

Ograniczanie napięć łożyskowych w maszynach elektrycznych prądu przemiennego zasilanych z przemienników częstotliwości

Tomaz Jarek, Sebastian Berhausen

1. Wstęp

Maszyny elektryczne to od wielu lat jeden z największych odbiorców energii elektrycznej. Znajdują one zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, stanowiąc kluczowe elementy wielu układów napędowych. Trudno również sobie wyobrazić codzienne życie bez możliwości użytkowania podstawowych urządzeń z silnikami elektrycznymi w gospodarstwach domowych. Od kilku lat gwałtownie rozwija się rynek pojazdów elektrycznych – nie tylko samochodów osobowych, ale również pojazdów komunikacji zbiorowej (np. autobusów) i łodzi żeglugi śródlądowej. Rozwój ten możliwy był m.in. dzięki opracowaniu wysokowydajnych silników elektrycznych, w szczególności silników synchronicznych z magnesami trwałymi, które charakteryzują się wysokim stosunkiem mocy do masy, wysoką sprawnością oraz dobrymi parametrami dynamicznymi [1]. Nowoczesne układy napędowe nierzadko pracują przy wysokich prędkościach obrotowych, co wiąże się z koniecznością zasilania uzwojeń stojana napięciem o dużej częstotliwości. W nowoczesnych układach napędowych do zasilania silników z magnesami trwałymi wykorzystuje się przekształtniki energoelektroniczne umożliwiające realizację skomplikowanych strategii sterowania. Najczęściej stosowanymi układami przekształtnikowymi są falowniki oparte na modulacji PWM, w których regulacja parametrów wyjściowych (napięcie, prąd i częstotliwość) dokonywana jest poprzez modulację szerokości impulsów oraz zmianę częstotliwości kluczowania tranzystorów. Taki sposób sterowania umożliwia płynną regulację częstotliwości i amplitudy pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego maszynę elektryczną. Niewątpliwie zalety stosowania falowników doprowadziły do powszechnego ich wykorzystania w napędach elektrycznych, niestety falowniki te wprowadzają do napięcia zasilającego silnik wyższe harmoniczne, które wywołują szereg niekorzystnych zjawisk. Wykorzystanie falowników przyczynia się m.in. do generowania napięć i prądów łożyskowych. Pomiędzy biezniami i elementami tocznymi łożysk występuje niewielka warstwa filmu olejowego. Napięcie łożyskowe może spowodować przebicie warstwy filmu olejowego powodując przepływ prądu w obwodzie złożonym z łożysk, kadłuba i wału maszyny. Z powodu niewielkiej powierzchni styku pomiędzy biezniami i elementami tocznymi, przepływ prądu może osiągać gęstości zagrażające uszkodzeniem powierzchni bieźni. Prąd ten przyczynia się do powstania miejscowych wżerów na powierzchniach bieźni oraz na elementach tocznych łożysk. Dostępna literatura dostarcza

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia związane ze zjawiskami dotyczącymi występowania napięć łożyskowych w maszynach elektrycznych zasilanych z przemienników częstotliwości. Przedmiotem analizy jest metoda bazująca na zastosowaniu uzwojenia ekranującego umieszczonego w klinach łożyskowych stojana. Analizę wpływu uzwojenia ekranującego na przebiegi napięć łożyskowych dokonano na podstawie modeli obwodowych z przekształtnikiem dwupoziomym. Otrzymane wyniki obliczeń wskazują na wysoki potencjał w ograniczaniu napięć łożyskowych.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, napięcia łożyskowe, prądy łożyskowe*

LIMITING BEARING VOLTAGES IN AC ELECTRICAL MACHINES POWERED BY FREQUENCY CONVERTERS

Abstract: In the article issues related to the phenomena of bearing voltages in electrical machines powered by frequency converters are presented. The subject of the analysis is a method based on the use of a shielding winding placed in the slot wedges of the stator. The analysis of the influence of the shielding winding on the bearing voltage waveforms was made on the basis of circuit models with a two-level converter. The obtained calculation results indicate a high potential in reducing bearing voltages.

Keywords: *electrical machines, bearing voltages, bearing currents*

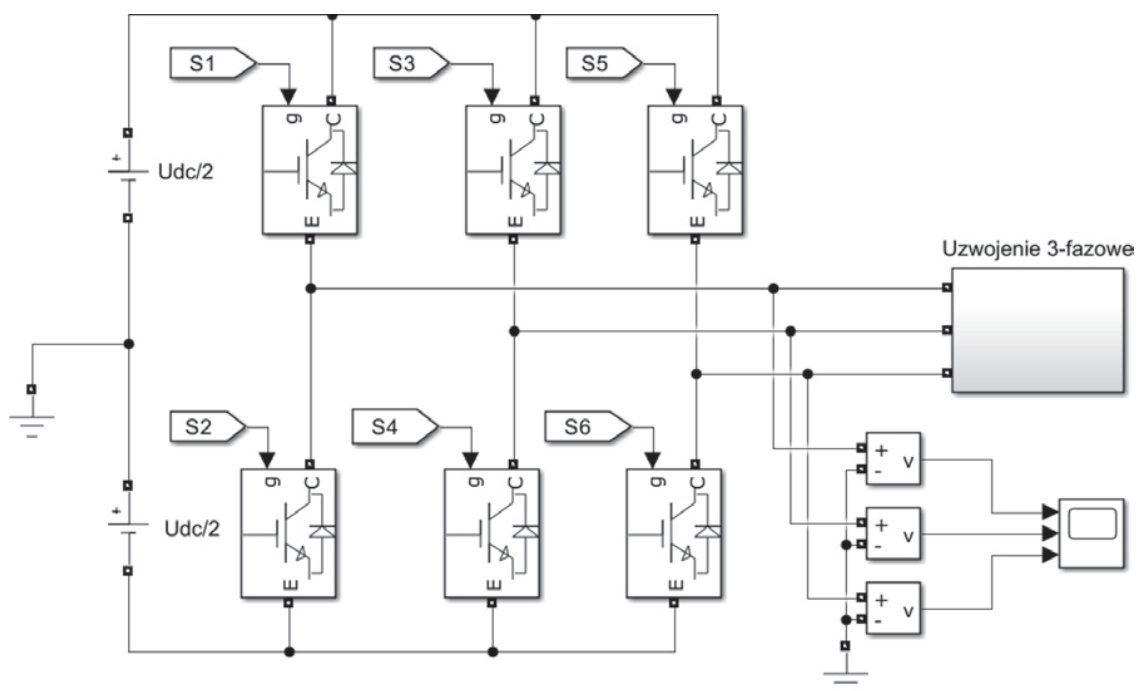
wyczerpujących informacji dotyczących uszkodzeń łożysk kategoryzując przyczyny ich powstawania [2].

Warto podkreślić, że prądy łożyskowe mogą pojawić się nie tylko przy zasilaniu silników z przekształtnika energoelektronicznego, ale również mogą się pojawić przy zasilaniu maszyn elektrycznych napięciem sinusoidalnym, przy czym mechanizmy indukowanych prądów łożyskowych dla każdego z tych przypadków są odmienne. Przy zasilaniu maszyny napięciem sinusoidalnym prądy łożyskowe charakteryzują się niską częstotliwością ($f_s < 1$ kHz) i występują w maszynach z asymetrią w obwodzie elektromagnetycznym. Asymetria ta może być spowodowana m.in. przez asymetrię szczeliny powietrznej (statyczną lub dynamiczną), uszkodzeniem magnesów umieszczonych w wirniku lub zwarcie blach stojana [3].

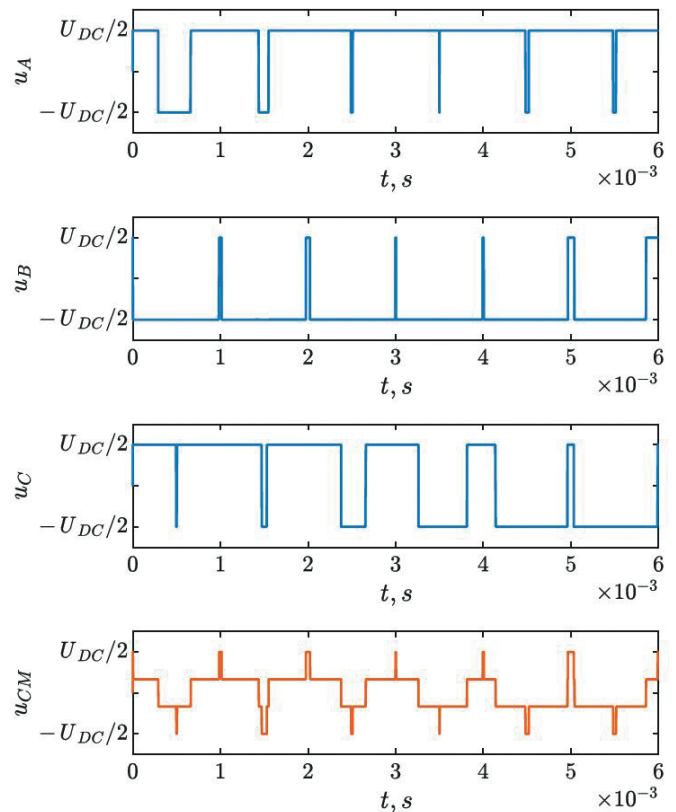
W przypadku maszyn zasilanych z przemienników częstotliwości, główną rolę odgrywa interakcja szybkozmiennego napięcia niezrównoważenia występującego w punkcie gwiazdowym uzwojenia z układem pojemności wewnątrz maszyny [4]. W obu przypadkach prądy łożyskowe mogą spowodować poważne uszkodzenia bieżni i elementów tocznych. Intensywność uszkodzeń w głównej mierze zależy od natężenia prądu łożyskowego, czasu jego trwania, obciążenia łożyska i prędkości obrotowej. Dlatego zagadnienia związane z metodami ograniczania napięć łożyskowych w maszynach elektrycznych są wciąż rozwijane. Mając na uwadze, że zdecydowana większość maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi współpracuje z przemiennikami częstotliwości, w artykule skoncentrowano się na metodzie ograniczania napięć i prądów łożyskowych przy zasilaniu z falownika.

2. Napięcia i prądy łożyskowe w maszynach elektrycznych zasilanych z falowników

Zdecydowana większość współcześnie wykorzystywanych falowników pracuje z modulacją szerokości impulsów PWM, do realizacji której wykorzystuje się najczęściej metodę modulacji wektora przestrzennego SVM (Space Vector Modulation). Polega ona na formowaniu napięcia wyjściowego falownika przy użyciu zależności wektorowych. W przypadku dwupoziomowego przekształtnika energoelektronicznego, każdy ze stanów pracy układu odwzorowywany jest za pomocą wektorów napięcia: sześciu wektorów aktywnych oraz dwóch wektorów zerowych. W algorytmie SVM wektor zadanego napięcia wyjściowego falownika jest generowany dla każdego okresu przełączeń tranzystorów jako kombinacja wektorów zerowych oraz dwóch sąsiednich wektorów aktywnych. Opracowany na potrzeby badań model 2-poziomowego przekształtnika przedstawiono na rysunku 1. Otrzymane w wyniku symulacji modelu przebiegi napięć na wyjściu przekształtnika przedstawiono na rysunku 2.

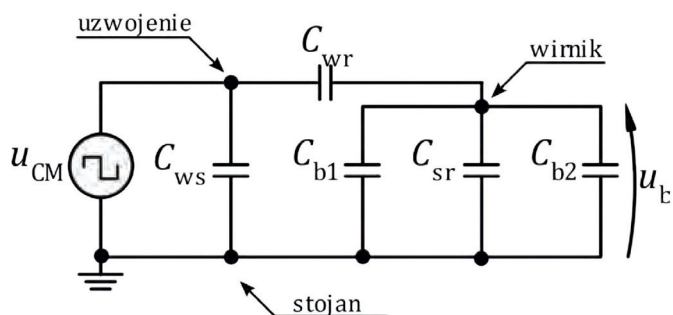


Rys. 1. Obwodowy model symulacyjny 2-poziomowego przekształtnika DC/AC

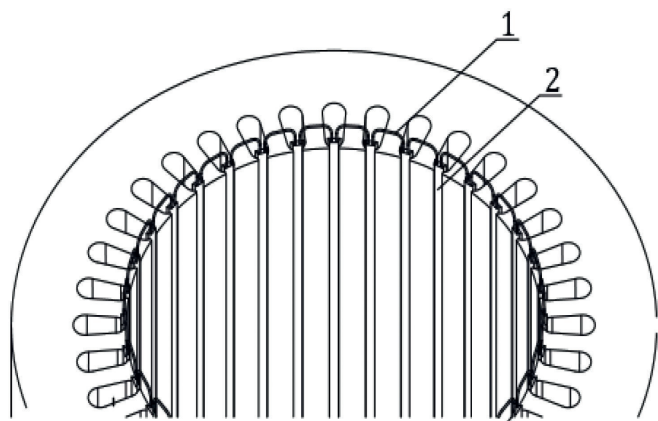


Rys. 2. Przykładowe przebiegi napięć na zaciskach wyjściowych dwupoziomowego przekształtnika DC/AC oraz napięcie niezrównoważenia u_{CM}

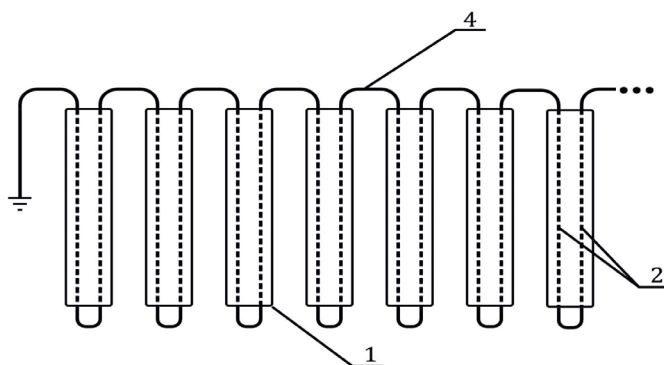
Napięcia na poszczególnych fazach uzwojenia u_A , u_B i u_C przyjmują wartości zależne od napięcia w układzie pośredniczącym U_{DC} : $U_{DC}/2$ lub $-U_{DC}/2$. Wynikiem tak uformowanych napięć na wyjściu falownika jest obecność niezerowego napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia nazywanego napięciem



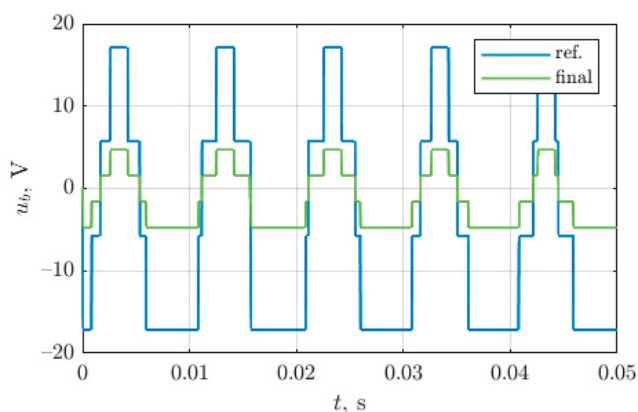
Rys. 3. Schemat zastępczy pojemności wewnętrznych maszyny elektrycznej



Rys. 4. Uzwojenie ekranujące (1) rozmieszczone wewnątrz klinów żłobkowych stojana (2)



Rys. 5. Przykładowe połączenie drutów ekranujących (2) rozłożonych w klinach żłobkowych (1)



Rys. 7. Porównanie napięć łożyskowych u_b wyznaczonych symulacyjnie dla przypadku referencyjnego (ref.) oraz przypadku zastosowania uzwojenia ekranującego w klinach żłobkowych (final)

niezrównoważenia u_{CM} , którego wartość jest równa wartości średniej napięć w poszczególnych fazach. Napięcie niezrównoważenia w przypadku zasilania maszyny z dwupoziomowego przekształtnika ma kształt krzywej schodkowej o częstotliwości równej częstotliwości przełączeń tranzystorów i stromości wynikającej z szybkości przełączeń. Napięcie u_{CM} przyjmuje wartości: $-U_{DC}/2$, $-U_{DC}/6$, $U_{DC}/6$ i $U_{DC}/2$, przy czym amplitudy przypadają na wektory zerowe.

Duża stromość napięcia du_{CM}/dt w punkcie neutralnym uzwojenia stojana pobudza sprzężenia pojemnościowe występujące w maszynie elektrycznej odgrywając istotną rolę w mechanizmie generowania prądów łożyskowych. Uzwojenia stojana maszyny elektrycznej są odizolowane od pakietu blach stojana, podobnie i wirnik jest praktycznie odizolowany od pozostałych elementów konstrukcyjnych dzięki obecności filmu olejowego w łożyskach. W konsekwencji w silniku powstaje układ pojemności pomiędzy jego elementami konstrukcyjnymi, które w dalszej części artykułu umownie nazwano pojemnościami wewnętrznymi maszyny. Elektrodamy tych pojemności wewnętrznych są uzwojenia stojana oraz pakiet blach stojana i wirnika, a ich dielektrykami są m.in. izolacja żłobkowa, szczelina powietrzna oraz film olejowy w łożyskach. W uproszczonym modelu maszyny elektrycznej można wyróżnić pojemności: C_{ws} – pojemność pomiędzy uzwojeniem stojana a uziemionym stojanem, C_{wr} – pojemność pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem, C_{sr} – pojemność pomiędzy wirnikiem a uziemionym stojanem, C_{b1} i C_{b2} – pojemności łożysk od strony napędowej i przeciwnapędowej [5]. Schemat zastępczy uwzględniający wspomniane pojemności wewnętrzne przedstawiono na rysunku 3.

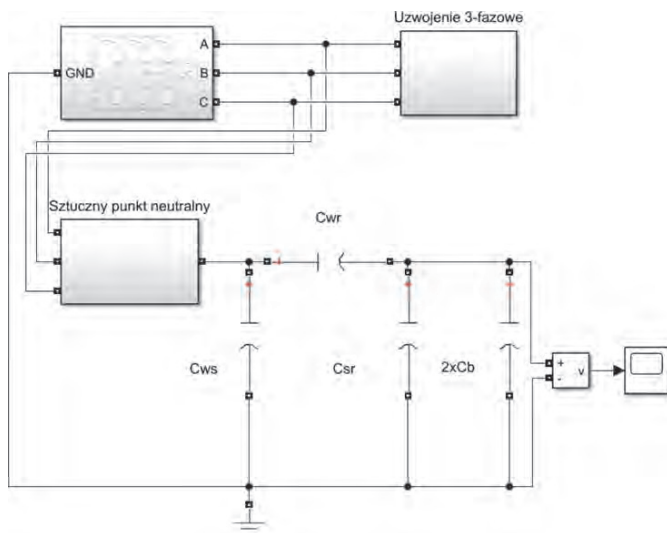
Jak wynika z powyższego schematu, wartość napięcia łożyskowego u_b jest uzależniona od pojemności wewnętrznych, a w szczególności od pojemności występującej pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem C_{wr} .

3. Zastosowanie uzwojeń ekranujących

Proponowana przez autorów koncepcja polega na zastosowaniu specjalnych klinów zamykających żłobek stojana, w których na całej długości znajdują się druty miedziane. Druty te łączone mogą być np. w szereg, tworząc w ten sposób specjalne uzwojenie ekranujące, którego jeden zacisk jest połączony do uziemionego kadłuba. Takie rozwiązanie cechuje się m.in. następującymi zaletami: druty są równomiernie rozłożone w klinach na całej długości otwarcia żłobka rdzenia stojana, a także są zabezpieczone przed przypadkowym zbliżeniem się do uzwojenia stojana będącego pod napięciem. Koncepcja oraz przykładowe połączenie drutów znajdujących się w klinach żłobkowych przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

4. Analiza wpływu uzwojeń ekranujących na pojemności wewnętrzne maszyny

Analizę wpływu zastosowania uzwojenia ekranującego umieszczonego w klinach żłobkowych przeprowadzono na modelu obwodowym przedstawianym na rysunku 6. Zastosowany w nim przekształtnik jest analogiczny do modelu przedstawionego na rysunku 1. Do sztucznie wytworzonego punktu neutralnego podłączono dzielnik napięcia składający się z pojemności C_{wr} , C_{ws} , C_{sr} i C_b , który posłużył do



Rys. 6. Model symulacyjny do wyznaczania napięcia łożyskowego w maszynie elektrycznej zasilanej z przekształtnika energoelektronicznego

wyznaczenia napięcia łożyskowego u_b . Analizę porównawczą przeprowadzono dla dwóch wariantów: referencyjnego oraz przypadku z zastosowanym uzwojeniem ekranującym umieszczonym wewnątrz klinów żłobkowych. Wartości pojemności wewnętrznych dla poszczególnych przypadków wyznaczono na podstawie obliczeń modelu połowego FEM uwzględniającego parametry materiałowe oraz wymiary geometryczne maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi o wzniosie 132 mm [6]. Wartości pojemności zestawiono w tabeli 1. Wartość napięcia w obwodzie pośredniczącym przekształtnika U_{DC} wynosi 565 V.

Tabela 1. Wartości pojemności wewnętrznych analizowanych przypadków

| Pojemność | Model referencyjny | Model z uzw. ekranującym |
|-----------|--------------------|--------------------------|
| Cwr | 33,84 pF | 8,05 pF |
| Cws | 4921 pF | 4860 pF |
| Csr | 324 pF | 277 pF |

Tak przygotowany obwodowy model symulacyjny wykonany w oprogramowaniu Matlab Simulink posłużył do wyznaczenia przebiegów napięć łożyskowych u_b . Otrzymane wyniki zostały przedstawione na rysunku 7. Wynika z nich, że zastosowanie uzwojenia ekranującego umieszczonego w klinach żłobkowych maszyny elektrycznej zasilanej z przekształtnika energoelektronicznego znacząco (ponad 3-krotnie) przyczyniło się do obniżenia amplitudy napięcia łożyskowego, co ma kluczowy wpływ na zwiększenie niezawodności pracy maszyny. Wyniki symulacji potwierdzają skuteczność ograniczania napięcia łożyskowego poprzez obniżanie pojemności wewnętrznej C_{wr} występującej pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem.

5. Podsumowanie

Źródłem napięcia łożyskowego jest przede wszystkim asymetryczny charakter napięcia występującego podczas zasilania maszyny z przekształtnika energoelektronicznego. Chcąc ograniczyć negatywne skutki z tym związane w artykule zaproponowano zastosowanie w maszynie uzwojenia ekranującego umieszczonego w klinach żłobkowych. Zasadniczą zaletą proponowanego rozwiązania jest brak potrzeby przeprojektowania rdzenia magnetycznego maszyny.

Jedyną zasadniczą zmianą jest wyposażenie maszyny w kliny żłobkowe stojana, w których znajdują się druty, co z technologicznego punktu widzenia jest zadaniem stosunkowo łatwym do wykonania. Za takim rozwiązaniem przemawiają także względy techniczne – uziemione uzwojenie ekranujące jest zabezpieczone przed zwarcie do uzwojenia głównego znajdującego się w żłobkach pakietu stojana.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych wykazały korzystny wpływ zastosowania uzwojenia ekranującego umieszczonego w klinach żłobkowych na wartość napięcia łożyskowego.

W perspektywie dalszych badań planuje się przebadanie skuteczności proponowanego rozwiązania w warunkach laboratoryjnych na prototypowych modelach badawczych.

Literatura

- [1] E. KRÓL, T. WOLNIK: *Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych – właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika*, „Maszyny Elektryczne” – Zeszyty Problemowe, Nr 2, s. 147 – 151, 2021.
- [2] SKF *Bearing Maintenance Handbook*.
- [3] S. BERHAUSEN, T. JAREK: *Method of Limiting Shaft Voltages in AC Electric Machines*, *Energies*, 3326, 2021.
- [4] J. GUZINSKI: *Common-Mode Voltage and Bearing Currents in PWM Inverters: Causes, Effects and Prevention*, *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, 2014, s. 664 – 694.
- [5] B. KULESZ, S. BERHAUSEN, T. JAREK: *Prądy łożyskowe i napięcia wałowe w maszynach elektrycznych – przyczyny i sposoby przeciwdziałania*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 6, s. 92 – 97, 2021.
- [6] S. BERHAUSEN, T. JAREK: *Analysis of Impact of Design Solutions of an Electric Machine with Permanent Magnet for Bearing Voltages with Inverter Power Supply*, *Energies*, 4475, 2022.

mgr inż. Tomasz Jarek – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec
dr inż. Sebastian Berhausen – Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice