

<https://doi.org/10.32056/KOMAG2019.2.2>

Analiza możliwości zastosowania magnesów neodymowych w hamulcach urządzeń małej mechanizacji

Piotr Dobrzaniecki

Analysis of the possibility of using neodymium magnets in brakes of small mechanization devices

Streszczenie:

W artykule przedstawiono rezultaty prac badawczo-rozwojowych, związanych z projektem hamulca magnetycznego, przeznaczonego do zastosowania w urządzeniach małej mechanizacji. Zaprezentowano wyniki wstępnych prac badawczych, prac modelowych, efekty wykorzystania technologii druku 3D oraz wyniki badań prototypu układu magnetycznego.

Słowa kluczowe: hamulec magnetyczny, magnesy neodymowe, mała mechanizacja, wciągnik łańcuchowy, druk 3D

Keywords: magnetic brake, neodymium magnets, small mechanization, chain hoist, 3D printing

Abstract:

The results of research and development works related to the design of a magnetic brake designed for use in small mechanization devices are presented in the article. The results of preliminary research work, model work, effects of the use of 3D printing technology and the results of a magnetic system prototype tests are presented.

1. Wstęp

Doświadczenia zdobyte przy realizacji prac związanych z projektem sprzęgieł magnetycznych, opisane w artykule [3], pozwoliły na podjęcie dalszych prac, związanych z opracowaniem zespołu hamulca przeznaczonego do stosowania w konstrukcjach urządzeń małej mechanizacji, np. we wciągnikach łańcuchowych, w których realizuje proces hamowania oraz unieruchamiania układu przeniesienia napędu. Hamulec wciągnika musi być w stanie utrzymać podnoszony ładunek na żądanej wysokości, jak również zatrzymać go w trakcie opuszczania, a więc jego konstrukcja musi uwzględniać siły dynamiczne.

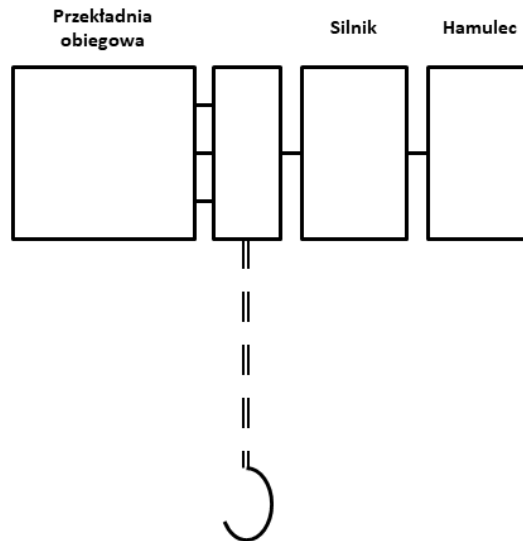
Hamulec wykorzystywany we wciągnikach łańcuchowych jest hamulcem ciernym, którego tarcze cierne dociskane są sprężynami, natomiast luzowanie realizowane jest hydraulicznie lub elektromagnetycznie.

W niniejszym artykule opisano badania oraz koncepcję rozwiązania mogącego generować moment hamujący z wyeliminowaniem elementów ciernych. Hamulec taki bazowałby na magnesach neodymowych. W pracach wykorzystano przedstawione w [3] wyniki dotychczasowych prac projektowych i badawczych, dotyczących zastosowania magnesów neodymowych w konstrukcji sprzęgieł.

Zakres prac, opisanych w niniejszym artykule, dotyczy opracowania doświadczalnego układu magnetycznego, zapewniającego przeniesienie zakładanego momentu hamującego. W artykule pominięto układ rozłączania hamulca z uwagi na to, że będzie on przedmiotem innego opracowania.

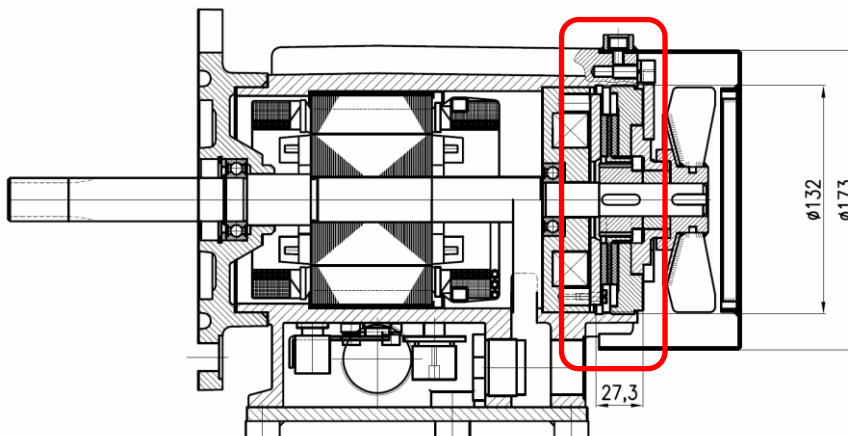
2. Zastąpienie hamulca ciernego hamulcem magnetycznym

Niezależnie od rodzaju napędu, wciągnik można przedstawić w postaci schematu blokowego przedstawionego na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy wciągnika łańcuchowego [opracowanie własne]

