

Zastosowanie uzwojenia pomocniczego do tłumienia napięć wałowych

Tomasz Jarek, Sebastian Berhausen

1. Wstęp

Maszyny elektryczne występują w każdej gałęzi przemysłu – począwszy od maszyn elektrycznych małej mocy wykorzystywanych w urządzeniach gospodarstwa domowego, poprzez silniki napędowe w pojazdach elektrycznych aż po kilkomegawatowe maszyny pracujące w kluczowych gałęziach przemysłu. Występujące awarie maszyn elektrycznych wiążą się często z koniecznością zatrzymania całego układu napędowego, niosąc ze sobą straty finansowe. Jednym z negatywnych zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych wirujących, mających charakter pasożytniczy i destrukcyjny, jest przepływ prądów wałowych. Źródłem prądów wałowych jest indukowana wzdłuż wału siła elektromotoryczna zwana napięciem wałowym. Prądy wałowe mogą przepływać zarówno przez łożyska silnika, jak i przez połączone ze sobą mechanicznie czopy wałów silnika i układu napędowego. Konsekwencją przepływu tych prądów są m.in. uszkodzenia bieżni łożysk i ich elementów tocznych, czopów wałów, sprzęgieł, przekładni. Uszkodzenia łożysk są wynikiem pojawiających się w toku eksploatacji wżerów przypominających kratery, z kolei na łączonych ze sobą czopach wałów uwidaczniają się silne ślady elektrokorozji [1]. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe skutki wywołane przepływem prądu przez wał maszyny. Zjawiska te w przeważającej większości przypadków zachodzą w maszynach prądu przemiennego [2, 3], lecz w opracowaniach naukowo-technicznych można znaleźć przypadki negatywnego działania prądów wałowych w maszynach prądu stałego [4].



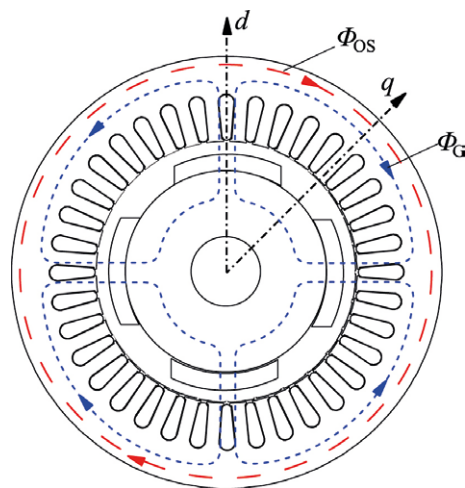
Rys. 1. Uszkodzenia powierzchni czopa wału spowodowane przepływem prądu wałowego

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję sposobu eliminacji napięć i prądów wałowych w maszynach synchronicznych z magnesami trwałymi. Metoda ta bazuje na zastosowaniu pomocniczego uzwojenia kompensującego zmienny w czasie okrotny strumień magnetyczny występujący w jarzmie obwodu elektromagnetycznego. Na podstawie pomiarów laboratoryjnych przeprowadzonych na prototypowym silniku przebadano wpływ dodatkowego uzwojenia nawiniętego w jarzmie stojana na wartości napięć i prądów wałowych.

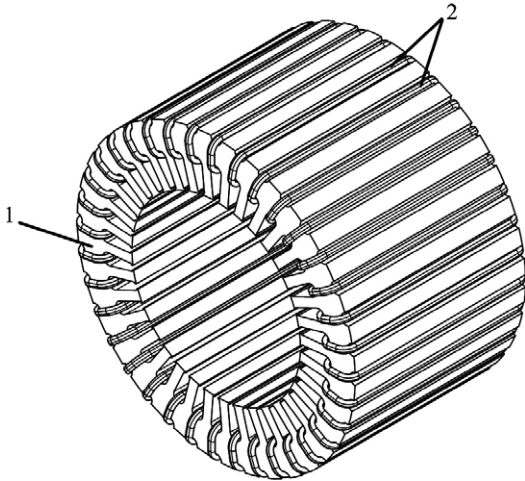
Do głównych przyczyn występowania napięć i prądów wałowych w maszynie elektrycznej można zaliczyć [5]:

- asymetrię obwodu elektromagnetycznego (asymetria rdzenia, asymetria uzwojenia, asymetria magnesów trwałych);
- asymetrię zasilania (w przypadku pracy silnikowej) lub asymetrię odbiornika (w przypadku pracy generatorowej);
- asymetrię szczeliny powietrznej (ekscentryczność statyczna lub/i dynamiczna).

