

# Możliwość zastosowania magnesów neodymowych w sprzęgłach maszyn i urządzeń

dr inż. Piotr Dobrzaniecki  
dr inż. Marek Kalita  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

## Possibility of using the neodymium magnets in machines and equipment clutches

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych, zrealizowanych w ITG KOMAG, dotyczących wykorzystania magnesów neodymowych w sprzęgłach. Opiszano przebieg badań trzech wariantów sprzęgła magnetycznego, wytworzonego techniką druku 3D. Omówiono uzyskane wyniki, sformułowano wnioski oraz kierunki dalszych prac badawczych.

### Abstract:

The results of research projects on using the neodymium magnets in clutches realized in KOMAG are presented. Testing procedure of three variants of magnetic clutch obtained by additive manufacturing technology (3D printing) is described. The results are analysed and conclusions regarding the direction of further projects are formulated.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, budowa i eksploatacja maszyn, sprzęgło magnetyczne, magnes neodymowy

Keywords: mechanical engineering, machines design and operation, magnetic clutch, neodymium magnet

## 1. Wprowadzenie

Sprzęgła stosowane w maszynach i urządzeniach, opierają się o zasadę działania o wzajemne oddziaływanie pomiędzy dwoma elementami konstrukcji. Przeniesienie momentu obrotowego w sprzęgłach maszyn i urządzeń realizowane jest zazwyczaj poprzez: połączenie kształtowe, siły tarcia, zjawiska hydrokinetyczne oraz elektromagnetyczne [1, 2]. Stosowane są sprzęgła z magnesami trwałymi, np. w miejscach, gdzie zasadnicze znaczenie ma hermetyczne rozdzielanie przestrzeni, w których pracują półowki sprzęgła. Sprzęgła magnetyczne występują zarówno w wariacie doczołowym, jak i koncentrycznym. Jako przykład mogą tu posłużyć rozwiązania firm Tridelta Magnetsysteme, Grim [7] oraz KTR [6]. Producenci sprzęgieł magnetycznych deklarują przenoszenie momentu obrotowego o wartości od 0,1 Nm do 1000 Nm [6, 7]. Sprzęgła magnetyczne znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w mieszalnikach, pompach próżniowych czy ekstruderach oraz w układach przeciążeniowych i miękkiego rozruchu [6, 7]. Ponieważ autorzy nie znaleźli zastosowania tego typu sprzęgieł w konstrukcjach maszyn i urządzeń górniczych, w ITG KOMAG podjęto prace badawcze, mające na celu opracowanie dedykowanych do nich rozwiązań. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki dotychczasowych prac projektowych i badawczych, dotyczących zastosowania magnesów w konstrukcji sprzęgła, w tym magnesów neodymowych. W oparciu o dostępne na rynku rozwiązania magnesów neodymowych, opracowano i poddano badaniom trzy warianty sprzęgła magnetycznego, wytworzone techniką druku 3D.

## 2. Modele badawcze sprzęgieł magnetycznych

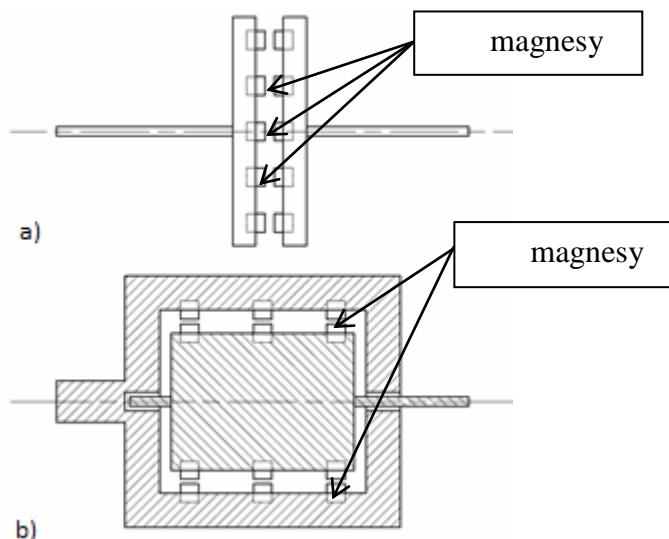
Bardzo dobre własności magnetyczne spieków neodymowych, skutkujące dużymi siłami oddziaływania pomiędzy parami magnesów, umożliwiają zastosowanie ich w konstrukcjach sprzęgieł lub hamulców. W ramach prac rozwojowych, opracowano w ITG KOMAG, dwie koncepcje sprzęgieł, w których siła oporu, pozwalająca przenosić moment obrotowy, wytwarzana jest przez pary magnetyczne. Do budowy badawczych egzemplarzy sprzęgieł zastosowano magnesy neodymowe w postaci sześciątów o długości boku 10 mm. Podstawowe parametry magnesu MPŁ 10x10x10 zestawiono w tabeli 1.

