodu magnetycznego 3 mm. Model polowy składał się z 1006678 elementów skończonych, co, ze względu na przyjęte warunki brzegowe, skutkowało 173818 stopniami swobody. Rozkład przestrzenny indukcji w środku szczeliny powietrznej zaprezentowano na rysunku 15.

Maksymalne wartości indukcji wynosiły +/- 0,5 T.



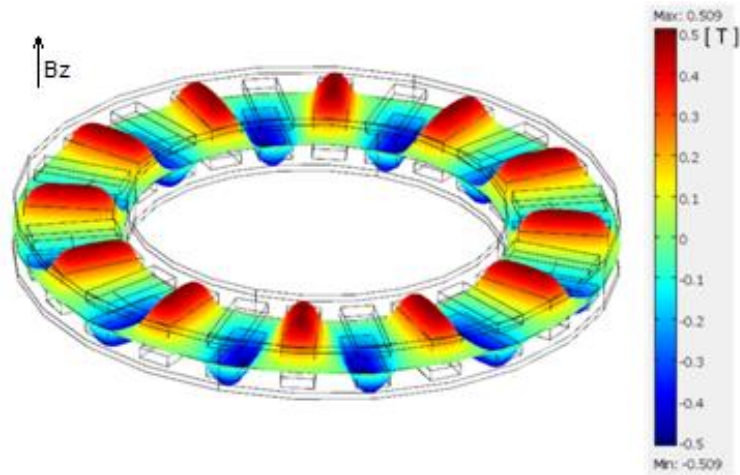
Rys. 15. Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej – 18 magnesów trwałych na obwodzie pojedynczej tarczy. Źródło: opracowanie własne

Rozkład przestrzenny składowej B_z indukcji w szczeliny powietrznej, w zakresie dwóch podziałek biegunowych, wzdłuż łuku o promieniu $r = r_1 + 1/2l$ przedstawiono na rysunku 16.



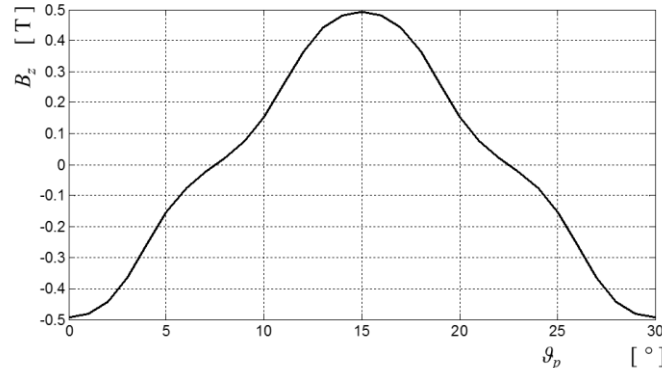
Rys. 16. Rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej w połowie długości magnesów trwałych, w obrębie dwóch podziałek biegunowych. Źródło: opracowanie własne

Następnie wykonano analizę wariantu 2, modelu zawierającego 24 magnesy trwałe na obwodzie tarcz układu wzbudzenia (wymiary geometryczne magnesów pozostały takie same). Model połowy składał się 1002330 elementów skończonych, o liczbie stopni swobody 173014. W tym przypadku indukcje maksymalne również sięgały +/- 0,5 T – rysunek 17.



Rys. 17. Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej – 24 magnesy trwałe na obwodzie pojedynczej tarczy. Źródło: opracowanie własne

Rozkład przestrzenny składowej B_z indukcji w szczelinie powietrznej, w zakresie dwóch podziałek biegunowych, wzdłuż łuku o promieniu $r = r_1 + 1/2l$ przedstawiono na rysunku 18.

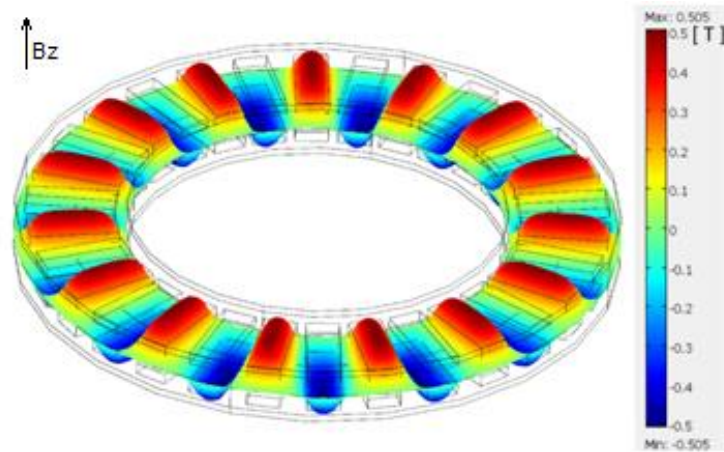


Rys. 18. Rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej w połowie długości magnesów trwałych, w obrębie dwóch podziałek biegunowych. Źródło: opracowanie własne

