

Przekładnia magnetyczna prędkości obrotowej

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Emil Król

1. Scalenie dwóch maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi

Przekładnię mechaniczną prędkości obrotowej można zamodelować układem Warda Leonarda. Jest to standardowy układ napędowy zmieniający prędkość obrotową jednego silnika na inną prędkość obrotową drugiego silnika. Taka zmiana prędkości wymaga trzech maszyn elektrycznych. Znane są także z patentów [2, 5, 6] rozwiązania dwóch maszyn scalonych. Maszyny te są dostosowane do realizacji algorytmu pracy urządzeń (maszyn roboczych), które napędzają. W patencie US 6,217,298 B1 [2] przedstawiono oryginalne rozwiązanie scalenia dwóch maszyn elektrycznych. Maszyna ma wspólny twornik i dwa wirniki wzbudane magnesami trwałymi. Wirniki zewnętrzny i wewnętrzny są usytuowane koncentrycznie, pokazano to na rys. 1. Istotą tych rozwiązań jest, że osie wałów wirników leżą na tej samej prostej. Takie rozwiązanie maszyny można wykorzystać do napędu pojazdów elektrycznych. Jeden wirnik napędza jedno koło, a drugi wirnik napędza drugie koło. Wirniki nie są mechanicznie połączone, zatem mogą pracować z różną prędkością obrotową, pełniąc równocześnie funkcję przekładni różnicowej.

Podobne rozwiązanie maszyny elektrycznej ze wspólnym twornikiem i dwoma wirnikami przedstawiono w patencie EP 2 133 981 981 A2 [6] – rys. 2. Na wirnikach zewnętrznym i wewnętrznym jest ta sama liczba magnesów trwałych. Jak wynika z tytułu patentu, jest to maszyna o dużej gęstości momentu.

Poprzez modyfikację obwodu magnetycznego maszyn z rys. 1 i 2 można skonstruować sprzęgło magnetyczne. Konstrukcja sprzęgła magnetycznego jest prosta: należy usunąć twornik, liczba magnesów trwałych na jednym i drugim wirniku musi być taka sama, szczelina powietrzna między wirnikami powinna być mała (1–2 mm). Zaletą sprzęgła magnetycznego jest brak połączenia mechanicznego między silnikiem napędowym i urządzeniem napędzanym: można dopuścić większe tolerancje ustawienia współosiowości, nie przenoszą się drgania z silnika na urządzenie i odwrotnie, sprzęgło nie przewodzi prądów łożyskowych indukowanych w silniku.

Maszyna z rys. 1 po modyfikacji może być hamulcem elektrodynamicznym. Jednak rozwiązań konstrukcyjnych hamulców magnetycznych jest wiele. Większość z nich bazuje na wykorzystaniu prądów wirowych indukowanych w wirującej tarczy metalowej (Cu, Al, Fe) w polu magnetycznym magnesów trwałych. Energia hamowania rozprasza się w formie ciepła w tarczy. W hamulcach większej mocy tarcza nie jest w stanie przejąć dużej ilości ciepła, dlatego zamiast tarczy można wykorzystać uzwojony twornik i energię wydzielaną w uzwojeniu przekazywać do rezystorów zewnętrznych lub ją przetwarzać.

Streszczenie: Przekładnia magnetyczna przedstawiona w artykule składa się z wirnika zewnętrznego, wirnika wewnętrznego i nieruchomego pierścienia umieszczonego między tymi wirnikami. Na jarzmach od strony pierścienia magnetycznego są przymocowane magnesy trwałe. Wirnik zewnętrzny jest wolnoobrotowy (n_1) o liczbie par biegunów p_1 . Wirnik wewnętrzny jest szybkoobrotowy (n_2) o liczbie par biegunów p_2 . Stosunek prędkości obrotowej wirników wynosi $\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_2}$. Pierścień zarówno od strony zewnętrznej, jak i wewnętrznej ma żłobki. Uzwojenie jest umieszczone w żłobkach. Przekładnia ma dużą gęstość momentu i jest ekologiczna (nie ma oleju). Przekładnia może zmieniać kierunek obrotów i może pracować jako hamulec.