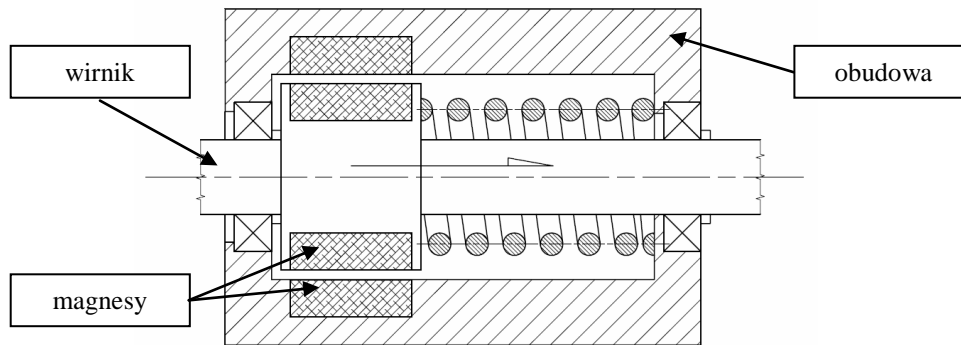
W przypadku wciągników z napędem elektrycznym, hamulec cierny zabudowany jest na wale wirnika silnika. Jest to hamulec z dwoma parami ciernymi, luzowany elektromagnetycznie. Silnik z hamulcem zastosowany w wciągnikach EWŁ 3/6 pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Silnik wciągnika EWŁ 3/6 [1]

Projekt hamulca magnetycznego przewidywał zastąpienie hamulca wielopłytkowego (zaznaczonego na rysunku 2) rozwiązaniem opartym o magnesy trwałe [4], [5], [6], [7]. Na podstawie analizy dotychczasowych konstrukcji wciągników dla górnictwa założono że moment hamujący powinien wynosić ok. 20 Nm. Ponadto założono, że wymiary gabarytowe hamulca będą porównywalne z wymiarami silnika przedstawionego na rysunku 2.

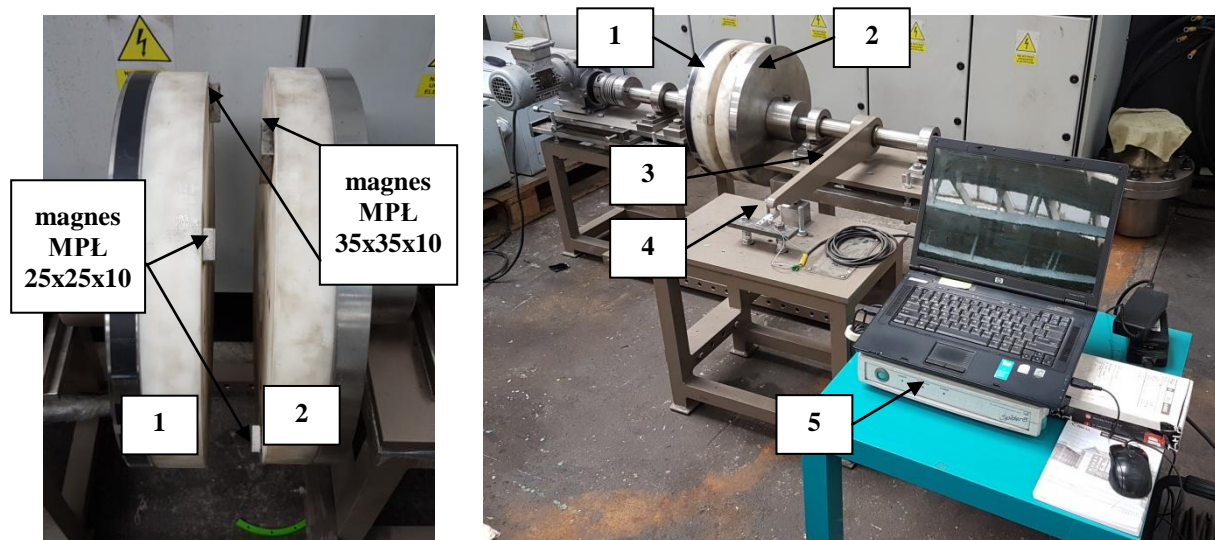
W projekcie przyjęto konfigurację współosiowego rozmieszczenia magnesów w wirniku i obudowie. Schematycznie przedstawiono to na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu hamulca magnetycznego [1]