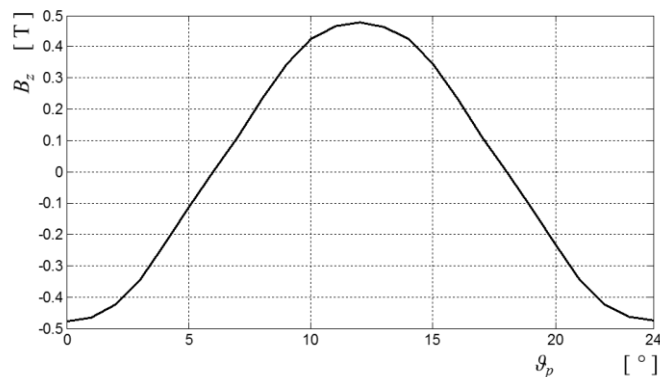
Dalsze zwiększanie liczby magnesów trwałych, do 30 (wariant 3), prowadziło do bardziej równomiernego rozkładu przestrzennego indukcji, a kształt składowej B_z indukcji w szczelinie powietrznej, w zakresie dwóch podziałek biegunowych, wzdłuż łuku o promieniu $r = r_1 + 1/2l$, był praktycznie sinusoidalny.

Wyniki analizy takiego wariantu modelu układu wzbudzenia przemiennika przedstawiono na rysunkach 19 i 20.

Badania numeryczne wykazały, że możliwe jest uzyskanie rozkładu przestrzennego indukcji w środku długości magnesów trwałych zbliżonego do sinusoidy, z zastosowaniem powszechnie dostępnych kształtów magnesów trwałych, do budowy układu wzbudzenia indukcyjnego przemiennika momentu.



Rys. 19. Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej – 30 magnesów trwałych na obwodzie pojedynczej tarczy. Źródło: opracowanie własne

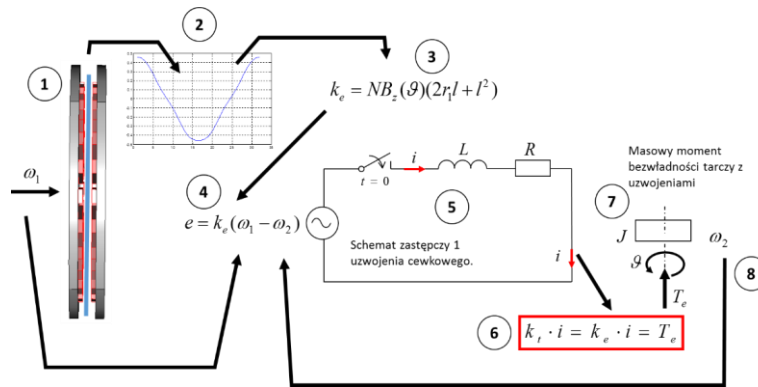


Rys. 20. Rozkład składowej B_z indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej w połowie długości magnesów trwałych, w obrębie dwóch podziałek biegunowych. Źródło: opracowanie własne

Ze względu na znaczne rozproszenie indukcji w obszarach obejmujących początki i końce magnesów, konieczne było uśrednienie rozkładu przestrzennego indukcji, w obszarze zajmowanym przez bok uzwojenia cewkowego.

Metodę wykorzystania obliczonych, uśrednionych rozkładów przestrzennych indukcji w modelu obwodowym indukcyjnego przemiennika momentu przedstawiono na rysunku 21. Założono, że układ odbierający składa się tylko z jednego uzwojenia cewkowego. Układ napędowy zewnętrzny napędza tarczę „1” układu wzbudzenia do prędkości kątowej ω_1 .

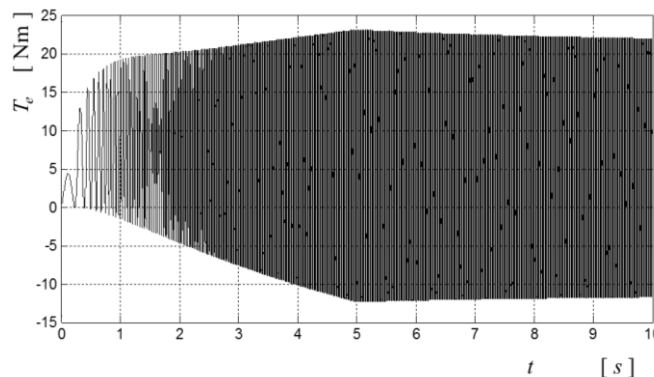
Obliczony i uśredniony rozkład przestrzenny indukcji „2” służy do obliczenia aktualnej wartości współczynnika napięcia indukowanego k_e „3”. Współczynnik napięcia kątowego, przemnożony przez różnicę prędkości kątowej układu wzbudzenia i układu odbierającego, pozwala na obliczenia napięcia indukowanego „4” w uzwojeniu cewkowym „5”. Uzwojenie cewkowe „5”, w postaci schematu złożonego z dwójnika R-L-e, jest zwarte, co powoduje przepływ prądu, który pomnożony przez współczynnik momentu k_t „6” (lub współczynnik napięcia indukowanego k_e), pozwala obliczyć moment działający na cewkę uzwojenia. Moment wprowadza w ruch tarczę układu odbierającego „7”. Prędkość kątowa tarczy układu odbierającego ω_2 „8” wprowadzona do równania, pozwala na obliczenie napięcia indukowanego „4”.