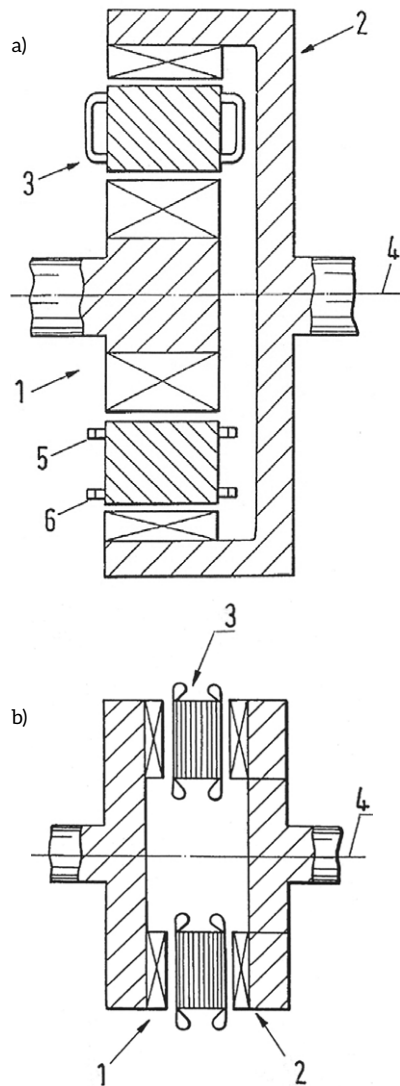
Słowa kluczowe: przekładnia mechaniczna, magnesy trwałe, rewersja obrotów, hamowanie

🇬🇧 ROTATIONAL SPEED MAGNETIC GEAR

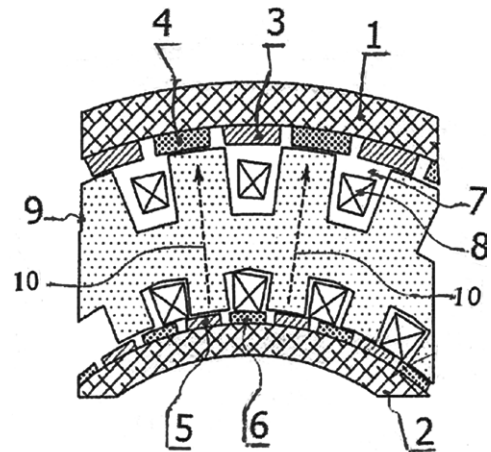
Abstract: The magnetic transmission presented in the article consists of an external rotor, an internal rotor and a fixed ring between these rotors. On the yokes, permanent magnets are attached from the side of the magnetic ring. The external rotor is low speed (n_1) with the number of pole pairs (p_1). The internal rotor is high-speed (n_2) with the number of pole pairs (p_2). The rotor speed ratio is $\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_2}$. The ring has grooves on both the outside and the inside. The winding is placed in nurseries. The gearbox has a high torque density and is ecological (there is no oil). The gearbox can change direction of rotation and can work as a brake.

Keywords: mechanical transmission, permanent magnets, reverse rotation, braking

Bazując na rys. 1 i 2, można skonstruować współosiową przekładnię magnetyczną prędkości obrotowej, jeśli liczba par biegunów maszyny zewnętrznej i wewnętrznej będzie różna, a uzwojenia tworników będą połączone. Zatem wymaga to zmiany liczby biegunów jednego i drugiego wirnika i identycznej zmiany liczby biegunów uzwojeń tworników. Przekładnia magnetyczna powiększa bądź zmniejsza prędkość obrotową wału, przy czym przełożenie prędkości obrotowej i transmisja momentu przez przekładnię odbywa się za pośrednictwem pola magnetycznego. Znane jest rozwiązanie przekładni magnetycznej [3, 4] składającej się z dwóch wirników: wirnika wolnoobrotowego z magnesami trwałymi o liczbie par biegunów p_1 i wirnika szybkoobrotowego z magnesami trwałymi o liczbie par biegunów p_2 , przy czym $p_1 > p_2$. Przekładnia taka jest przedstawiona na rys. 3. Osie obrotów obydwóch wirników są



Rys. 1. Scalona konstrukcja dwóch maszyn elektrycznych: a) rozwiązanie cylindryczne; b) rozwiązanie tarczowe. Oznaczenia: 1 - wirnik wewnętrzny; 2 - wirnik zewnętrzny; 3 - twornik; 4 - oś wałów; 5, 6 - uzwojenia twornika [2]