**Podstawowe parametry magnesu MPŁ 10x10x10 [4, 5]**

Tabela 1

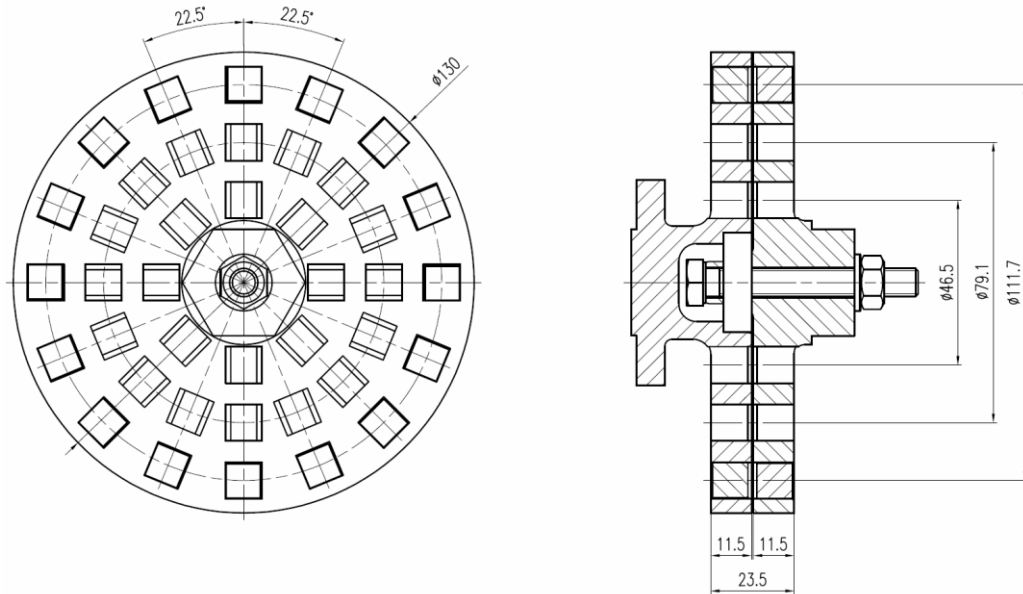
Długość boku sześciangu	10 mm
Siła oderwania	46,6 N
Odporność cieplna	80°C
Powłoka ochronna	nikiel

Opracowane koncepcje rozwiązań sprzęgieł przedstawiono na rysunku 1. Konstrukcja doczołowa składa się z dwóch tarcz, z których jedna jest połączona z wałem czynnym, natomiast druga z wałem biernym. Elementy czynne (magnesy) związane z powierzchnią czołową tarcz, oddziałują pomiędzy sobą, generując siłę oporu. W konstrukcji koncentrycznej sprzęgło składa się z wirnika oraz obudowy, połączonych z wałkami – czynnym i biernym. W tym przypadku magnesy zabudowano na średnicy wewnętrznej obudowy oraz na średnicy zewnętrznej wirnika.

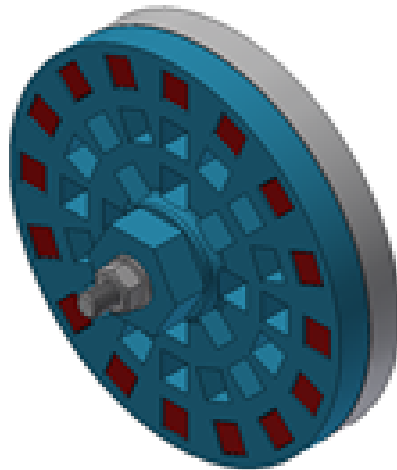


Rys. 1. Koncepcje sprzęgła magnetycznego: a) doczołowego, b) koncentrycznego [opracowanie własne]

Opracowane rozwiązanie sprzęgła doczołowego umożliwia zabudowę magnesów na obydwu tarczach na trzech średnicach. Możliwość zmiany średnicy zabudowy magnesów umożliwiają gniazda rozmieszczone na średnicach:  $\varnothing 46,5$  mm,  $\varnothing 79,1$  mm oraz  $\varnothing 111,7$  mm. Podstawowe wymiary sprzęgła doczołowego przedstawiono na rysunku 2. Model przestrzenny sprzęgła wykonany w środowisku oprogramowania Autodesk Inventor przedstawiono na rysunku 3.