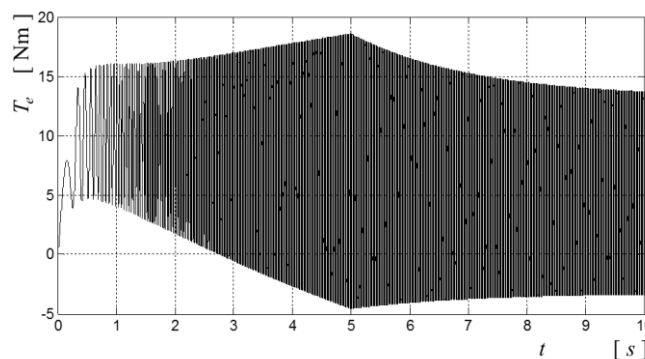
Rys. 21. Metoda wykorzystania obliczonych połowo uśrednionych rozkładów przestrzennych indukcji w modelu obwodowym indukcyjnego przemiennika momentu. Źródło: opracowanie własne

Celem sprawdzenia wpływu liczby cewek układu odbierającego oraz ich wzajemnego położenia przestrzennego na przebiegi chwilowe przenieszonego momentu, wykonano symulację rozruchu przemiennika, w którym układ odbierający złożony był kolejno z: jednej cewki, dwóch cewek (druga cewka była przemieszczona względem pierwszej o 1/3 podziałki biegunowej magnesów układu wzbudzenia) i trzech cewek (przemieszczonych względem siebie o 1/3 i 2/3 podziałki biegunowej magnesów układu wzbudzenia).

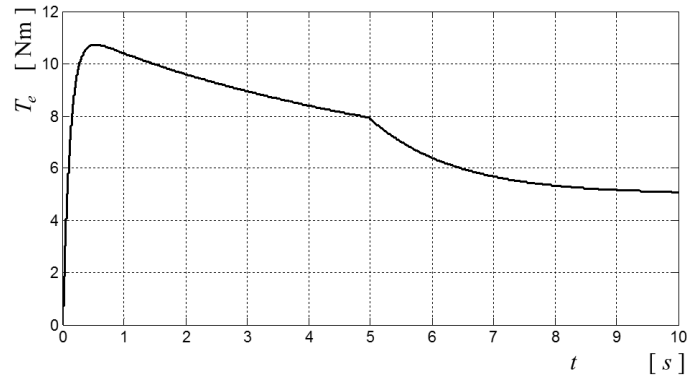
Założono, że napęd zewnętrzny napędza jednostajnie układ wzbudzenia, ze stałym przyspieszeniem kątowym, w ciągu 5 sekund do prędkości 50π rad/s, zaś przemiennik obciążony jest momentem o wartości 5 Nm. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 22-24.



Rys. 22. Przebieg chwilowy momentu indukcyjnego przemiennika momentu – jedna cewka. Źródło: opracowanie własne



Rys. 23. Przebieg chwilowy momentu indukcyjnego przemiennika momentu – dwie cewki. Źródło: opracowanie własne



Rys. 24. Przebieg chwilowy momentu indukcyjnego przemiennika momentu – trzy cewki.

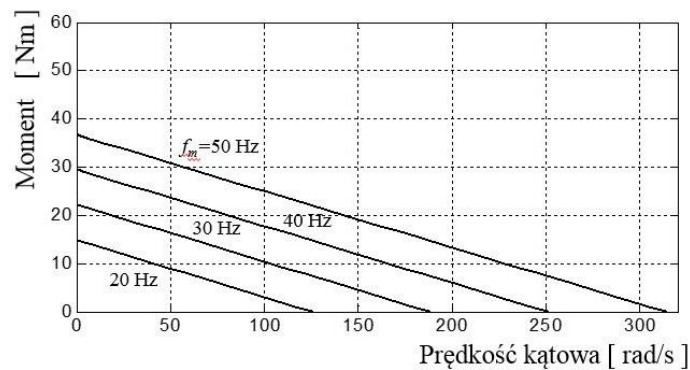
Źródło: opracowanie własne

Stwierdzono, że zastosowanie układu jednej cewki powoduje generację momentu o dużej składowej przemienniej. Wprowadzenie drugiej cewki powoduje złagodzenie składowej przemienniej, (amplituda ok. 5 Nm). Zastosowanie układu trzech cewek spowodowało wyeliminowanie składowej przemienniej. Na rysunku 24 widać nadwyżkę momentu potrzebnego do przyspieszenia mas bezwładnościowych oraz wartość momentu równą wartości momentu obciążającego (w stanie ustalonym).

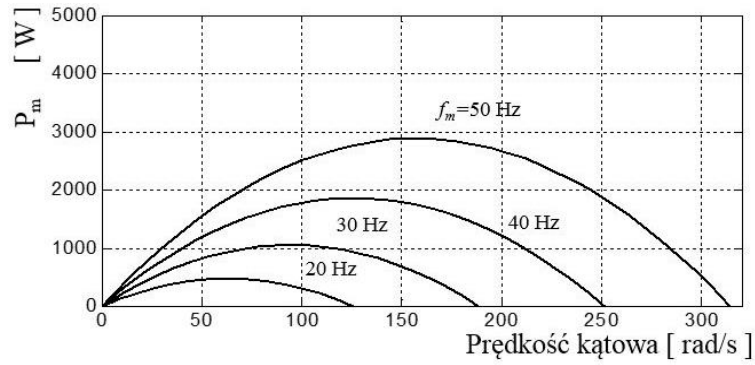
Celem prowadzonych symulacji komputerowych było również wyznaczenie charakterystyk ruchowych – moment obciążenia - prędkość obrotowa przemiennika, dla stałej prędkości kątowej tarcz układu wzbudzenia. Przyjęto zakres częstotliwości obrotowych tarcz układu wzbudzenia od 20 do 50 Hz, narastających do wartości maksymalnej w ciągu 1 sekundy, ze stałym przyspieszeniem. Na rysunkach 25 – 26 przedstawiono otrzymane dla indukcyjnego przemiennika momentu (wariant 1) charakterystyki:

- charakterystykę zewnętrzną przemiennika momentu (reprezentującą zmiany przenoszonego momentu przez element odbierający w funkcji prędkości obrotowej – rys. 25),
- charakterystykę mocy przenoszonej (w funkcji prędkości kątowej elementu odbierającego – rys. 26),
- charakterystykę strat w uzwojeniach elementu odbierającego – rys. 27.

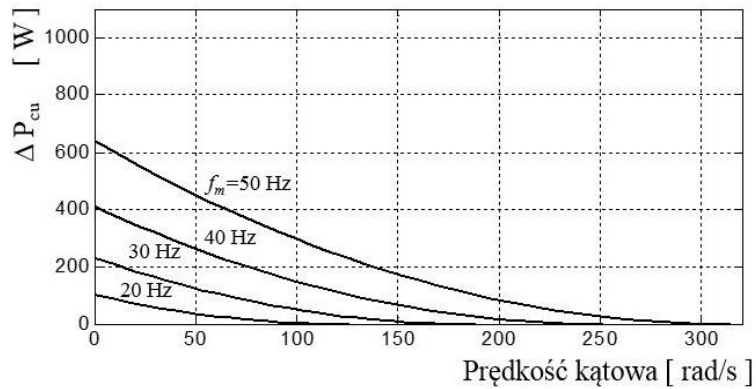
Ze względu na podobieństwo kształtów charakterystyk dla indukcyjnego przemiennika momentu, na rysunkach 28 – 30 przedstawiono charakterystyki dla przemiennika wykonanego według wariantu 2, zaś na rysunkach 31-33 dla wariantu 3.



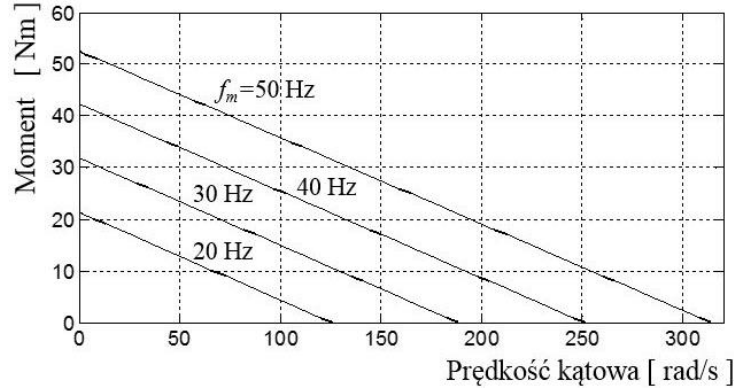
Rys. 25. Charakterystyki zewnętrzne przenoszony moment – prędkość kątowa przemiennika momentu (wariant 1), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



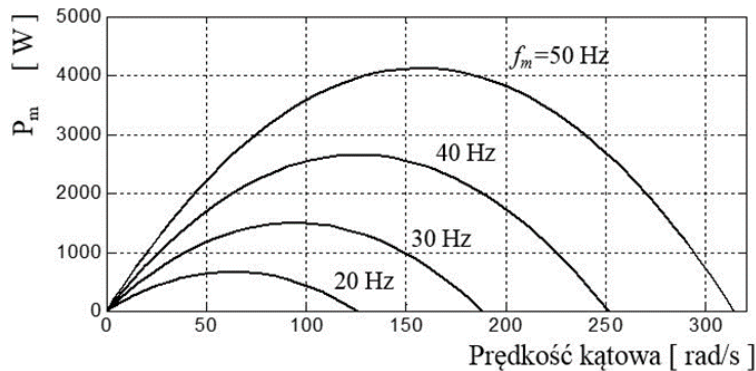
Rys. 26. Charakterystyki mocy przenoszonej w funkcji prędkości kątowej przemiennika momentu (wariant 1), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



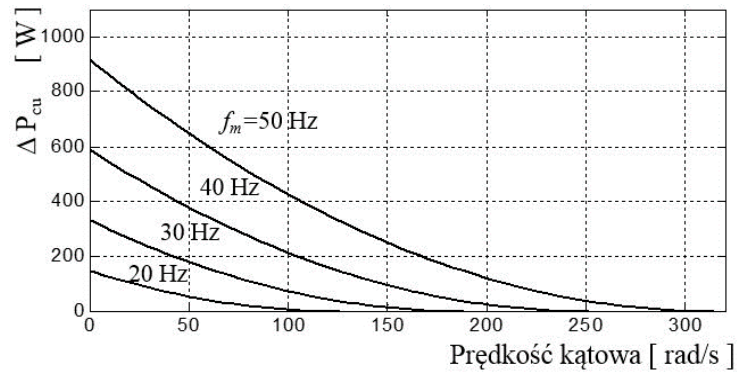
Rys. 27. Charakterystyki strat mocy w uzwojeniach przemiennika momentu (wariant 1), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



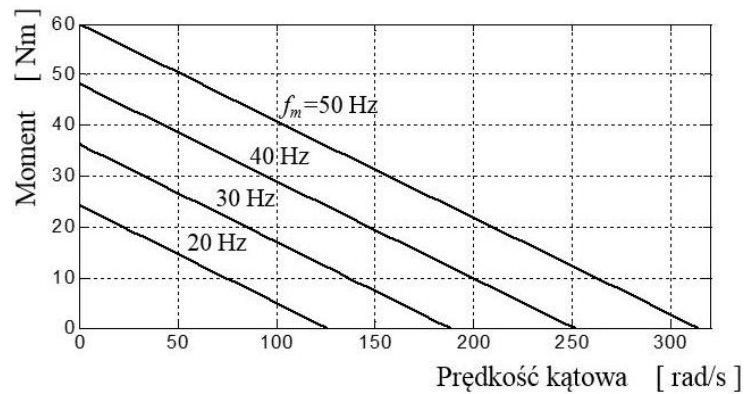
Rys. 28. Charakterystyki zewnętrzne przenoszony moment – prędkość kątowa przemiennika momentu (wariant 2), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



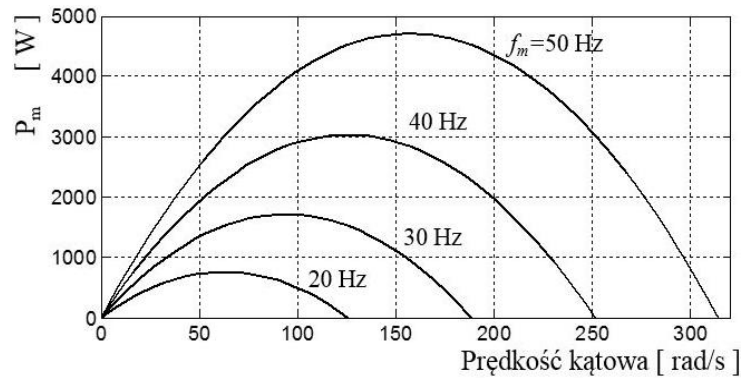
Rys. 29. Charakterystyki mocy przenoszonej w funkcji prędkości kątowej przemiennika momentu (wariant 2), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