3. Badania doświadczalne par magnetycznych

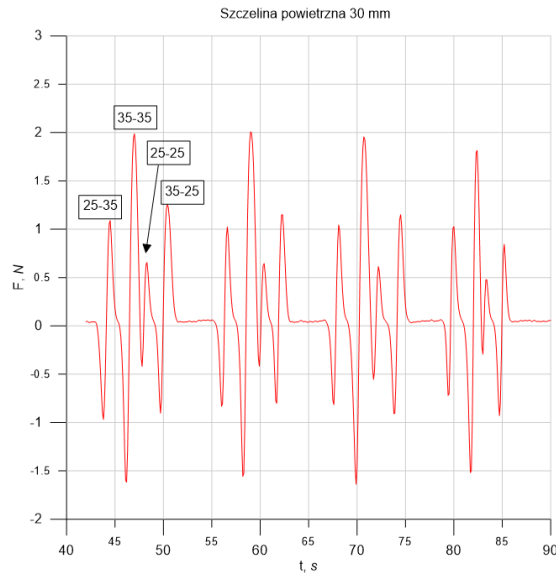
Zasadniczym problemem w zagadnieniu wykorzystania magnesów neodymowych w konstrukcji części maszyn, jest brak szczegółowych informacji o wartościach sił generowanych pomiędzy dwoma magnesami w kierunku poprzecznym do kierunku magnesowania. Aby określić siły poprzeczne pomiędzy dwoma magnesami, generujące moment hamujący, przeprowadzono badania doświadczalne przy wykorzystaniu wytypowanych wcześniej magnesów. Do doświadczeń wybrano magnesy neodymowe typu MPŁ 25x25x10. Wybór tego typu magnesów był podyktowany względami geometrycznymi, związanymi z postacią konstrukcyjną opracowywanych elementów hamulca. Były to największe magnesy, które pozwalały na ułożenie ich w założony sposób. Maksymalna, deklarowana przez dostawcę, siła udźwigu, określona z użyciem płyty stalowej wynosi 190 N. Wartość oddziaływań poprzecznych w parach określono na stanowisku badawczym, przedstawionym na rysunku 4.



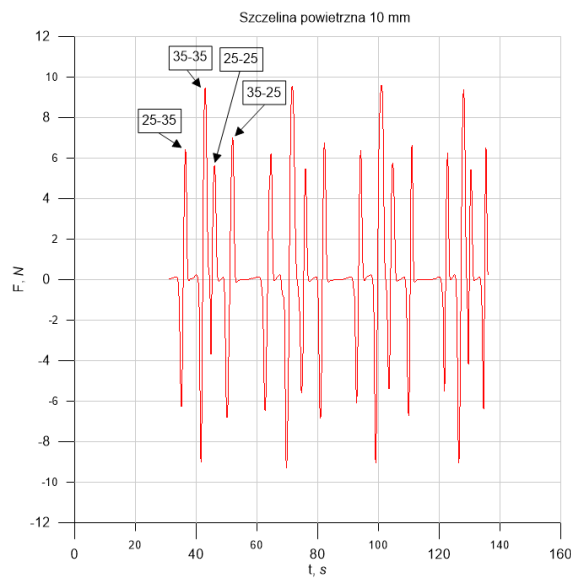
Rys. 4. Stanowisko do badań doświadczalnych sił w parach magnetycznych [2]

Na ułożyskowane tarcze stanowiska (1 i 2) naklejone zostały badane magnesy. Obrót lewej tarczy (1) powodował jej magnetyczne sprzężenie z prawą tarczą (2), która była połączona z dźwignią (3), oddziałującą na przetwornik siły (4), podłączony do rejestratora danych (5). Badanie polegało na ręcznym obracaniu tarczy 1 względem tarczy 2, co powodowało nacisk lub unoszenie dźwigni względem przetwornika siły.

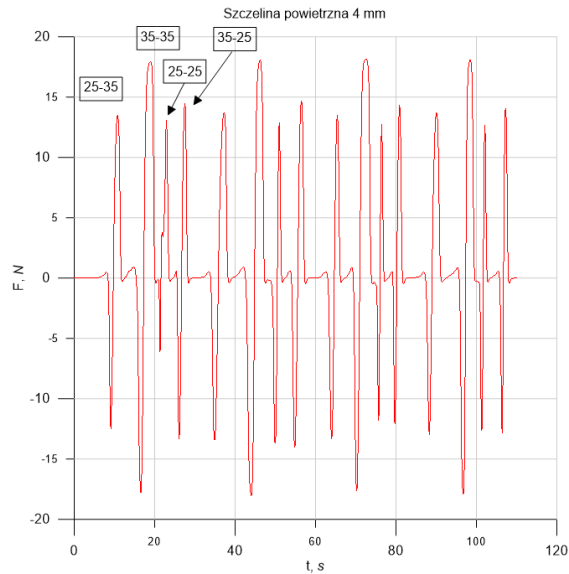
W trakcie badań sprawdzano również, jak zmienia się siła poprzeczna w zależności od szerokości szczeliny powietrznej pomiędzy magnesami. Z uwagi na to, że podczas badań testowano różne typy magnesów, na przedstawionych wykresach oznaczono, które wartości dotyczą których par magnetycznych. Wybrane wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na rysunkach: 5, 6, 7 i 8.



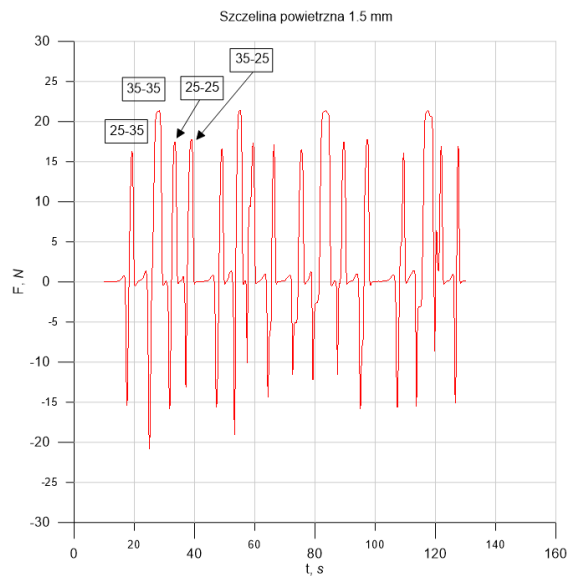
Rys. 5. Wartości sił poprzecznych w parach magnetycznych. Szczelina powietrzna 30 mm [2]