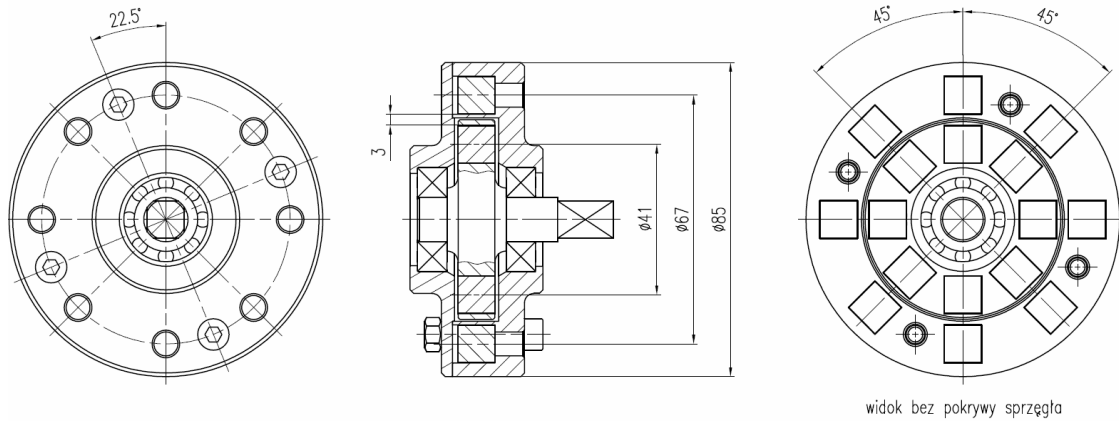


Rys. 2. Sprzęgło magnetyczne doczołowe [3]



Rys. 3. Model przestrzenny magnetycznego sprzęgła doczołowego [3]

W ramach prac badawczych wykonano również projekt jednorzędowego, magnetycznego sprzęgła koncentrycznego. Wirnik wraz z wałem napędowym, zabudowano wewnątrz stojana i pokrywy, z zastosowaniem łożysk kulkowych. Pokrywę sprzęgła połączono ze stojanem za pomocą śrub i nakrętek. Podstawowe wymiary sprzęgła koncentrycznego przedstawiono na rysunku 4, a jego model przestrzenny na rysunku 5.

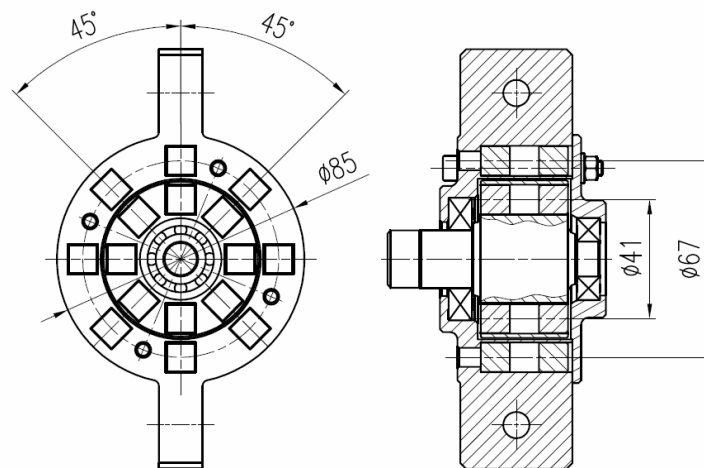


Rys. 4. Jednorzędowe magnetyczne sprzęgło koncentryczne [3]



Rys. 5. Model przestrzenny jednorzędowego magnetycznego sprzęgła koncentrycznego [3]

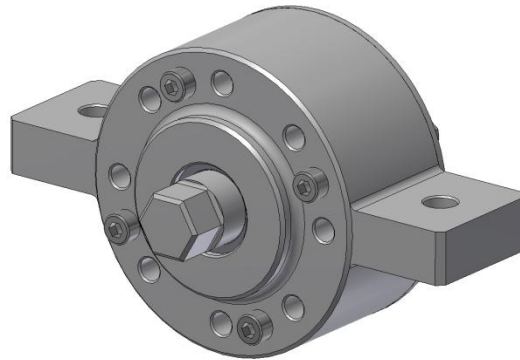
W wyniku analizy rozwiązań wariantów doczołowego i koncentrycznego, opracowano kolejne rozwiązanie sprzęgła koncentrycznego dwurzędowego, które pozwala na zabudowę w wirniku i stojanie dwukrotnie większej liczby magnesów, rozmieszczonych w dwóch rzędach. Podstawowe wymiary sprzęgła przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Dwurzędowe magnetyczne sprzęgło koncentryczne [3]

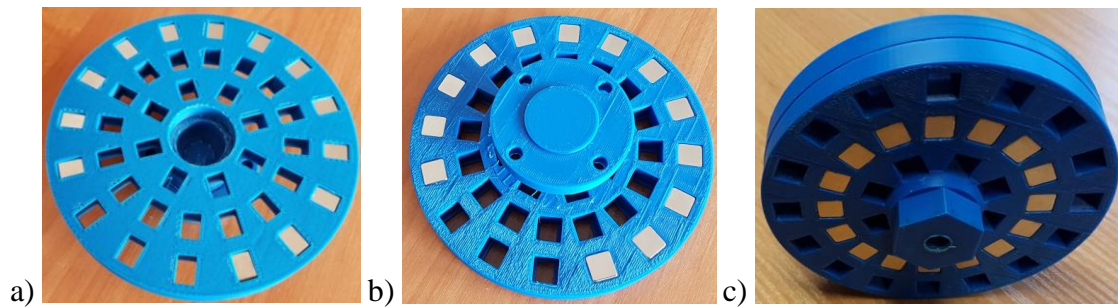
Stojan w dwurzędowej wersji sprzęgła wyposażono w ucha mocujące, służące do unieruchomienia konstrukcji w trakcie badań na hamowni. W niniejszym sprzęgle, podobnie jak w jego jednorzędowym wariantcie, na łożyskach zabudowano wirnik, a całość zamknięto

pokrywą identyczną jak w przypadku sprzęgła jednorzędowego, mocowaną za pomocą śrub i nakrętek (rys. 7).

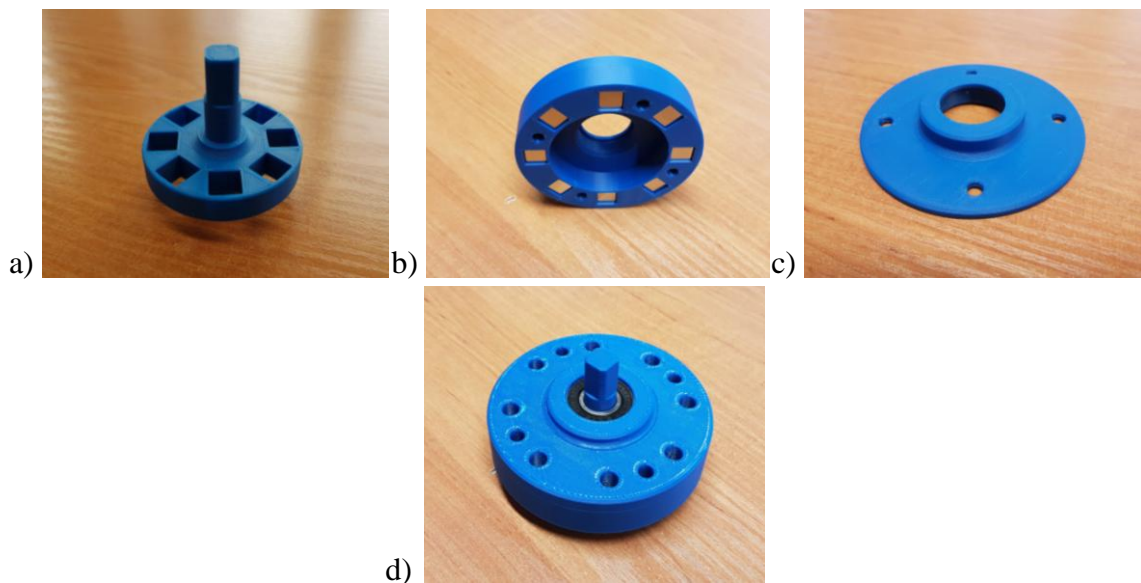


Rys. 7. Model przestrzenny dwurzędowego magnetycznego sprzęgła koncentrycznego [3]

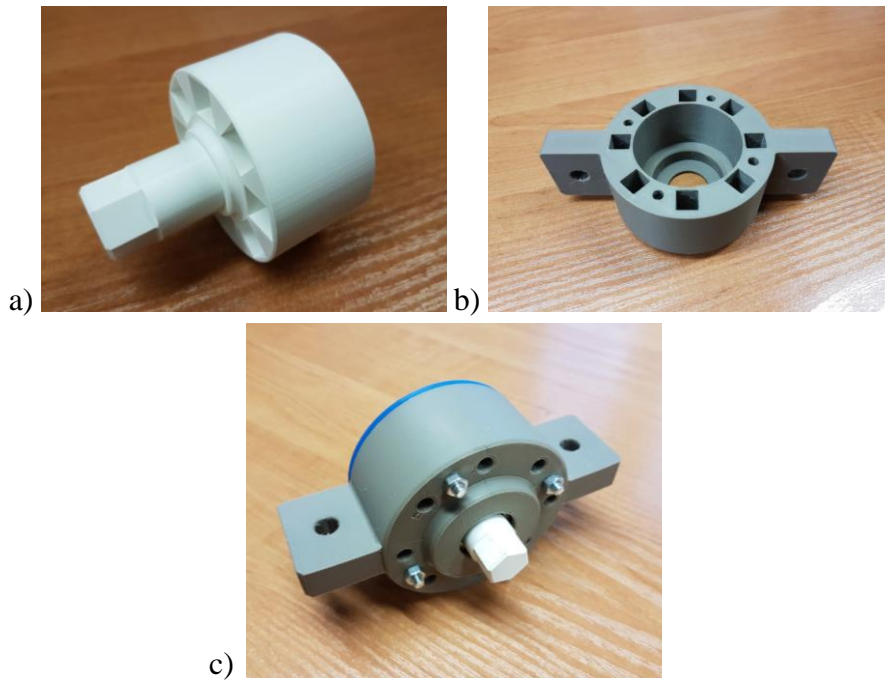
Opracowane z pomocą oprogramowania Autodesk Inventor modele przestrzenne sprzęgieł umożliwiły wykonanie egzemplarzy badawczych techniką druku 3D. Na rysunku 8 pokazano model badawczy sprzęgła doczołowego, na rysunku 9 zobrazowano podzespoły i model badawczy sprzęgła koncentrycznego jednorzędowego, a na rysunku 10 model badawczy dwurzędowego sprzęgła koncentrycznego.