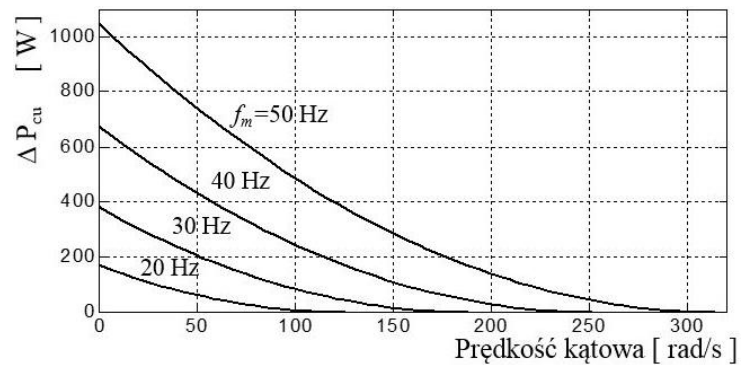
Rys. 30. Charakterystyki strat mocy w uzwojeniach przeniennika momentu (wariant 2), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



Rys. 31. Charakterystyki zewnętrzne przenoszony moment – prędkość kątowna przeniennika momentu (wariant 3), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



Rys. 32. Charakterystyki mocy przenoszonej w funkcji prędkości kątownej przeniennika momentu (wariant 3), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne



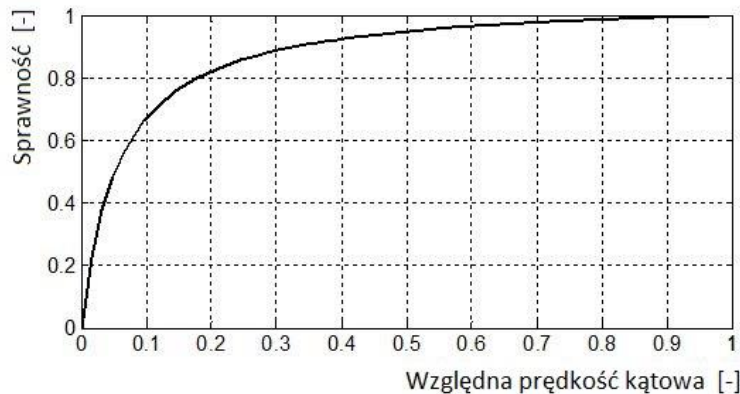
Rys. 33. Charakterystyki strat mocy w uzwojeniach przeniennika momentu (wariant 3), dla różnych częstotliwości obrotowych układu wzbudzenia. Źródło: opracowanie własne

Uzyskane charakterystyki wykazują liniową zależność przenoszonego momentu obrotowego od zadanej prędkości. Zależność prędkości wyjściowej i momentu obrotowego jest odwrotnie proporcjonalna.

Moc uzyskiwana na przemienniku jest również proporcjonalnie zależna od prędkości wejściowej, natomiast zależność mocy i uzyskiwanej prędkości wyjściowej ma kształt paraboli, z maksimum dla połowy wartości możliwej do uzyskania prędkości wyjściowej.

Największe straty występują przy rozruchu, wraz ze wzrostem prędkości wyjściowej maleją, zależność ta ma kształt hiperboli. Wartość strat jest również zależna od prędkości wejściowej, im większa jest jej wartość, tym proporcjonalnie większe straty.

Na rysunku 34 przedstawiono charakterystykę sprawności elektromagnetycznej przemiennika momentu, z uwzględnieniem strat mocy na rezystancji uzwojeń elementu pośredniczącego. Krzywa odnosi się do wszystkich analizowanych przypadków przemiennika momentu. Maksymalną sprawność osiągnięto dla przemiennika momentu obciążonego momentem wynoszącym połowę wartości momentu rozruchowego. Ze względu na nachylenie (i kształt charakterystyk zewnętrznych przemiennika momentu) punkt pracy, w którym przenoszona jest maksymalna moc, przypada w połowie prędkości kątowej elementu odbierającego. Sprawność elektromagnetyczna w tym punkcie wynosi $\eta \approx 0,947$.



Rys. 34. Wykres sprawności (bez uwzględnienia strat mocy mechanicznej) w funkcji względnej prędkości kątowej przemiennika momentu (wszystkie warianty). Źródło: opracowanie własne

Po uwzględnieniu szacowanych strat mechanicznych (tarcia w łożyskach, straty wentylacyjne etc.) ogólna sprawność będzie jednak mniejsza, powinna kształtować się na poziomie $\eta = 0.85$. Straty wentylacyjne i mechaniczne odnoszą się do przetworników elektromechanicznych o podobnych mocach nominalnych – porównywalnych do mocy maksymalnej przemiennika. Obliczona wstępnie wartość gęstości momentu obrotowego g_m mieści się w granicach 27-40 Nm/dm³.

6. Możliwości potencjalnego zastosowania przemiennika w napędach maszyn przeróbczych

Indukcyjny przemiennik momentu jest mechanizmem o ruchu obrotowym i może znaleźć zastosowanie w:

- kruszarkach walcowych, pierścieniowych UPK itp.,
- przenośnikach kubełkowych,
- wirówkach,
- mieszalnikach,
- wygarniaczach w klasyfikatorach.