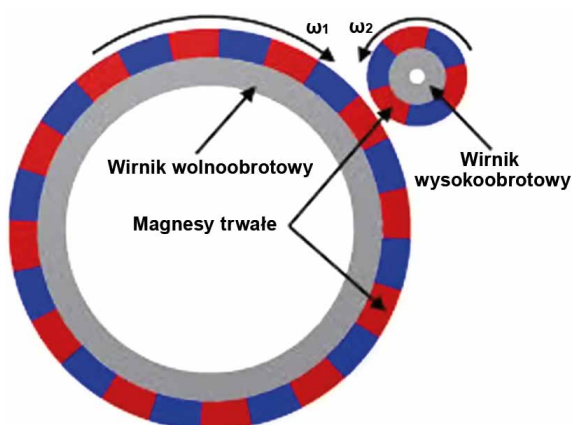
Rys. 2. Przykład rozwiązania obwodu magnetycznego i uzwojeń maszyny scalonej: 1 - wirnik zewnętrzny; 2 - wirnik wewnętrzny; 3, 5 - magnesy N; 4, 6 - magnesy S; 7 - żłobki; 8 - uzwojenie; 9 - jarzmo twornika; 10 - indukcja

równoległe i nie leżą na jednej prostej. Tylko część magnesów trwałych jednego i drugiego wirnika uczestniczy w przenoszeniu momentu obrotowego. Przekładnia taka ma małą wartość gęstości przenoszonego momentu, ponadto działa niepożądana siła naciągu magnetycznego, przyciągająca do siebie osie wirników, która jest około 10 razy większa od siły generującej moment obrotowy.

W znanych autorom rozwiązaniach przekładni magnetycznej nie ma możliwości zmiany kierunku wirowania jednej końcówki wału względem drugiej końcówki wału. Nie ma także możliwości wykorzystania przekładni magnetycznej jako hamulca do hamowania wału.

2. Przekładnia magnetyczna

Przekładnia magnetyczna jest zamknięta w obudowie. Przekładnia składa się z wirnika zewnętrznego, wirnika



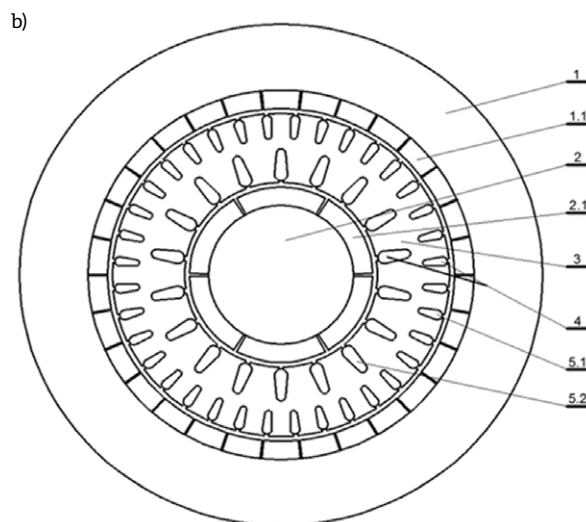
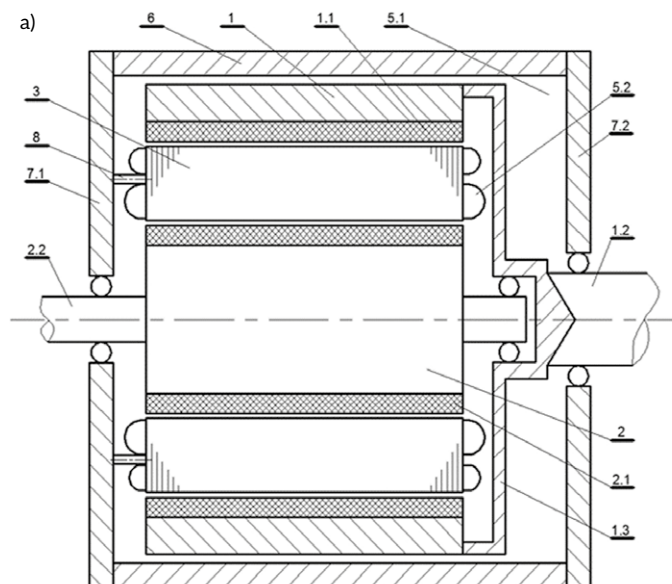
Rys. 3. Przekładnia magnetyczna modelująca przekładnię mechaniczną [3, 4]

wewnętrznego i nieruchomego pierścienia magnetycznego umieszczonego między tymi wirnikami. Jarzma wirnika zewnętrznego i wirnika wewnętrznego są ferromagnetyczne i mogą być lite lub pakietowane. Na jarzmach od strony pierścienia magnetycznego są przymocowane magnesy trwałe. Magnesy trwałe, zamiast na powierzchni, mogą być umieszczone w szczelinach jarzm. Wirnik zewnętrzny jest wolnoobrotowy (n_1), na jego jarzmie jest dużo magnesów trwałych, o liczbie par biegunów p_1 . Wirnik wewnętrzny jest szybkoobrotowy (n_2) i na jego jarzmie jest mniej magnesów trwałych, o liczbie par biegunów p_2 . Stosunek par biegunów determinuje stosunek prędkości obrotowej wirników $\frac{p_2}{p_1} = \frac{n_1}{n_2}$. Pierścień magnetyczny jest pakietowany z blachy ferromagnetycznej izolowanej powierzchniowo (blacha prądnicowa). Pierścień zarówno od strony zewnętrznej, jak i wewnętrznej ma żłobki. W żłobkach są umieszczone uzwojenia. Obudowa przekładni składa się z kadłuba i dwóch tarcz łożyskowych.

Rozwiązanie przekładni magnetycznej według tej koncepcji ma dużą gęstość momentu dochodzącą do $100 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$. Ponadto przekładnia magnetyczna, w odróżnieniu od przekładni zębatej, nie ma oleju i nie ma (poza łożyskami) powierzchni trących. Jest przekładnią ekologiczną, może być stosowana w środowisku zagrażającym wybuchem (kopalnie metanowe, fabryki chemiczne) i w urządzeniach instalowanych na wodzie.

Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne przekładni magnetycznej przedstawiono na rys. 4.

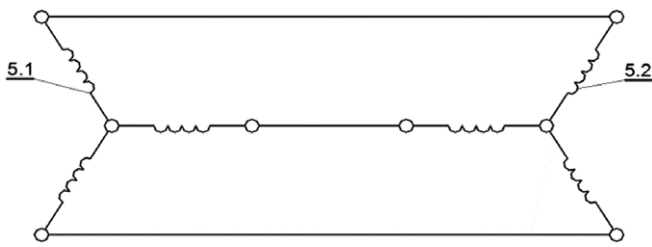
Przekładnia magnetyczna przedstawiona na rys. 4 składa się z wirnika ferromagnetycznego zewnętrznego (1) i z wirnika ferromagnetycznego wewnętrznego (2) usytuowanych koncentrycznie, przy czym w szczelinie między wirnikiem zewnętrznym (1) i wirnikiem wewnętrznym (2) znajduje się tuleja ferromagnetyczna (3) pakietowana z blach. Na powierzchni wewnętrznej wirnika (1) są zamocowane magnesy trwałe (1.1) o liczbie par biegunów p_1 , a na powierzchni zewnętrznej wirnika (2) są zamocowane magnesy trwałe (2.1) o liczbie par biegunów p_2 , przy czym $p_2 < p_1$. Tuleja ferromagnetyczna (3) na obwodzie zewnętrznym i na obwodzie wewnętrznym ma żłobki



Rys. 4. Przekładnia magnetyczna: a) przekrój wzdłużny; b) przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego przekładni

(4), w których są umieszczone uzwojenia: zewnętrzne (5.1) i wewnętrzne (5.2). Tuleja ferromagnetyczna (3) jest przymocowana do tarczy łożyskowej (7.1), od strony wałka (2.2) wirnika (2), korzystnie śrubami poprzez podkładkę dystansową (8). Uzwojenie zewnętrzne (5.1) jest umieszczone w żłobkach (4) na zewnętrznym obwodzie tulei ferromagnetycznej (3) i ma liczbę par biegunów p_1 , równą liczbie par biegunów p_1 wirnika zewnętrznego (1). Uzwojenie wewnętrzne (5.2) jest umieszczone w żłobkach (4) na obwodzie wewnętrznym tulei ferromagnetycznej (3) i ma liczbę par biegunów p_2 , równą liczbie par biegunów p_2 wirnika wewnętrznego (2). Uzwojenia zewnętrzne (5.1) i wewnętrzne (5.2) są ze sobą połączone, jak to pokazano na rys. 5.