Rys. 8. Model badawczy sprzęgła doczołowego: a) tarcza 1, b) tarcza 2, c) sprzęgło zmontowane [3]



Rys. 9. Model badawczy magnetycznego sprzęgła koncentrycznego jednorzędowego: a) wirnik, b) stojan, c) pokrywa, d) sprzęgło zmontowane [3]

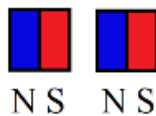


Rys. 10. Model badawczy dwurzędowego magnetycznego sprzęgła koncentrycznego (wariant 3):  
a) wirnik, b) stojan, c) sprzęgło zmontowane [3]

Ze względu na występujący w trakcie stygnięcia skurcz materiału wydrukowanego modelu, wykonano kilka wydruków próbnych, z korektą modeli przestrzennych. Pozwoliło to na dobór właściwych odchylek wymiarowych pod zabudowę magnesów i łożysk. Do wykonania wydruków elementów sprzęgła zastosowano materiał Z-ABS, o średnich wartościach twardości i udarności [8]. Wirnik sprzęgła dwurzędowego, ze względu na spodziewane, wyższe wartości momentu obrotowego, wydrukowano ze zwiększonym stopniem wypełnienia.

### 3. Badania sprzęgieł

Wydrukowane podzespoły sprzęgła, po zmontowaniu, poddano próbom statycznym, w celu określenia granicznych wartości przenoszonego momentu obrotowego. W przypadku sprzęgła doczołowego wszystkie pary magnesów ustawiono tak, jak pokazano na rysunku 11.



Rys. 11. Sposób ustawienia magnesów w sprzęgle doczołowym

Wyniki pomiarów momentu obrotowego (oporu) sprzęgła doczołowego z magnesami zabudowanymi na średnicy  $\varnothing 79,1$  mm, przedstawiono w tabeli 2, a dla średnicy  $\varnothing 111,7$  mm – w tabeli 3.

**Wartości momentu obrotowego sprzęgła doczołowego dla magnesów zabudowanych na średnicy  $\varnothing$  79,1 mm**

Tabela 2

Rozkład magnesów na obwodzie tarczy	Wartość momentu oporu [Nm]
co 180°	0,44
co 90°	0,90
co 45°	1,21
co 22,5°	1,60

**Wartości momentu obrotowego sprzęgła doczołowego dla magnesów zabudowanych na średnicy  $\varnothing$  111,7 mm**







Tabela 3

Rozkład magnesów na obwodzie tarczy	Wartość momentu oporu [Nm]
co 180°	0,54
co 90°	1,10
co 45°	2,35
co 22,5°	5,88

W tabelach 4, 5 i 6 zestawiono wyniki pomiarów momentu obrotowego (oporu) jednorzędowego sprzęgła koncentrycznego, przy różnym sposobie zabudowy par magnesów.







**Wartości momentu obrotowego jednorzędowego sprzęgła koncentrycznego przy ułożeniu magnesów S-N**

Tabela 4

Rozkład magnesów na obwodzie stojana	Rozkład magnesów na obwodzie wirnika	Sposób ułożenia magnesów	Wartość momentu oporu [Nm]
jednostkowy (1 magnes w stojanie)	jednostkowy (1 magnes w wirniku)	 NS NS	0,20
co 45°	co 90°	 NS NS	0,65
co 45°	co 180°	 NS NS	0,29
co 90°	co 180°	 NS NS	0,40
co 90°	co 90°	 NS NS	0,79
co 45°	co 45°	 NS NS	1,25

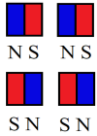
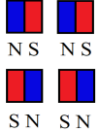
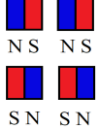
**Wartości momentu obrotowego jednorzędowego sprzęgła koncentrycznego przy ułożeniu magnesów S-S**

Tabela 5

Rozkład magnesów na obwodzie stojana	Rozkład magnesów na obwodzie wirnika	Sposób ułożenia magnesów	Wartość momentu oporu [Nm]
jednostkowy (1 magnes w stojanie)	jednostkowy (1 magnes w wirniku)		0,22
co 45°	co 90°		0,62
co 45°	co 180°		0,32
co 90°	co 180°		0,43
co 90°	co 90°		0,78
co 45°	co 45°		1,23

**Wartości momentu obrotowego jednorzędowego sprzęgła koncentrycznego przy naprzemiennym ułożeniu magnesów S-N i N-S**

Tabela 6

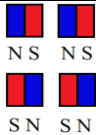
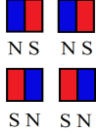
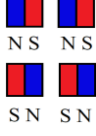
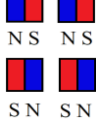
Rozkład magnesów na obwodzie stojana	Rozkład magnesów na obwodzie wirnika	Sposób ułożenia magnesów	Wartość momentu oporu [Nm]
co 180°	co 45°		0,56
co 90°	co 45°		1,06
co 45°	co 45°		2,11

Przeprowadzono również badania wariantu dwurzędowego sprzęgła koncentrycznego. Badania wykazały, że wartości momentu obrotowego przy naprzemiennej sekwencji ułożenia magnesów S-N i N-S były najwyższe. W tabeli 7 zestawiono wyniki pomiarów momentu obrotowego (oporu) dwurzędowego sprzęgła koncentrycznego.



Wartości momentu obrotowego dwurzędowego sprzęgła koncentrycznego przy naprzemiennym ułożeniu magnesów S-N i N-S

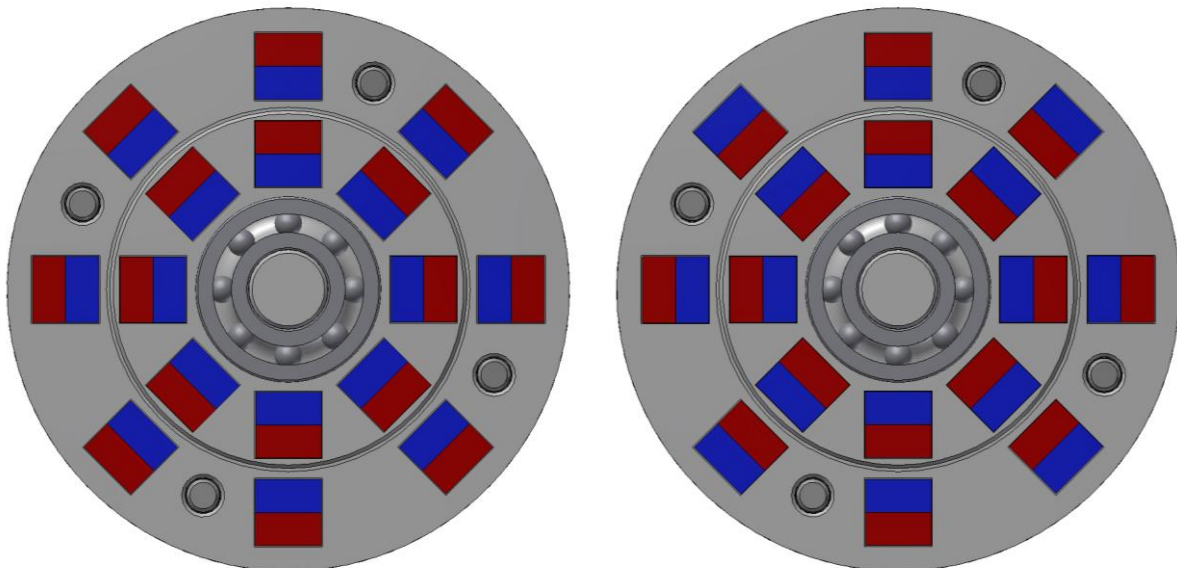
Tabela 7

Rozkład magnesów na obwodzie stojana	Rozkład magnesów na obwodzie wirnika	Sposób ułożenia magnesów	Wartość momentu oporu [Nm]
co 45° w warstwie 1 co 45° w warstwie 2	co 45° w warstwie 1 co 45° w warstwie 2		3,99
co 90° w warstwie 1 co 45° w warstwie 2	co 45° w warstwie 1 co 45° w warstwie 2		3,05
co 45° w warstwie 1 co 180° w warstwie 2	co 45° w warstwie 1 co 45° w warstwie 2		2,60
co 45° w warstwie 1 brak magnesów w warstwie 2	co 45° w warstwie 1 brak magnesów w warstwie 2		2,12

Różny sposób ułożenia magnesów w sprzęgłach koncentrycznych dawał w efekcie układ magnesów jak pokazano na rysunku 12.