Napędy wymienionych maszyn przeróbczych pracują przy zmiennych dynamicznie obciążeniach. Występują jednak sytuacje przeciążeń oraz zatrzymań wynikających z zablokowania elementów roboczych, np. przez ziarno nadmiarowe w kruszarce lub wygarniaczu klasyfikatora. Występują również rozruchy pod obciążeniem, kiedy nie ma możliwości opróżnienia przestrzeni roboczej maszyny.

Układy napędowe maszyn przeróbczych przyjmują różną postać:

- motoreduktora wraz ze sprzęgłem, stosowanego w kruszarkach laboratoryjnych, wygarniaczach,
- silnika elektrycznego ze sprzęgłem i przekładnią pasową, stosowanego w kruszarkach UPK, mieszalnikach i wirówkach,
- silnika elektrycznego ze sprzęgłem i przekładnią łańcuchową, stosowanego w przenośnikach kubełkowych.

Korzystną cechą przemiennika, wynikającą z jego charakterystyki pracy jest wysoki moment obrotowy, generowany w tarczy odbierającej przy rozruchu i przy niskich obrotach części odbierającej. Zastosowanie przemiennika powinno zatem ułatwić rozruch maszyn obciążonych, takich jak kruszarki, wirówki czy przenośniki kubełkowe.

Istotną cechą przemiennika, wynikającą z jego budowy, jest również możliwość pracy napędu w przypadku blokady elementów roboczych odbiornika. Przy zablokowaniu i zatrzymaniu np. walców kruszarki, tarcza z cewkami zatrzyma się, natomiast tarcza nadawcza z magnesami, połączona mechanicznie z napędem, będzie wirować ze stałą prędkością, ponieważ nie ma mechanicznego połączenia z tarczą odbiorczą. Dodatkowo, co wynika z charakterystyki przemiennika, wzrośnie do maksimum moment generowany na tarczy odbiorczej. Konieczne będzie jednak zapewnienie odpowiedniego chłodzenia, ponieważ w tym punkcie charakterystyki generowane są największe straty (energia wydzielana jest w postaci ciepła na uzwojeniu cewek tarczy odbierającej).

Potencjalnie najmniejsze korzyści z zastosowania w napędzie indukcyjnego przemiennika momentu uzyskałyby przesiewacze i podajniki wibracyjne. W urządzeniach tych napęd bezwładnościowy nie jest bezpośrednio (mechanicznie) połączony z elementami roboczymi, a więc nie ma możliwości jego przeciążenia czy zablokowania.

Korzystna dla większości maszyn przeróbczych, a więc kruszarek, wirówek, przenośników kubełkowych oraz wygarnaczy w klasyfikatorach jest natomiast zdolność tłumienia drgań przez przemiennik, wynikająca z braku mechanicznego połączenia pomiędzy tarczą nadawczą i odbiorczą oraz z tłumiącego charakteru oddziaływań magnetycznych.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję przemiennika momentu obrotowego, wykorzystującego pole magnetyczne magnesów trwałych i zjawisko indukcji elektromagnetycznej do przeniesienia momentu obrotowego. Przemiennik ma zmienne przełożenie dynamiczne i kinetyczne. Zaprezentowano modele: polowo-obwodowy oraz model matematyczny przemiennika. W modelu matematycznym uwzględniono wartości indukcji z obliczeń polowych. Model może służyć do zadań optymalizacyjnych. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych pracy przemiennika oraz pokazano charakterystyki jego pracy. Pozwalają one na sformułowanie następujących wniosków:

- przenoszony moment przemiennika zależy zarówno od prędkości wejściowej, jak i wyjściowej; wzrost prędkości wejściowej powoduje proporcjonalny wzrost przenoszonego momentu; wraz ze wzrostem prędkości wyjściowej maleje liniowo moment obrotowy,

- przenoszona przez przemiennik moc (ze źródła napędu) zależy od prędkości wejściowej (wzbudzenia) oraz prędkości wyjściowej; wraz ze wzrostem prędkości wejściowej przenoszona moc liniowo rośnie; zależność przenoszonej mocy od prędkości wyjściowej przyjmuje postać paraboli, z maksimum dla połowy możliwej do uzyskania prędkości wyjściowej,
- maksymalne straty występują dla zerowej prędkości elementu odbierającego - ze wzrostem jego prędkości maleją.

Zmienne przełożenie dynamiczne może być korzystne w napędach nierównomiernie obciążonych maszyn: takich jak np. kruszarki, wirówki, mieszalniki. Korzystną cechą wydaje się być również zdolność tłumienia drgań. Istotna jest cecha pozwalająca na pracę napędu nawet w przypadku zablokowania elementów odbiornika (np. walców w kruszarce walcowej).

Planowane są badania przemiennika połączonego w szeregowy łańcuch kinematyczny, razem z silnikiem i układem odbiorczym maszyny, z zastosowaniem modeli dynamicznych różnych maszyn roboczych, takich jak kruszarka, przenośnik kubelkowy, wirówka. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych wymagają weryfikacji w badaniach doświadczalnych na obiektach rzeczywistych.

Istotnym aspektem będzie także optymalizacja przemiennika pod kątem zwiększenia wartości gęstości przenoszonego momentu obrotowego, co może wpływać na zmniejszenie gabarytów przemiennika.

Literatura

- [1] Hatch G. P.: Recent Developments In Permanent Magnet Gear Systems & Machines. W: Magnetics 2010 Conference, Lake Buena Vista, Florida, USA, January 2010 via terramagnetica.com
- [2] Li X., Chau K.-T., Cheng M., Hua W.: Comparison of magnetic-g geared permanent-magnet machines. Progress In Electromagnetics Research 2013, vol. 133, p.177-198.
- [3] Mężyk A., Tomas A.: Przekładnie magnetyczne - nowa jakość w transmisji momentu obrotowego. Przegląd Mechaniczny 2013, nr 10, s. 40-44.
- [4] Mitamura Y., Mori Y.: Magnetic Fluid-Driven Artificial Hearts. W: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006, August 27 - September 1, Seoul, Korea, IFMBE Proceedings, 2007, vol 14, s. 4149-4152.
- [5] Ostberg B. N., Ostberg G. N.: Total artificial heart design with integrated electric motor. Medical & Biological Engineering & Computing 1987, vol. 25 (3), p. 345-346.
- [6] Pilch Z., Burlikowski W., Trawiński T., Kluszczynski K.: Operation fundamentals of the electromagnetic torque generator part II – Design process. W: Technical and Economic Aspect of Modern Technology Transfer in Context of Integration with European Union, Košice, 2004. Vol. 2. Košice: Mercury-Smékal Publ. House, 2004, s. 261-265.
- [7] Trout S. R.: Permanent magnets based on the lanthanides Raw Materials (online), Processing and Properties via www.spontaneousmaterials.com/Papers/Koreapaper.pdf
- [8] Tomas A.: Indukcyjny przemiennik momentu - koncepcja i badania symulacyjne. Maszyny Górnicze 2014, nr 3, s. 11-18.
- [9] Tomas A.: Badania symulacyjne indukcyjnego przemiennika momentu. Prezentacja z seminarium KOMAG, maj 2015, Gliwice.
- [10] Tomas A., Matusiak P., Bal M.: Nowe rozwiązanie sprzęgła magnetycznego przeciążeniowego zmiennie-obrotowego. ITG KOMAG Gliwice 2011 (materiały niepublikowane).

- [11] Trawiński T., Kluszczyński K., Kołton W.: Lumped parameter model of double armature VCM motor for head positioning system of mass storage devices. *Przegląd Elektrotechniczny* 2011, nr 12b, s.184-187.
- [12] Trawiński T., Pilch Z., Burlikowski W., Kluszczyński K.: Operation fundamentals of the electromagnetic torque generator part I - Properties of the pulsating torque. W: *Technical and Economic Aspect of Modern Technology Transfer in Context of Integration with European Union*, Košice, 2004. Vol. 2. Košice: Mercury-Smékal Publ. House, 2004, s. 255-260.
- [13] Trawiński T., Kluszczyński K.: Symbolic calculations - tool for fast analyzing poliharmonic models of squirrel-cage motors. *Prace Instytutu Elektrotechniki* 2003, z. 216, s. 117-129.
- [14] Armstrong C.G. Power transmitting device. USA. Opis patentowy 687292. Opubl. 1901.
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Torque_density.

Czy wiesz, że

... w przyszłym roku spółka PD Co chce złożyć wniosek o koncesję wydobywczą, a w 2023 roku rozpocząć wydobywanie w nowej kopalni węgla kamiennego na Lubelszczyźnie. Inwestycja ma kosztować 631,7 mln dolarów. Kopalnia, nazywająca się Jan Karcki, będzie zlokalizowana w pobliżu miejscowości Kulik w gminie Siedliszcze – poinformowali przedstawiciele PD Co, spółki zależnej od australijskiego koncernu wydobywczego Prairie Mining. Kopalnia ma szansę stać się najbardziej efektywnym zakładem górniczym w Europie, nie będzie konkurować z innymi kopalniami węgla na polskim rynku, ponieważ wydobywany w niej węgiel ma być kierowany na eksport.

Rzeczpospolita 2016 17 maja s.B11