Powyższe czynniki są przyczyną występowania zmiennego w czasie strumienia magnetycznego w jarzmie stojana [6, 7]. Strumień okrotny w obwodzie elektromagnetycznym maszyny został przedstawiony na rysunku 2 (na przykładzie maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi). Strumień ten nie bierze udziału w przetwarzaniu energii w maszynie elektrycznej.



Rys. 2. Obwód elektromagnetyczny maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi: Φ_G – strumień główny; Φ_{OS} – strumień okrotny w jarzmie stojana



Rys. 3. Umiejscowienie uzwojenia pomocniczego (2) w pakiecie stojana (1)

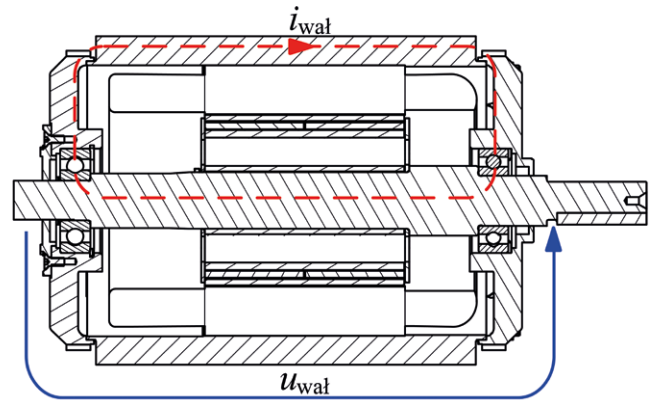
2. Wykorzystanie uzwojenia pomocniczego w celu tłumienia strumienia okrężnego

Prezentowany w artykule sposób tłumienia napięć i prądów wałowych polega na wyposażeniu maszyny w dodatkowe, pomocnicze uzwojenie toroidalnie. Uzwojenie to nawinięte jest wokół jarzma stojana w taki sposób, że jedne boki zezwojów leżą na dnie żłobków trójfazowego uzwojenia stojana, z kolei drugie boki tego uzwojenia leżą w niewielkich żłobkach na zewnętrznej, cylindrycznej powierzchni pakietu stojana. Umieszczenie uzwojenia pomocniczego w pakiecie blach stojana poglądowo zilustrowano na rysunku 3. Poszczególne zezwoje uzwojenia pomocniczego są połączone jednoimiennie w szereg, tworząc jedno pasmo. Każdy zezwój uzwojenia pomocniczego ma taką samą liczbę zwojów.

Zezwoje uzwojenia pomocniczego nawinięte w sposób przedstawiony na rysunku 3 obejmują tylko strumień magnetyczny w jarzmie stojana. Podczas pracy maszyny w poszczególnych zezwojach uzwojenia pomocniczego indukuje się siła elektromotoryczna zależna od liczby zwojów oraz charakteru strumienia. Na zaciskach całego uzwojenia, składającego się z szeregowo połączonych jednoimiennie zezwojów, pojawia się napięcie u_{up} będące sumą geometryczną napięć w poszczególnych zezwojach uzwojenia. W przypadku symetrii strumienia magnetycznego w stojanie maszyny w uzwojeniu pomocniczym nie indukuje się żadne napięcie. Przypadek wyindukowania się napięcia na zaciskach uzwojenia pomocniczego świadczy o występowaniu okrężnego strumienia magnetycznego w jarzmie stojana. W przypadku zwarcia zacisków uzwojenia pomocniczego pod wpływem wyindukowanego napięcia popłynie prąd, który będzie przeciwdziałał i tłumił okrężny strumień w jarzmie stojana, konsekwencją czego będzie ograniczenie generowania się napięć wałowych w maszynie.

3. Pomiary laboratoryjne

W celu potwierdzenia koncepcji tłumienia strumienia okrężnego na potrzeby badań laboratoryjnych zaprojektowano i wykonano prototyp trójfazowej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi. W 36 żłobkach stojana rozłożono



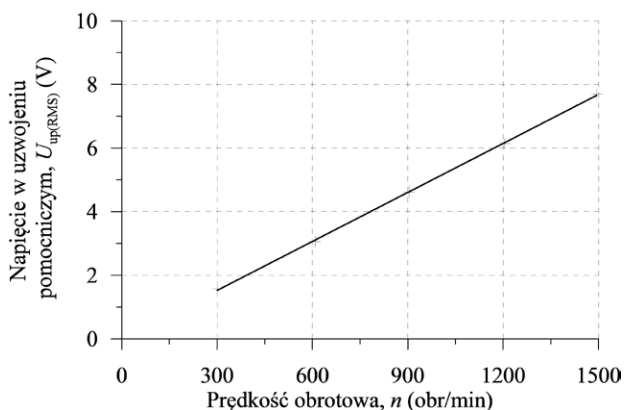
Rys. 4. Ilustracja prądu wałowego i napięcia pomiędzy czopami wału (łożyska nieizolowane)

trójfazowe jednowarstwowe uzwojenie połączone w gwiazdę. Wokół jarzma stojana zostało nawinięte uzwojenie pomocnicze, jak pokazano na rysunku 3. Na powierzchni wirnika naklejono neodymowe magnesy trwałe tworzące 4 bieguny magnetyczne ($p = 2$). Zarówno od strony napędowej, jak i przeciwnapędowej zastosowano standardowe łożyska nieizolowane. Badana maszyna synchroniczna charakteryzuje się następującymi parametrami znamionowymi: $U_N = 400$ V; $I_N = 4,4$ A; $P_N = 3$ kW; $f_N = 50$ Hz.

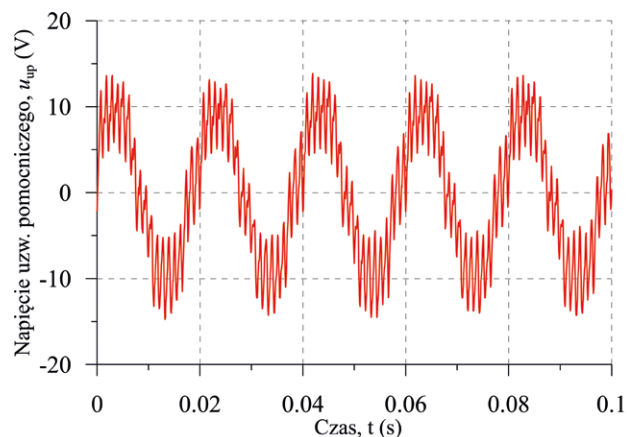
Badania opisanej maszyny przeprowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym w pomocniczą maszynę prądu stałego (wykorzystaną jako maszynę napędzającą) oraz oscyloskop cyfrowy wraz z sondami i przetwornikami, a także precyzyjny analizator mocy. Sprzęgnięcie maszyny badanej z pomocniczą zrealizowano za pomocą sprzęgieł kłowych z elastyczną przekładką dielektryczną.

W pierwszej kolejności badania laboratoryjne obejmowały pomiary przy biegu jałowym generatora synchronicznego odpowiednio przy rozwartym i zwartym uzwojeniu pomocniczym. Każdorazowo pomiary te przeprowadzano dla różnych prędkości wirowania, rozpoczynając od prędkości $n = 300$ obr./min, a kończąc przy prędkości znamionowej $n_N = 1500$ obr./min. Dla uzwojenia pomocniczego rozwartego rejestrowano napięcie generowane w tym uzwojeniu u_{up} oraz napięcie pomiędzy czopami wału $u_{wał}$. Po zwarceniu uzwojenia pomocniczego rejestrowano prąd płynący w tym uzwojeniu i_{up} oraz napięcie pomiędzy czopami wału $u_{wał}$ – jak przedstawiono na rysunku 4. W drugiej kolejności po synchronizacji badanej maszyny synchronicznej z siecią elektroenergetyczną dokonano analogicznych rejestracji przebiegów dla dwóch różnych punktów pracy.

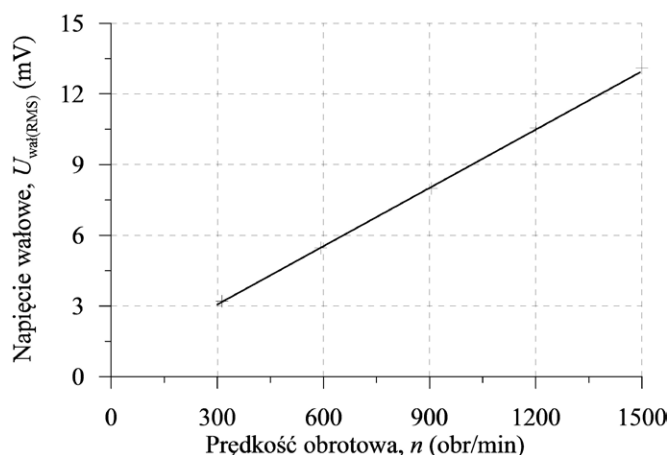
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono charakterystyki odpowiednio: napięcia generowanego w otwartym uzwojeniu pomocniczym oraz napięcia wałowego w funkcji prędkości obrotowej podczas biegu jałowego. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebieg napięcia indukowanego w otwartym uzwojeniu pomocniczym podczas biegu jałowego przy prędkości znamionowej oraz jego widmo częstotliwościowe. Porównanie napięć wałowych $u_{wał}$ dla przypadku rozwartego i zwartego uzwojenia



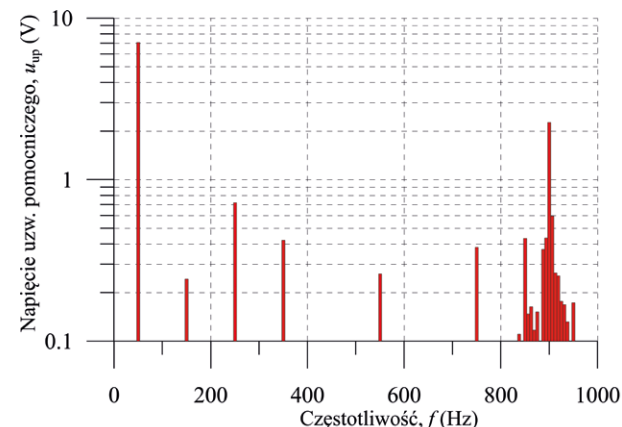
Rys. 5. Zależność napięcia indukowanego w uzwojeniu pomocniczym od prędkości obrotowej podczas biegu jałowego



Rys. 7. Przebieg napięcia indukowanego w rozwartym uzwojeniu pomocniczym generatora podczas biegu jałowego przy prędkości znamionowej



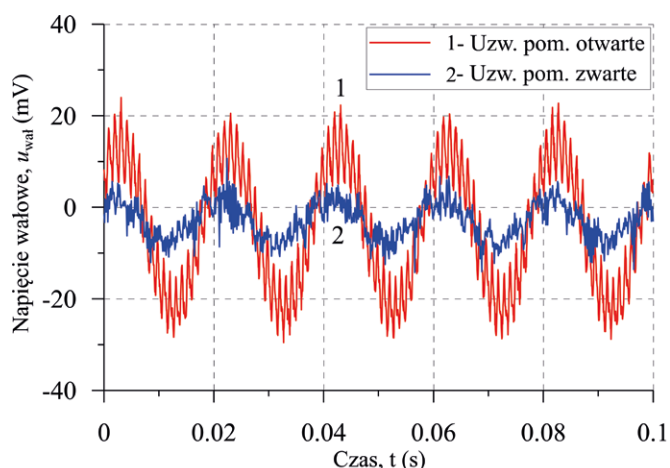
Rys. 6. Zależność napięcia wałowego od prędkości obrotowej podczas biegu jałowego



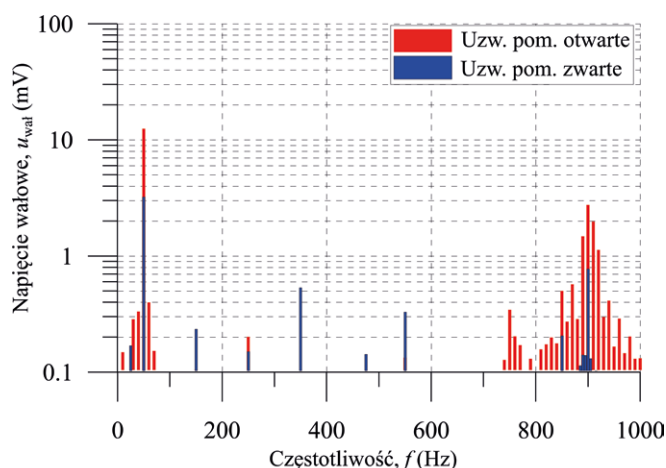
Rys. 8. Widmo częstotliwościowe napięcia indukowanego w uzwojeniu pomocniczym podczas biegu jałowego

pomocniczego przedstawiono na rysunkach 9 i 10 – dla prędkości znamionowej biegu jałowego. Rysunek 11 przedstawia przebieg prądu w zamkniętym uzwojeniu pomocniczym. Wyniki pomiarów dla różnych punktów pracy przedstawiono w tabeli 1.

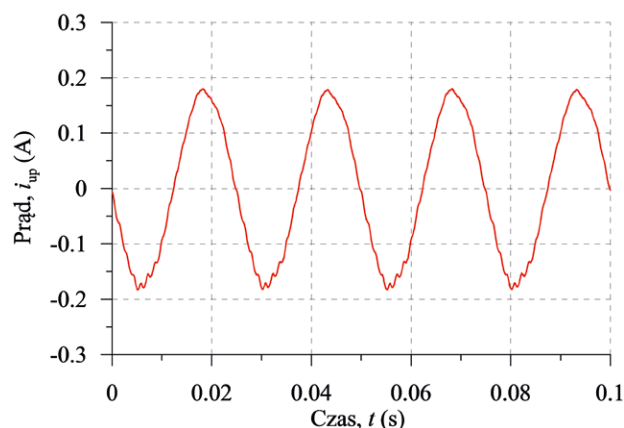
Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów można zauważyć liniową zależność napięcia indukowanego w uzwojeniu pomocniczym od prędkości obrotowej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi pracującej na biegu jałowym. Napięcie to charakteryzuje się taką samą częstotliwością oraz zbliżonym kształtem jak napięcie mierzone pomiędzy czopami wału maszyny (przy niez izolowanych łożyskach). W widmie częstotliwościowym napięcia indukowanego w uzwojeniu pomocniczym oraz napięciu wałowym oprócz podstawowej harmonicznej ($f = 50$ Hz) uwidoczniła się również składowa ok. 900 Hz – wynika ona z liczby żłobków stojana. Zwarcie uzwojenia dodatkowego zarówno podczas biegu jałowego, jak i podczas obciążenia przyczynia się do znaczącego zmniejszenia napięcia u_{wal} występującego pomiędzy czopami wału.



Rys. 9. Porównanie napięć pomiędzy czopami wału dla przypadków otwartego i zwartego uzwojenia pomocniczego



Rys. 10. Widmo częstotliwościowe napięcia wałowego – porównanie dla przypadku otwartego i zwartego uzwojenia pomocniczego



Rys. 11. Przebieg prądu płynącego w zwartym uzwojeniu pomocniczym generatora podczas biegu jałowego przy prędkości znamionowej

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów

	Otwarte uzwojenie pomocnicze		Zwarte uzwojenie pomocnicze	
	U_{wal} (mV _{RMS})	U_{up} (V _{RMS})	U_{wal} (mV _{RMS})	I_{up} (A _{RMS})
Bieg jałowy: $f = 50$ Hz	13,25	7,70	4,10	0,124
Obciążenie: $f = 50$ Hz, $P = 3$ kW $I = 4,4$ A $\cos\phi = 0,99$	13,90	7,90	5,77	0,113
Load: $f = 50$ Hz, $P = 3$ kW $I = 5,7$ A $\cos\phi = 0,8$	14,44	8,58	4,57	0,093

Podsumowanie

Przeprowadzone badania laboratoryjne na prototypowej maszynie synchronicznej z magnesami trwałymi potwierdziły wpływ dodatkowego uzwojenia pomocniczego w maszynie elektrycznej na zmniejszenie zjawiska generowania napięć wałowych w maszynie. Wykazano tożsamy charakter napięcia pomiędzy czopami wału maszyny i napięcia generowanego w uzwojeniu pomocniczym. W dalszych krokach planowane jest przeprowadzenie symulacji FEM oraz kolejne badania laboratoryjne mające na celu analizę możliwości wykorzystania dodatkowego uzwojenia pomocniczego w maszynie elektrycznej jako elementu tłumiącego prądy wałowe.

Literatura

- [1] COSTELLO M.J.: *Shaft voltages and rotating machinery*. „IEEE Shaft voltages and rotating machinery”, t. 29, nr 2, kwiecień 1993.
- [2] PLAZENET T., BOILEAU T., CAIRONI C., NAHID-MOBARAKEH B.: *An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, USA, 2016.
- [3] STONE G., LLOYD B., SASIC M.: *Monitoring of shaft voltages and grounding currents in rotating machines*, 17th International

Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China, 2014.

- [4] GOLEBIEWSKI L., GOLEBIEWSKI M., MAZUR D.: *Voltages in the Shaft of the Induction Motor in 3D FEM Formulation*, w 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Kraków, wrzesień 2007.
- [5] POCHTOWSKI J.: *Shaft voltages and bearing currents in high-power DC motors – applied on hoist machines*, „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2018.
- [6] ONG R., DYMOND J.H., FINDLAY R.D., SZABADOS B.: *Shaft current in AC induction machine. An online monitoring system and prediction rules*, IEEE Trans. Ind. Appl., t. 37, nr 4, sierpień 2001.
- [7] *Motor Shaft Voltages and Bearing Currents under PWM Inverter Operation*, Gambica.

mgr inż. Tomasz Jarek – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL
dr inż. Sebastian Berhausen – Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny

artykuł recenzowany