a)

b)



Rys. 12. Układy par magnetycznych w zależności od zastosowanej konfiguracji [3]:

a) pary zgodne, b) pary przeciwne

Organizacja magnesów w zgodne pary powoduje generowanie momentu oporu dzięki oddziaływaniu 8 par magnetycznych (8 par przyciągających lub odpychających się). Obciążenie sprzęgła zewnętrznym momentem obrotowym, przekraczającym moment oporu

powoduje obrót sprzęgła o kąt  $45^\circ$ . Faza przejścia do kolejnej pozycji ustalonej jest z jednej strony ograniczana przez siły przyciągania par magnetycznych, z drugiej jednak strony, po przekroczeniu pewnej wartości kąta obrotu, następuje wspomaganie ruchu obrotowego przez początek przyciągania tworzących się „nowych” par magnetycznych.

Organizacja magnesów w pary przeciwsołbne pozwala zwiększyć wartość generowanego momentu oporu z uwagi na to, że przejściu sprzęgła do kolejnej ustalonej pozycji zapobiegają zarówno przyciągające się pary magnetyczne, jak również siły odpychania jednobiegunowych par, które powstają przy kontynuowaniu obrotu sprzęgła. Konsekwencją tego jest dwukrotnie większy kąt elementarnego obrotu po przekroczeniu momentu znamionowego sprzęgła.

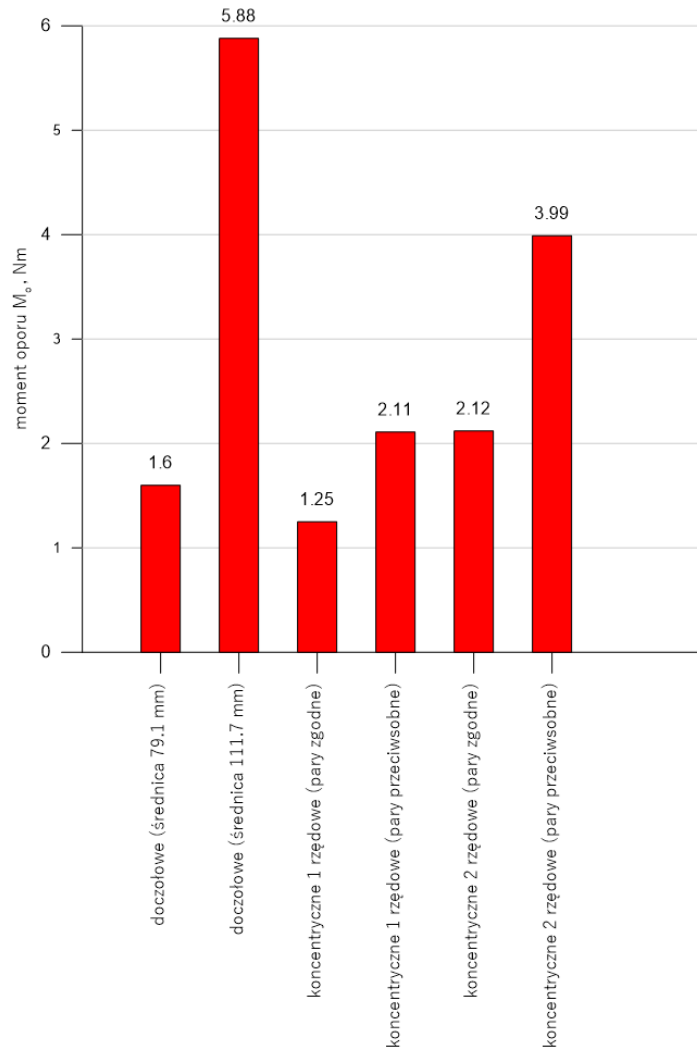
Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że przy ustawieniu magnesów, tworzących w każdym położeniu parę przyciągającą się (N-S) lub odpychającą (N-N, S-S), dla jednej i drugiej konfiguracji moment obrotowy (oporu) był zbliżony. Wzrost momentu oporu w sprzęgle stwierdzono przy ustawieniu magnesów w stojanie i wirniku, w którym kolejne pary magnesów nie były ze sobą zgodne (konfiguracja z parami przeciwsołbnymi, N-S – S-N). Przy całkowitym wypełnieniu gniazd wirnika i stojana wariant z naprzemiennymi parami generował dwukrotnie wyższy moment oporu niż wariant ze zgodnymi parami.

#### 4. Opracowanie wyników badań

Po badaniach trzech wariantów sprzęgieł magnetycznych można stwierdzić, że:

1. Sprzęgło doczołowe, w zależności od średnicy zabudowy magnesów, charakteryzują następujące wartości momentu oporu:
  - a) 1,6 Nm dla średnicy  $\varnothing$  79,1 mm,
  - b) 5,88 Nm dla średnicy  $\varnothing$  111,7 mm.
2. Sprzęgło koncentryczne jednorzędowe przy konfiguracji z parami zgodnymi, generuje moment oporu o wartości 1,25 Nm.
3. Sprzęgło koncentryczne jednorzędowe przy przeciwsołbnej konfiguracji par magnesów, osiągnęło wartość momentu oporu równą 2,12 Nm.
4. Sprzęgło koncentryczne dwurzędowe przy przeciwsołbnej konfiguracji par magnesów generowało moment oporu równy 3,99 Nm.

Wyniki pomiarów momentów obrotowych (oporu) dla wszystkich wariantów sprzęgieł zestawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Wartości momentu obrotowego (oporu) poszczególnych wariantów sprzęgieł

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Ułożenie przeciwsobne par magnetycznych w przypadku sprzęgieł współosiowych, skutkuje zwiększeniem generowanego momentu oporu. Jednostkowy obrót wału (przeskok sprzęgła do kolejnej, ustalonej pozycji), jaki ma miejsce podczas przeciążenia, jest 2 razy większy niż w przypadku ułożenia magnesów w zgodne pary.
2. W efekcie większego jednostkowego kąta obrotu sprzęgła z parami przeciwsobnymi, dochodziło do niekorzystnego zjawiska transmisji uderzeń dynamicznych do układu przeniesienia napędu.
3. Sprzęgło doczołowe z magnesami zabudowanymi na największej, dostępnej średnicy, generowało największy moment oporu. Gęstość rozmieszczenia par magnetycznych powodowała łagodną pracę podczas przeciążenia oraz mniejsze, dynamiczne obciążenie układu.
4. Wariant współosiowy daje możliwość zwiększenia generowanego momentu oporu poprzez zmianę sposobu rozmieszczenia par magnetycznych.
5. Porównując parametry geometryczne oraz momenty oporu osiągnięte przy użyciu wariantu doczołowego oraz koncentrycznego dwurzędowego można stwierdzić, że sprzęgło koncentryczne jest lepszym rozwiązaniem. Porównując wartość

maksymalnego momentu oporu sprzęgła doczołowego (5,88 Nm, przy średnicy montażu  $\varnothing$  111,7 mm) oraz wartość maksymalnego momentu sprzęgła koncentrycznego (3,99 Nm przy średnicy montażu  $\varnothing$  54 mm) otrzymano około 1,5-krotny wzrost wartości momentu, przy około dwukrotnie większej średnicy zabudowy magnesów.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zaprezentowano trzy warianty sprzęgieł magnetycznych, scharakteryzowano ich konstrukcję i parametry użytkowe oraz uzyskane statyczne momenty obrotowe (oporu).

Zastosowanie technologii druku 3D do wytworzenia egzemplarzy badawczych sprzęgieł wymagało korekcji modeli przestrzennych, ponieważ skurcz tworzywa sztucznego drukowanych elementów generował zmiany tolerancji wymiarowych.

Sprzęgło doczołowe generowało moment oporu o największej wartości, natomiast konstrukcja koncentryczna umożliwia zwiększenie wartości wytwarzanego momentu oporu dzięki zmianie konfiguracji par magnetycznych oraz zwielokrotnieniu liczby magnesów tworzących sekcje, w ramach pojedynczej pary, co przedstawiono na rysunku 12.

W kolejnych pracach przewidziane jest przeprowadzenie prób dynamicznych wytworzonych modeli, które pozwolą na uzyskanie charakterystyki przeciążeniowej sprzęgieł. Charakterystyki posłużą do oceny wpływu opracowanych rozwiązań na układ przeniesienia napędu.

## Literatura

- [1] Podstawy konstrukcji maszyn. T. 3. Red. Dietrich M., Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999, wyd.: 3 zm. ISBN: 83-204-2346-5 (T.3), 83-204-2343-0 (całość)
- [2] Szydelski Z.: Pojazdy samochodowe: sprzęgła, hamulce i przekładnie hydrokinetyczne. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1981. ISBN 83-206-0227-0
- [3] <https://e-shop.magsy.pl/magnes-neodymowy-prostopadloscian-10x10x10-n/> (01.10.2018)
- [4] <http://www.magnesy.eu/mpl-10-x-10-x-10--n42---magnes-neodymowy-t-3378.html> (01.10.2018)
- [5] <https://www.ktr.com/pl/produkty/przeniesienie-napedu/sprzegla/sprzegla-magnetyczne/minex-s/> (01.10.2018)
- [6] <http://www.grim.pl/sprzegla/gerwah/magnetyczne/magnetyczne.html> (01.10.2018)
- [7] <https://zortrax.pl/materialy/dla-serii-zortrax-m/> (01.10.2018)