Rys. 6. Wartości sił poprzecznych w parach magnetycznych. Szczelina powietrzna 10 mm [2]

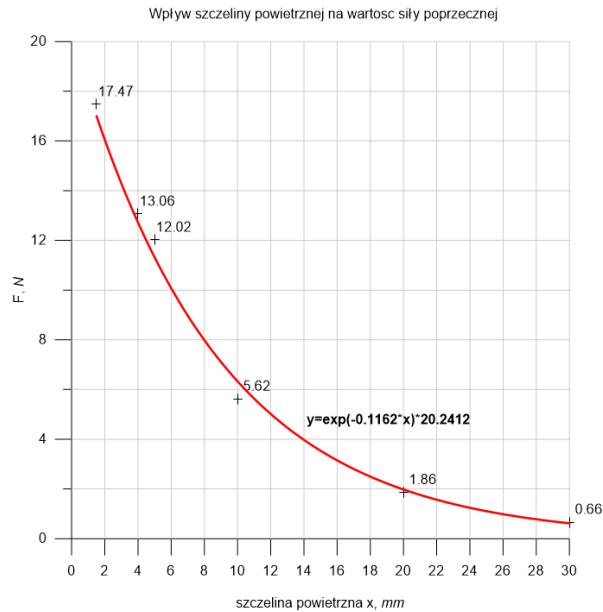


Rys. 7. Wartości sił poprzecznych w parach magnetycznych. Szczelina powietrzna 4 mm [2]



Rys. 8. Wartości sił poprzecznych w parach magnetycznych. Szczelina powietrzna 1,5 mm [2]

Na podstawie wyników badań sporządzono charakterystykę, przybliżającą zależność pomiędzy siłą poprzeczną, działającą pomiędzy dwoma magnesami, a szerokością szczeliny powietrznej pomiędzy nimi (rys. 9).

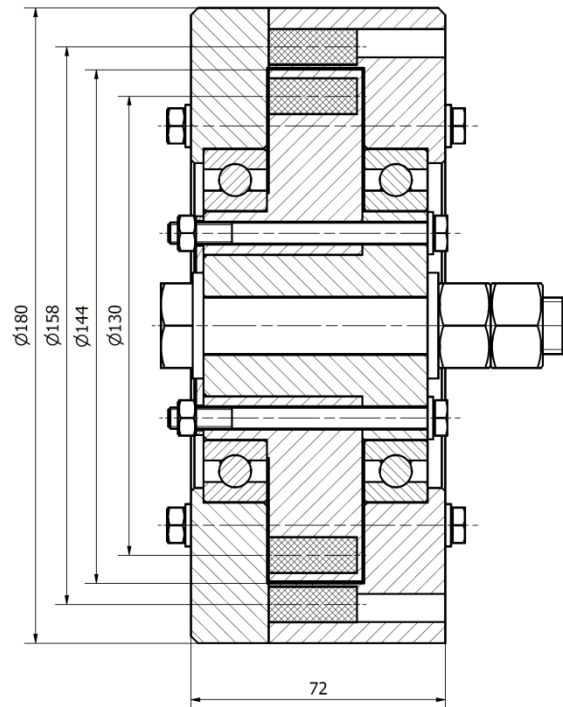


Rys. 9. Wartości sił poprzecznych w parze magnetycznej 25x25x10 w funkcji szerokości szczeliny powietrznej [opracowanie własne]

Chcąc wykorzystać maksimum potencjału magnetycznego należy dążyć do minimalizacji szczeliny pomiędzy magnesami.

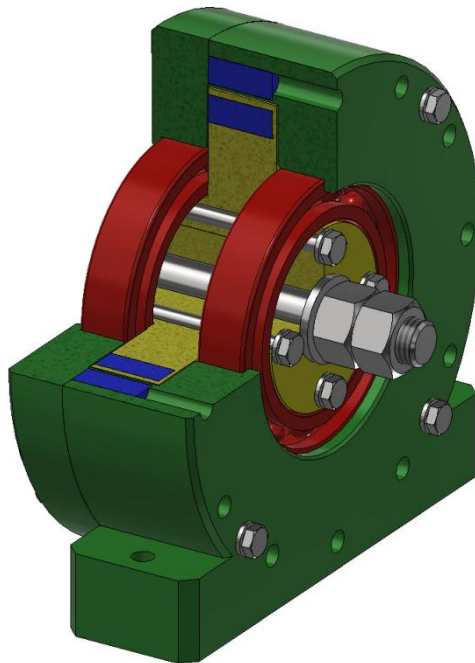
4. Projekt postaci konstrukcyjnej hamulca

W ramach prac rozwojowych, opracowano w ITG KOMAG hamulec w wariacie współosiowym – ułożyskowany wirnik zamknięty w obudowie. Do konstrukcji hamulca wytypowano magnesy typu MPŁ 25x25x10 [4], [5]. Było to podyktowane potrzebą minimalizacji szczeliny pomiędzy wirnikiem, a obudową. Ponadto należało zachować założoną grubość ścianki w konstrukcji wirnika i obudowy. Magnesy 25x25x10 pozwoliły osiągnąć najlepsze rezultaty z uwagi na powyższe wymagania oraz liczbę elementów możliwych do rozlokowania na obwodzie. Magnesy rozmieszczono na obwodzie obudowy oraz wirnika. Na rysunku 10 przedstawiono szkic hamulca magnetycznego oraz jego podstawowe wymiary.



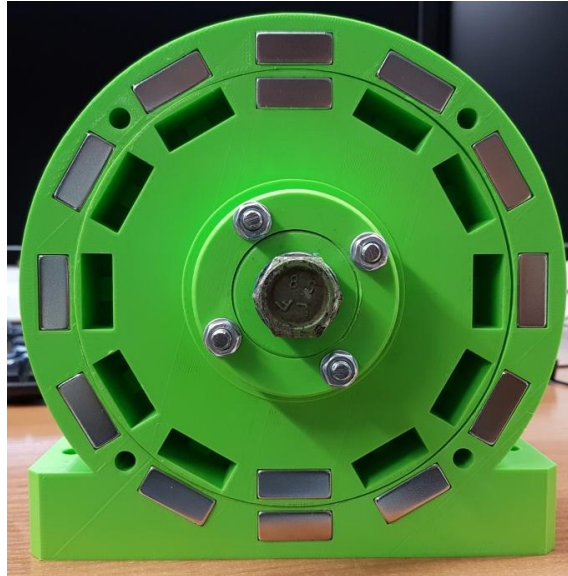
Rys. 10. Szkic hamulca magnetycznego [opracowanie własne]

Na bazie szkicu opracowano model 3D hamulca, wykorzystany później w procesie druku 3D. Widok modelu hamulca przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Model 3D hamulca magnetycznego [opracowanie własne]

Modele poszczególnych elementów hamulca wykonano w technologii druku 3D. Po wydrukowaniu elementów zmontowano hamulec, uzupełniając go o elementy takie jak łożyska oraz śruby, podkładki i nakrętki. Częściowo zmontowany hamulec przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Częściowo zmontowany hamulec magnetyczny [opracowanie własne]

Po montażu przystąpiono do badań, mających na celu określenie parametrów użytkowych hamulca, tj. dostępnego, magnetycznego momentu oporu.

5. Badania doświadczalne hamulca magnetycznego

Hamulec, po zmontowaniu poddany został próbom, w celu określenia wartości rozwijanego przez niego momentu oporu.

Przystępując do badań hamulca przyjęto sposób realizacji doświadczeń, w którym gniazda obudowy hamulca wypełniono magnesami, natomiast wirnik obsadzano w następującej kolejności:

- 2 magnesy w gniazdach wirnika co 180° ,
- 4 magnesy w gniazdach wirnika co 90° ,
- 6 magnesów w gniazdach wirnika co 60°
- 8 magnesów w gniazdach wirnika,
- 10 magnesów w gniazdach wirnika,
- 12 magnesów w gniazdach wirnika (pełne obsadzenie).

Hamulec przygotowany do prób przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Próby doświadczalne hamulca [2]

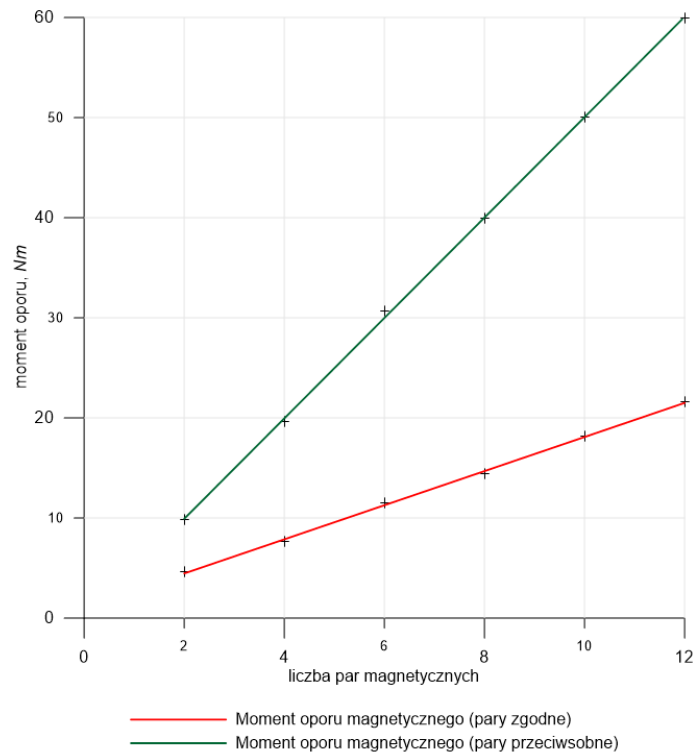
Hamulec badano za pomocą elektronicznego klucza dynamometrycznego. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów w poszczególnych próbach.

Wyniki badań doświadczalnych oraz wyniki obliczeniowe [opracowanie własne]

Tabela 1

Konfiguracja 1 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, 2 magnesy w gniazdach wirnika co 180°)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	4,63
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	9,80
Konfiguracja 2 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, 4 magnesy w gniazdach wirnika co 90°)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	7,63
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	19,64
Konfiguracja 3 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, 6 magnesów w gniazdach wirnika co 60°)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	11,51
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	30,70
Konfiguracja 4 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, 8 magnesów w gniazdach wirnika)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	14,42
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	39,90
Konfiguracja 5 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, 10 magnesów w gniazdach wirnika)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	18,14
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	50,10
Konfiguracja 6 <i>(pełne obsadzenie gniazd korpusu, pełne obsadzenie gniazd wirnika)</i>	
Moment oporu [Nm]	
zmierzony (magnesy w zgodnych parach)	21,60
zmierzony (magnesy w przeciwsobnych parach)	59,90

Dane z tabeli 1 przedstawiono graficznie na wykresie – rysunek 14.

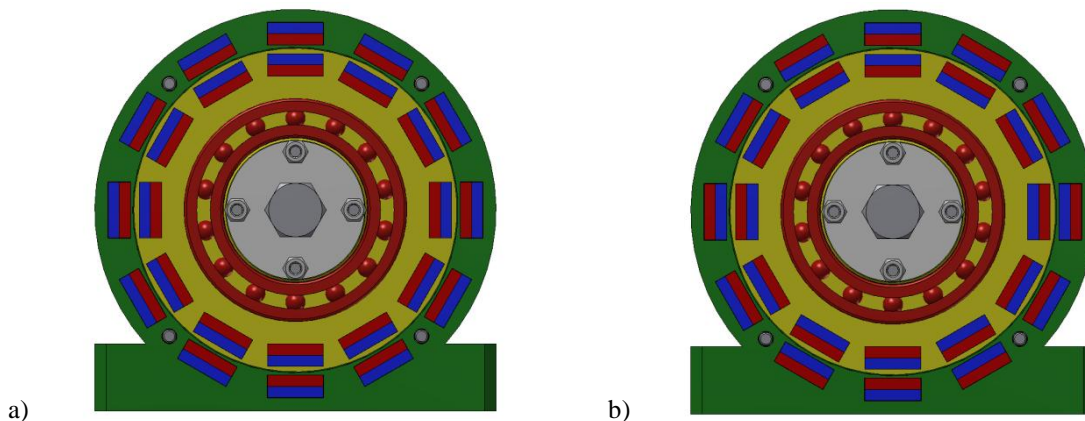


Rys. 14. Wyniki prób doświadczalnych [opracowanie własne]

W trakcie badań stosowano dwa sposoby rozmieszczenia magnesów w wirniku oraz obudowie:

- pary zgodne,
- pary przeciwsobne.

W sposób graficzny przedstawiono to na rysunku 15.



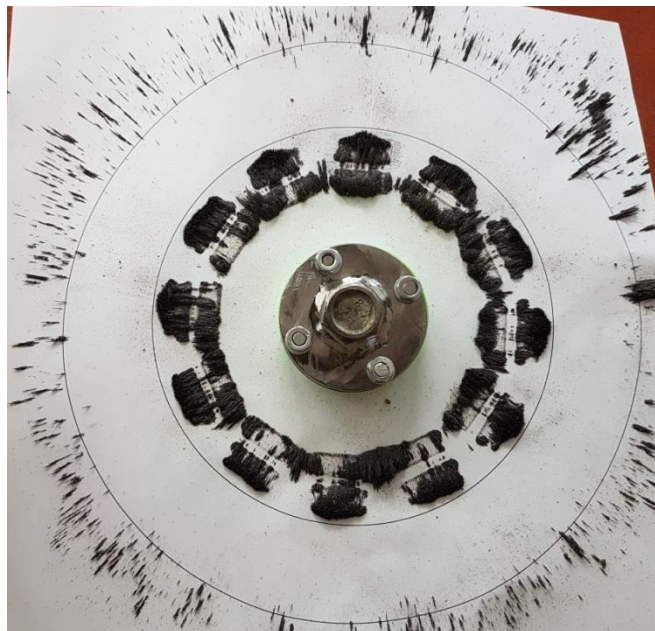
Rys. 15. Organizacja par magnetycznych w hamulcu [2]

- a) pary zgodne,
- b) pary przeciwsobne.

Badania momentu hamowania przy dwóch konfiguracjach ułożenia magnesów (zgodne i przeciwsobne) wykazały znacznie większą wartość momentu hamującego przy układzie przeciwsobnym. W chwili obecnej nie są jasne zjawiska, powodujące zaobserwowany wzrost momentu oporu w hamulcu, przy zastosowaniu przeciwsobnych par magnetycznych.

W przypadku par zgodnych zaobserwowano wyraźne oddziaływanie magnetyczne wokół hamulca oraz silne magnesowanie elementów stalowych konstrukcji hamulca. W przypadku

par przeciwsobnych nie obserwowano przyciągania materiałów ferromagnetycznych wokół obudowy hamulca. Nie dochodziło również do namagnesowania metalowych elementów konstrukcji hamulca. W celu wizualizacji linii sił pola oraz obszarów koncentracji pól magnetycznych posłużono się opiłkami stalowymi. Linie sił przy parach zgodnych przedstawiono na rysunku 16, natomiast pary przeciwsobne przedstawiono na rysunku 17.

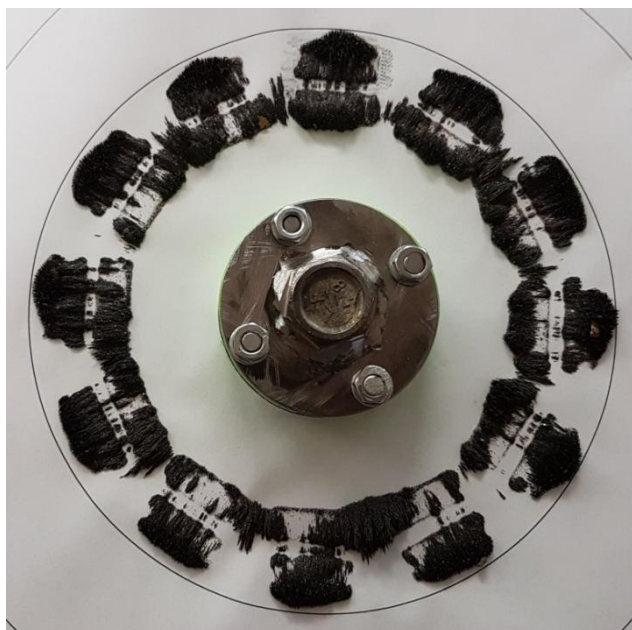


Rys. 16. Linie sił pola magnetycznego w hamulcu – pary zgodne [2]

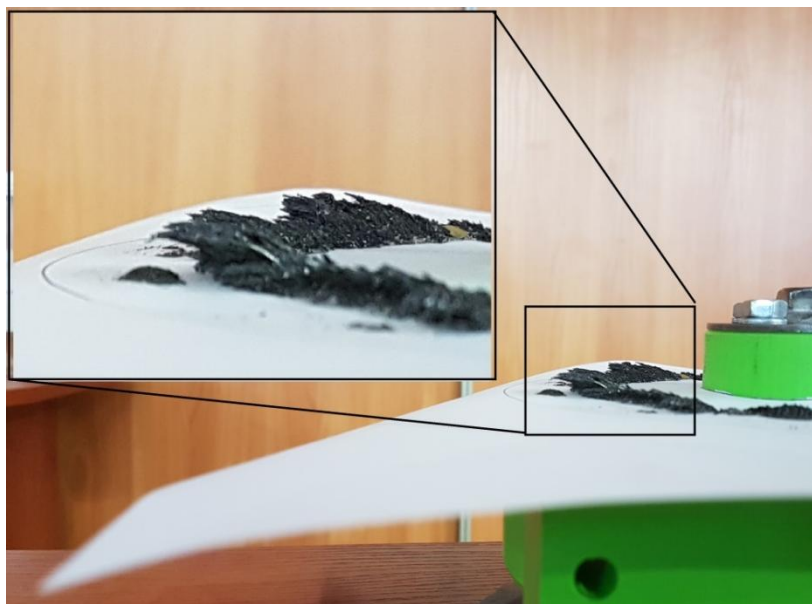


Rys. 17. Linie sił pola magnetycznego w hamulcu – pary przeciwsobne [2]

Po uporządkowaniu opiłków stalowych z obrzeży (przy parach zgodnych) otrzymano następujący obraz koncentracji linii sił pola magnetycznego – rysunki 18 i 19.



Rys. 18. Koncentracja linii sił pola magnetycznego – pary zgodne po „uporządkowaniu” opiłków [2]



Rys. 19. Koncentracja linii sił pola magnetycznego – pary zgodne; widok z boku [2]

6. Spostrzeżenia i wnioski

Doświadczenia związane z pomiarem wartości momentu oporu generowanego przez hamulec przy różnych konfiguracjach par magnetycznych oraz próby z wizualizacją linii sił i zagęszczeń pól magnetycznych pozwoliły sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Pełne obsadzenie hamulca magnesami, ułożonymi w zgodne pary magnetyczne pozwoliło osiągnąć moment oporu równy 21,60 Nm.
2. Pełne obsadzenie hamulca magnesami, ułożonymi w przeciwsobne pary magnetyczne pozwoliło osiągnąć moment oporu równy 59,90 Nm.
3. Przy konfiguracji złożonej ze zgodnych par magnetycznych generowane pola magnetyczne mają charakter „otwarty”, tzn. linie sił pól magnetycznych obejmują

większą przestrzeń dookoła magnesów, w efekcie czego dochodzi m.in. do silnego namagnesowania części metalowych w osi wałka, jak również do silniejszej emisji pola magnetycznego na zewnątrz obudowy hamulca.

4. Przy stosowaniu zgodnych par magnetycznych pole magnetyczne ma tendencje do „wychodzenia” na zewnątrz w kierunku równoległym do osi obrotu hamulca (rys. 19). W efekcie tego dochodzi do koncentracji pola magnetycznego w płaszczyźnie bocznej magnesów (rys. 16 i rys. 18). Przerwy pomiędzy parami magnetycznymi pozostają pod niewielkim wpływem pól magnetycznych (puste obszary na rys. 16 i rys. 18).
5. Zastosowanie par przeciwsobnych skutkowało osiągnięciem pola magnetycznego o innym charakterze. Było ono zamknięte w obszarze bezpośrednio przy magnesach (rys. 17) i nie miało tendencji do wychodzenia na zewnątrz układu. Nie dochodziło również do namagnesowania części metalowych w osi wałka, ani uwidocznienia linii sił pola na zewnątrz obudowy hamulca.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń sformułowano następujące wnioski:

1. Hamulec wyposażony w przeciwsobne pary magnetyczne generuje blisko 3 krotnie większy moment oporu niż w przypadku hamulca z parami zgodnymi.
2. Pary przeciwsobne pozwalają osiągnąć pole magnetyczne o większym skupieniu, zamknięte w obszarze par magnetycznych i nie powodujące namagnesowania np. osi wału oraz ograniczają straty energii magnetycznej, co przekłada się na uzysk w postaci większego momentu oporu.
3. Hamulec wyposażony w zgodne pary magnetyczne, w momencie przeciążenia, przechodzi do położenia wyznaczonego przez kolejną, najbliższą parę magnetyczną. Skok hamulca w przeciążeniu wynosi wtedy α_1 i jest równy:

$$\alpha_1 = \frac{360^\circ}{n}$$

gdzie n jest liczbą magnesów rozłożonych na obwodzie wirnika lub stojana (obudowy). W efekcie otrzymujemy kąt przejścia $\alpha_1=30^\circ$.

4. Hamulec wyposażony w pary magnetyczne przeciwsobne, w momencie przeciążenia, przechodzi do położenia wyznaczonego przez co drugą parę magnetyczną. Skok hamulca w przeciążeniu wynosi wtedy α_2 i jest równy:

$$\alpha_2 = \frac{360^\circ}{\frac{n}{2}}$$

gdzie n jest liczbą magnesów rozłożonych na obwodzie wirnika lub stojana (obudowy). W efekcie otrzymujemy kąt przejścia $\alpha_2=60^\circ$.

5. Przeciążenie hamulca powoduje gorsze warunki pracy układu przeniesienia napędu w przypadku hamulca z przeciwsobnymi parami magnetycznymi. Gorsze warunki wynikają z faktu, że kąt obrotu jest dwukrotnie większy, a wartość momentu oporu jest około 3 trzykrotnie większa niż w przypadku hamulca ze zgodnymi parami, co powoduje dużo większe przeciążenia dynamiczne transmitowane do układu przeniesienia napędu.
6. Układ z parami zgodnymi sprawia, że obciążenie układu napędowego podczas pracy w przeciążeniu jest mniejsze.
7. Zastosowanie magnesów neodymowych powoduje znaczne namagnesowanie konstrukcji co może mieć wpływ na warunki eksploatacji. W takim przypadku

zastosowanie układu przeciwsobnego w znacznym stopniu minimalizuje magnesowanie elementów korpusu obudowy oraz wirnika.

8. Układ rozłączania hamulca, niezbędny w celu zastosowania proponowanej konstrukcji hamulca w urządzeniach małej mechanizacji, musi zapewniać takie rozłączenie układu, by zminimalizować resztkowe oddziaływania magnetyczne. Ma to znaczenie z uwagi na to, że w układach przeniesienia napędu urządzeń małej mechanizacji (np. wciągniki), często wykorzystywane są przekładnie o dużym przełożeniu. Niewielkie siły oporu pochodzące od hamulca mogą być wówczas zwielokrotnione przez przekładnię i będą niepotrzebnym obciążeniem źródła napędu np. wciągnika. Aktualnie stosowane układy hamulcowe spełniają to wymaganie, zatem opracowywany układ również powinien posiadać takie same własności.
9. Doświadczenia uzyskane w trakcie omawianych prac projektowo-badawczych potwierdziły możliwość wykorzystania magnesów neodymowych do opracowania konstrukcji hamulca, przeznaczonego do użycia np. we wciągniku.
10. Należy mieć na uwadze, że zastosowanie magnesów w konstrukcji hamulca będą musiały poprzedzić badania, które wykażą niezmiennosc parametrów magnesów. W szczególności należy zweryfikować, czy w trakcie pracy będzie dochodziło do wzrostu temperatury w obrębie zespołu hamulca, a tym samym zmianę własności magnesów i parametrów zespołu hamulca.

Literatura

- [1] Dobrzaniecki P. i in.: „Projekt postaci konstrukcyjnej hamulca z magnesami neodymowymi. Wstępne obliczenia”, ITG KOMAG Gliwice 2018 (materiały niepublikowane).
- [2] Dobrzaniecki P i in.: „Wykonanie modelu doświadczalnego hamulca przy pomocy techniki druku 3D. Montaż i badania”, ITG KOMAG Gliwice 2018 (materiały niepublikowane).
- [3] Dobrzaniecki P., Kalita M.: „Możliwość zastosowania magnesów neodymowych w sprzęgłach maszyn i urządzeń”, Maszyny Górnicze nr 4, s. 27-38.
- [4] Strona internetowa: www.euromagnesy.eu (29.04.2019)
- [5] Strona internetowa: www.magnesy.eu (29.04.2019)
- [6] Strona internetowa: www.tridelta.pl (29.04.2019)
- [7] Strona internetowa: www.ktr.com (29.04.2019)
- [8] Strona internetowa: www.kjmagnetics.com (29.04.2019)

dr inż. Piotr Dobrzaniecki
pdobrzaniecki@komag.eu

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice