

Tomasz Jarek

**Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Sebastian Berhausen, Politechnika Śląska, Gliwice**

NAPIĘCIA I PRĄDY ŁOŻYSKOWE W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH

BEARING VOLTAGES AND CURRENTS IN ELECTRICAL MACHINES

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące zjawiska napięć i prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych. Omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące przyczyn występowania zjawisk zarówno w przypadku zasilania maszyny bezpośrednio z sieci jak i przy zasilaniu z przekształtników energoelektrycznych. Zaprezentowano również nowe metody ograniczania napięć łożyskowych bazujące na dodatkowym uzwojeniu pomocniczym nawiniętym wokół jarzma stojana oraz na uzwojeniu ekranującym umieszczonym wewnątrz klinów żłobkowych stojana.

Abstract: The article presents basic information on the phenomenon of bearing voltages and currents in electrical machines. The basic issues concerning the causes of the described phenomena were discussed, both in the case of powering the machine directly from the AC grid as well as in the case of powering from power electronic converters. New methods of limiting bearing voltages were also presented: based on an additional auxiliary winding wound around the stator yoke and on a shielding winding located inside the stator slot wedges.

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

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

1. Wstęp

W maszynach elektrycznych, jak w każdym innym urządzeniu, występuje szereg negatywnych zjawisk o charakterze destrukcyjnym. Jednym z nich są napięcia i prądy łożyskowe. Łożyska są wrażliwe na uszkodzenia powierzchni bieżni oraz elementów tocznych. Nawet niewielkie ślady i niedoskonałości tych powierzchni (np. w postaci wżerów, prążków, wytarć, korozji itp.) mogą skutkować wyłączeniem maszyny z jej dalszej eksploatacji. W przypadku współpracy maszyny elektrycznej z innym urządzeniem mechanicznym, np. przekładnią, prąd łożyskowy może się zamykać poprzez wał oraz inne łożyska wchodzące zainstalowane w układzie napędowym przyczyniając się do ich uszkodzeń. Czas bezawaryjnej pracy łożysk silnie zależy od gęstości prądu w miejscu przebicia filmu olejowego. Przyspieszone zużycie łożysk jest spowodowane lokalnym wytapianiem bieżni i elementów tocznych, gdy wydzielana lokalnie energia cieplna jest zbyt duża. Opisywane zjawiska występują w mniejszym lub większym stopniu prawie w każdej maszynie elektrycznej wirującej: zarówno w maszynach prądu przemiennego, jak i w maszynach prądu stałego.

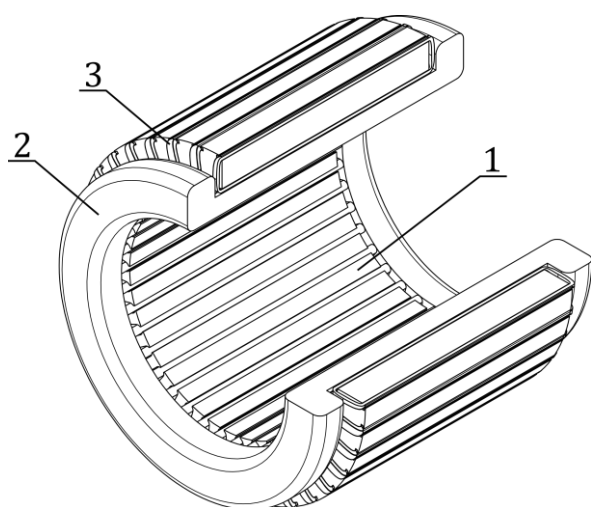
Dostępne opracowania naukowo-techniczne dość szeroko opisują potencjalne przyczyny wy-

stępowania napięć wałowych w maszynach elektrycznych kategoryzując ich charakter. Podstawowym kryterium podziału przyczyn generowania napięć wałowych w maszynach elektrycznych jest sposób ich zasilania. Przy zasilaniu maszyny napięciem sinusoidalnym i z przekształtnika energoelektrycznego występują odmienne mechanizmy generowania napięć i prądów łożyskowych [1].

2. Przyczyny występowania prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym oraz sposoby ich eliminacji

Jedną z głównych przyczyn generowania się napięcia wałowego w maszynie zasilanej z sieci jest asymetria obwodu elektromagnetycznego [2]. Spowodowana ona może być m.in. przez: asymetrię szczeliny powietrznej, nierównomierną szczelinę powietrzną wzdłuż osi maszyny spowodowaną wygięciem wirnika, niedokładności w wykonaniu obwodu elektromagnetycznego, anizotropię blach pakietu, asymetrię spowodowaną zwarciami blach stojana lub wirnika, zwarcia zwojowe w uzwojeniach, uszkodzenia klatki maszyny indukcyjnej. Asymetria ta może być przyczyną występowania strumienia

okrężnego zamykającego się w jarzmie stojana, pod wpływem którego wzdłuż wału indukuje się siła elektromotoryczna. Jednym ze sposobów eliminacji prądów wałowych w maszynach elektrycznych jest zastosowanie łożysk ceramicznych (w których zarówno bieżnie jak i elementy toczne są ceramiczne) lub hybrydowych (tylko elementy toczne są wykonane z materiału ceramicznego). W łożyskach tych uzyskujemy dużą barierę dielektryczną na drodze wał – łożyska – tarcze łożyskowe – kadłub. Kolejnym sposobem jest wykorzystanie uzwojenia pomocniczego nawiniętego wokół jarzma stojana, jak przedstawiono na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Stojan maszyny elektrycznej (1) z uzwojeniem głównym (2) i uzwojeniem dodatkowym nawiniętym wokół jarzma stojana (3)

Asymetria strumienia magnetycznego w obwodzie maszyny skutkuje wyindukowaniem się napięcia na zaciskach otwartego uzwojenia pomocniczego. Po jego zwarciu płynie prąd, który kompensuje strumień okrężny w jarzmie stojana ograniczając w ten sposób napięcie na wale maszyny. Na podstawie pomiarów wykonanych na prototypie maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi oraz symulacji przeprowadzonych przy wykorzystaniu FEM wykazano, że takie rozwiązanie zmniejszyło około 3-krotnie wartość napięcia na wale.

3. Przyczyny występowania prądów łożyskowych przy zasilaniu falownikowym i sposoby ich ograniczania

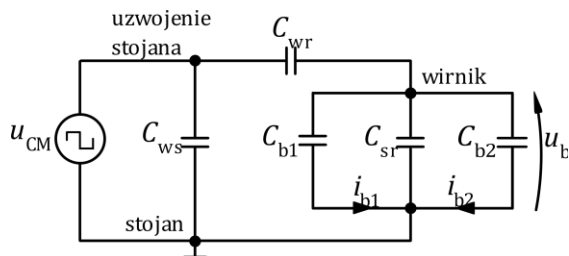
W przypadku zasilania maszyn z przekształtników energoelektronicznych, w punkcie neutralnym uzwojenia maszyny odniesionym do potencjału ziemi (przewodu ochronnego) występuje

niezerowe napięcie niezrównoważenia, które jest uśrednioną sumą wartości chwilowych napięć na wyjściu przemiennika częstotliwości. Najczęściej stosowanymi falownikami w układach napędowych z maszynami indukcyjnymi i synchronicznymi są trójgałęziowe dwupoziomowe falowniki napięcia. W falownikach tych napięcie stałe z obwodu pośredniczącego jest przełączane przez dwustanowe elementy mocy falownika. Każda gałąź trójfazowego falownika może przyjmować dwa różne stany pracy przy czym w danej chwili czasu jest włączony jeden z dwóch zaworów mocy gałęzi falownika. Zatem trzy gałęzie falownika mogą generować 8 możliwych kombinacji, reprezentowanych przez 8 oddzielnych wektorów napięcia na wyjściach mocy falownika. Napięcie niezrównoważenia ma postać schodkowej funkcji czasu o wartości maksymalnej równej połowie wartości napięcia z obwodu pośredniczącego prądu stałego U_{DC} i częstotliwości uzależnionej od częstotliwości przełączeń zaworów. Zastosowanie zaworów o krótkich czasach przełączeń (np. tranzystorów IGBT) skutkuje dużymi stromościami zmian napięć wyjściowych falownika oraz napięcia niezrównoważenia dochodzące do $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$, w szczególności w przypadkach zastosowania przekształtników opierających się na technologii SiC. Szybki przyrost napięcia du_{CM}/dt w punkcie neutralnym uzwojenia stojana pobudza sprzężenia pojemnościowe występujące w maszynie elektrycznej odgrywając w ten sposób kluczową 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 umownie nazywa się 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.

Topologię i połączenie tych pojemności w postaci schematu zastępczego o parametrach skupionych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy pojemności wewnętrznych maszyny elektrycznej

Wartości pojemności uzależnione są od wymiarów geometrycznych maszyny, ukształtowania uzwojeń, a także od parametrów dielektrycznych zastosowanej izolacji żłobkowej stojana oraz wymiarów i rodzaju zastosowanych łożysk.

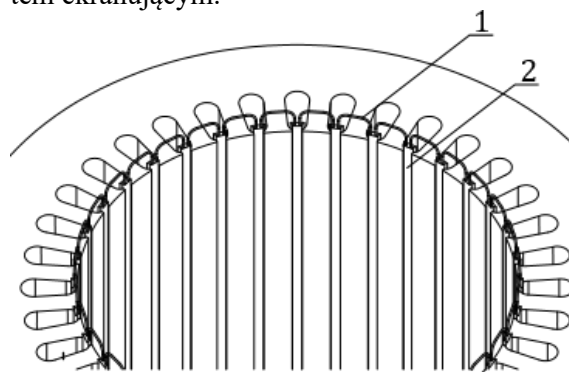
Ze schematu zastępczego przedstawionego na rys. 2 wynika, że źródłem napięcia występującego pomiędzy biegniami łożyska u_b jest napięcie niezrównoważenia u_{CM} . Stosunek tych napięć (ang. BVR - Bearing Voltage Ratio) określa równanie (1):

$$BVR = \frac{u_b}{u_{CM}} = \frac{C_{wr}}{C_{b1} + C_{b2} + C_{sr} + C_{ws}} \quad (1)$$

Z równania (1) wynika, że napięcie łożyskowe jest wprost proporcjonalne do pojemności wewnętrznej występującej pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem. W konsekwencji jednym ze sposobów ograniczania napięć łożyskowych jest jej minimalizacja poprzez modyfikacje konstrukcyjne maszyny polegające na zmianie grubości szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem i wirnikiem. Należy mieć świadomość, że takie rozwiązanie może niekorzystnie wpłynąć na parametry eksploatacyjne maszyny. Zmniejszenie pojemności wewnętrznej C_{wr} można również dokonać oddalając uzwojenie umieszczone w żłobkach stojana od wirnika.

Sposób ograniczania napięcia łożyskowego polegający na zmniejszaniu pojemności pomiędzy uzwojeniem stojana i wirnikiem można również zrealizować poprzez umieszczenie przewodnika w przestrzeni otwarcia żłobka stojana. Proponowana przez autorów idea [4] polega na umieszczeniu co najmniej jednego miedzianego drutu wewnątrz klinów umieszczonych we wszystkich żłobkach stojana tak jak przedstawiono na rysunku 3. Poszczególne druty są

umieszczone na całej długości klina i są połączone szeregowo tworząc jedno uzwojenie a ich połączenia czołowe mogą być zrealizowane poprzez lutowanie. Co ważne, jeden koniec tak utworzonego uzwojenia jest uziemiony. W zależności od wymiarów geometrycznych klina, można zastosować większą liczbę drutów ekranujących. W przedstawionym rozwiązaniu klin nie tylko zabezpiecza uzwojenie stojana przed wypadnięciem ale również pełni rolę izolacji pomiędzy uzwojeniem stojana i uziemionym drutem ekranującym.



Rys. 3. Uzwojenie ekranujące (1) rozmieszczone wewnątrz klinów żłobkowych stojana (2)

Skuteczność proponowanego rozwiązania ograniczającego pojemność wewnętrzną C_{wr} , a co za tym idzie, wartość napięcia łożyskowego w maszynie elektrycznej została potwierdzona przy wykorzystaniu dwuwymiarowego modelu polowego FEM. Zastosowanie uzwojenia ekranującego w klinach żłobkowych stojana przedstawionego na rysunku 3 pozwoliło obniżyć wartość pojemności C_{wr} z 19 pF do 1,2 pF, co oznacza ograniczenie napięcia łożyskowego o 93%.

4. Podsumowanie

Zagadnienia dotyczące zjawisk napięć i prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych ciągle pozostają w obszarze zainteresowania inżynierów i konstruktorów. Świadczy o tym m.in. liczba interesujących artykułów, które zostały opublikowane w ostatnich latach. Aktualnie trwają dalsze prace badawcze nad rozwijaniem opisanych autorskich metod ograniczania zjawiska napięć i prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych.

5. Literatura

- [1]. B. Kulesz, S. Berhausen, T. Jarek "Prądy łożyskowe i napięcia wałowe w maszynach elektrycznych – przyczyny i sposoby przeciwdziałania", *Przegląd Elektrotechniczny*, 06/2021, str. 92 -97, 2021.

- [2]. A. Polak, T. Jarek "Sposób tłumienia prądów wałowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2017 (114)* str. 243 -246, 2017.
- [3]. S. Berhausen, T. Jarek „Method of Limiting Shaft Voltages in AC Electric Machines”, *Energies*, 3326, 2021.
- [4]. 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.