Konstrukcja obwodu magnetycznego powinna minimalizować moment zaczepowy. Najprostszą i najskuteczniejszą metodą minimalizacji momentu zaczepowego jest skoszenie



Rys. 5. Schemat połączenia uzwojeń przy pracy jednokierunkowej przekładni

zębów wirnika względem magnesów trwałych. Korzystne jest, ze względu na wykonanie uzwojenia, aby w tulei ferromagnetycznej (3) były żłobki proste wzdłuż pakietu blach, wówczas magnesy trwałe (1.1) i (2.1) powinny być ułożone skośnie wzdłuż obwodu. Skoszenie magnesów (1.1) w wirniku zewnętrznym (1) powinno być równe podziałce żłobkowej τ_1 , a w wirniku wewnętrznym (2) skoszenie magnesów (2.1) powinno być równe podziałce żłobkowej τ_2 . Jeśli podziałka żłobkowa $\tau_1 = \tau_2$ i magnesy trwałe (1.1) i (2.1) są proste wzdłuż obwodu, to skoszenie żłobków (4) można wykonać na tulei ferromagnetycznej (3) wzdłuż obwodu o jedną podziałkę żłobkową.

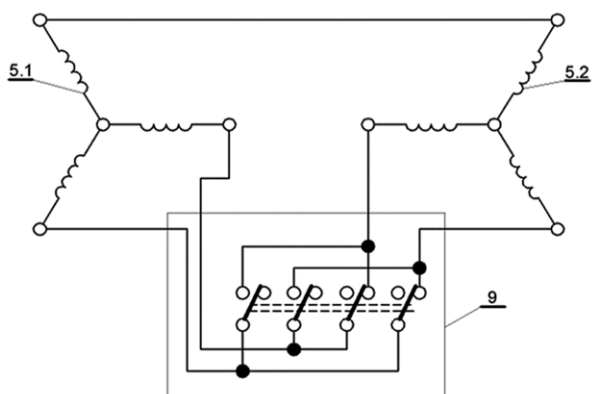
Praca przekładni nie wymaga zasilania. Przekładnia pracuje przy połączonych z sobą uzwojeniach (5.1) i (5.2), jak to pokazano na rys. 5.

Jeżeli przekładnia ma realizować także rewersję prędkości obrotowej, to między dwie fazy uzwojeń (5.1) i (5.2) należy włączyć wyłącznik (9) podwójny czterobiegunowy, który umożliwia krzyżowanie dwóch faz, jak to pokazano na rys. 6. Poprzez krzyżowanie dwóch faz uzwojeń (5.1) i (5.2) zmienia się kierunek obrotów wału (1.2) wirnika zewnętrznego (1) względem wału (2.2) wirnika wewnętrznego (2).

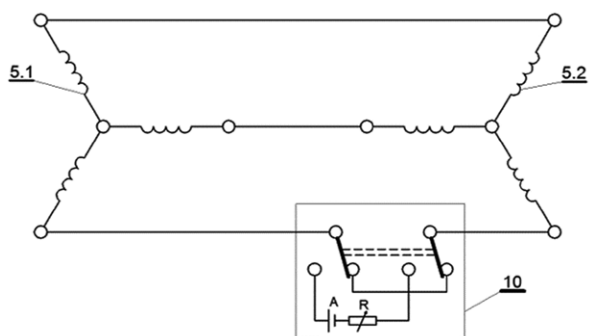
Przekładnia magnetyczna może pracować jako hamulec, to znaczy jeden wirnik stoi, a drugi wirnik jest hamowany. Można tu realizować dwa warianty hamowania: jeden prądnicowy, drugi dynamiczny. W wariantcie prądnicowym korzystnie jest rozłączyć uzwojenia i załączyć rezystory bądź odbierać energię w inny sposób. Ten rodzaj hamowania nie generuje momentu hamującego przy postoju. Hamowanie dynamiczne jest korzystniejsze, gdyż generuje moment hamujący także przy postoju. Hamowanie dynamiczne można zrealizować poprzez włączenie w obwód jednej fazy uzwojeń (5.1) i (5.2) przełącznika (10) jednofazowego trójbiegunowego, jak to pokazano na rys. 7. Wyłącznik umożliwia zarówno zwarcie tych faz przy pracy przekładniowej, jak i pracę hamulcową poprzez włączenie źródła napięcia stałego. Na rysunku 7 źródło napięcia składa się

reklama

reklama



Rys. 6. Schemat połączenia dwóch faz uzwojeń z przełącznikiem podwójnym czterobiegunowym zmieniającym kierunek wirowania



Rys. 7. Schemat połączenia jednej fazy uzwojeń z przełącznikiem trójbiegunowym i ze źródłem napięcia stałego

z akumulatora (A) i rezystora regulacyjnego (R). Poprzez włączenie napięcia stałego w obwód uzwojeń (5.1) i (5.2) uzyskuje się hamowanie dynamiczne wału (1.2) wirnika zewnętrznego (1) względem wału (2.2) wirnika wewnętrznego (2), a energia hamowania wydziela się na rezystorze. Zamiast rezystora można włączyć prostownik sterowany AC/DC i energią hamowania wykorzystać do ładowania akumulatora.

Nieco skomplikowane jest łożyskowanie przekładni magnetycznej, podobnie jak maszyny elektrycznej scalonej z dwoma wirnikami i niezależnymi wałkami. Przekładnia magnetyczna ma obudowę zamkniętą. Obudowa składa się z kadłuba (6) i dwóch nieruchomych tarcz łożyskowych: tarczy (7.1) i tarczy (7.2) oraz trzeciej tarczy (1.3) zamocowanej do wirnika zewnętrznego, jak to pokazano na rysunku 4. Wirnik wewnętrzny (2) ma dwa łożyska: jedno w tarczy nieruchomej (7.1), a drugie w tarczy wirującej (1.3). Wirnik zewnętrzny ma jedno łożysko, musi ono być podwójne, w tarczy nieruchomej (7.2). Konstrukcyjnie jest możliwe umieszczenie drugiego łożyska w tarczy (7.1). Do tarczy (7.1) jest zamocowane jarzmo twornika (3), zatem obudowa łożyska wirnika (1) musiałaby mieć średnicę większą od średnicy, na której są umieszczone

śruby mocujące jarzmo (3). Także łożysko miałyby dużą średnicę, stąd korzystniej jest umieścić dwa łożyska wirnika zewnętrznego (2) na tarczy łożyskowej (7.2).

Podsumowanie

W przekładni magnetycznej stosunek prędkości obrotowej n_2 wału wirnika wewnętrznego do prędkości n_1 wału wirnika zewnętrznego jest równy odwrotności stosunku par biegunów wirników p_2 i p_1 to jest $\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_2}$.

Zaletą przekładni magnetycznej w stosunku do przekładni mechanicznej jest:

- brak (poza łożyskami) elementów ciernych, nie ma oleju i innych smarów, które w czasie eksploatacji zanieczyszczają się i wymagają okresowej wymiany, a przy różnych awariach wylewają się i zanieczyszczają środowisko;
- jedynymi siłami, które działają, są siły obwodowe generujące moment, brak jest sił osiowych i sił promieniowych;
- poprzez krzyżowanie dwóch faz uzwojeń (rys. 3) można zmieniać kierunek obrotów jednego wałka względem wałka drugiego;
- poprzez włączenie w jedną fazę uzwojeń (rys. 4) napięcia stałego uzyskuje się hamowanie dynamiczne jednego wirnika względem drugiego wirnika i hamowanie przy postoju;
- duże momenty dynamiczne generowane w stanach nieustalonych przez silniki napędowe nie niszczą sprzęgła, ponadto sprzęgło nie przenosi momentów udarowych i tym samym zabezpiecza napędzane urządzenia i maszyny robocze;
- sprzęgło nie przenosi drgań z silnika na urządzenie napędzane i odwrotnie oraz blokuje przepływ prądów wałowych indukowanych w silniku do urządzenia napędzanego.

Literatura

- [1] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T., KRÓL E.: *Przekładnia magnetyczna*. Patent RP nr 228975 z dnia 18.05.2018 r.
- [2] KLÄUI E.: *Electrodynamical transmission and a centrifugal pump with transmission of this kind*. Foreign Patent Documents. US 6,217,298 B1. Apr. 17, 2001.
- [3] KOWOL M., KOŁODZIEJ J., ŁUKANISZYN M.: *Analiza pracy przekładni magnetycznej*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 4(104)/2014.
- [4] KOWOL M., KOŁODZIEJ J., ŁUKANISZYN M.: *Optymalizacja pasywnej przekładni magnetycznej*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2(93)/2017.
- [5] MASAKI NAKANO: *Motor/Generator*. United States Patent – US 6,201,331 B1 z 13.03.2001 r.
- [6] QU RONGHAI, JANSEN PATRICK L.: *High torque density electrical machine*. European patent application – EP 2 133 981 A2 z 16.12.2009 r.

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Emil Król
Sieć badawcza Łukasiewicz
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany