

# Asymetria obciążenia generatora wzbudzanego magnesami trwałymi źródłem drgań

Marcin Barański

## 1. Wstęp

W ostatnich latach zaobserwować można procentowe zwiększenie udziału „zielonej energii” w produkcji energii elektrycznej, co jest narzucone odgórnie poprzez unijne dyrektywy. Dochodzi do tego stały wzrost cen energii elektrycznej.

Wszystko to przekłada się na ciągły wzrost zainteresowania energią pozyskiwaną z wiatru lub wody. Istnieje duża grupa odbiorców indywidualnych zainteresowanych małymi konstrukcjami przeznaczonymi do zasilania domów jednorodzinnych lub do wspomagania systemów grzewczych w takich domach. Takie systemy coraz częściej wyposażone są w generatory PM [4].

Generatory ze wzbudzeniem od magnesów trwałych charakteryzują się najwyższą sprawnością spośród wszystkich rodzajów maszyn elektrycznych wirujących, którą utrzymują w szerokim zakresie prędkości obrotowych, co stanowi jedną z głównych zalet tych maszyn. Niestety maszyny te posiadają również wady, które konstruktorzy próbują eliminować lub ograniczać ich negatywne działanie. Zdaniem autora, z punktu widzenia użytkownika negatywnymi cechami generatorów PM są moment zaczepowy oraz tendencja do pojawiania się wibracji w przypadku asymetrii obciążenia [5].

W przypadku asymetrii obciążenia generatorów wirujące pole magnetyczne przybiera kształt eliptyczny zamiast kołowego. Pojawiają się wtedy dodatkowe momenty harmoniczne przeciwnej kolejności, które wpływają na wartość chwilową momentu wypadkowego, powodując jego pulsację. Towarzyszy temu wzrost poziomu wibracji oraz intensywny hałas, co utrudnia, a może nawet uniemożliwić pracę maszyny [2].

## 2. Model matematyczny asymetrycznie obciążonego generatora PM

Literaturowe modele maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi dla ustalonego stanu pracy standardowo przedstawiane są w osiach współrzędnych prostokątnych „d, q”. Forma ta umożliwia posługiwanie się stałymi wartościami reaktancji  $X_d$  i  $X_q$ . Metoda ta jednak nie ma interpretacji w formie elektrycznego schematu zastępczego. W prezentowanym modelu maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych nie korzysta się z transformacji. W modelu uwzględnia się reaktancje, które są funkcją kąta położenia wirnika.

Założenia dla modelu matematycznego:

- uzwojenie twornika jest  $m$ -fazowe ( $m = 3$ ) symetryczne, połączone w gwiazdę;
- rozpatruje się stan pracy ustalonej bądź quasi-ustalonej;

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wpływ asymetrii obciążenia generatora ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych na generację drgań w rozpatrywanej maszynie. W pracy przedstawiono model matematyczny asymetrycznie obciążonej maszyny z magnesami trwałymi, wyniki symulacji komputerowych wykonanych w programie Ansys Maxwell 2D oraz wyniki badań laboratoryjnych. Autor przedstawił przebiegi czasowe momentu oraz prądu wraz z analizą częstotliwościową – zarówno dla symulacji, jak również dla badań laboratoryjnych. Dodatkowo przedstawiono przebiegi czasowe przyspieszenia drgań dla symetrycznego oraz asymetrycznego obciążenia generatora. W podsumowaniu przedstawiono również autorskie równanie matematyczne, które stanowi pewnego rodzaju marker dla rozpatrywanego zjawiska. Pozwala ono je zdiagnozować na podstawie analizy częstotliwościowej sygnału własnego maszyny. Metoda diagnostyczna bazująca na przedstawionej zależności jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania

## 🇬🇧 LOAD ASYMMETRY OF PM GENERATOR AS A VIBRATION SOURCE

**Abstract:** An influence of load asymmetry of PM generator for the generation of vibrations in the tested machine is described in this article. There is shown mathematical model, simulation and laboratory test results. The waveforms of torque and current and frequency analysis for simulations and laboratory tests are presented in the paper. The mathematical equation – a marker for this disruption is presented in the summary. This is the subject of patent application.

Keywords: electrical machine, permanent magnets, diagnostics, vibration

- pomija się wpływ siły magnetomotorycznej twornika na zmianę stanu nasycenia obwodu magnetycznego, to znaczy reaktancje nie są funkcjami prądu twornika.

Model matematyczny maszyny, przy powyższych założeniach, bazuje na elektrycznym schemacie zastępczym przedstawionym na rysunku 1. Wykres wektorowy maszyny PM odpowiadający omawianemu schematowi zastępczemu przedstawiono na rysunku 2.

Poniżej przedstawiono równania modelu matematycznego (1-5).

$$u_a(t) = R_s i_a(t) + L_a(\theta(t)) \frac{di_a(t)}{dt} + L_{ab}(\theta(t)) \frac{di_b(t)}{dt} + L_{ac}(\theta(t)) \frac{di_c(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1)$$

$$u_b(t) = R_s i_b(t) + L_b(\theta(t)) \frac{di_b(t)}{dt} + L_{ba}(\theta(t)) \frac{di_a(t)}{dt} + L_{bc}(\theta(t)) \frac{di_c(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2)$$

$$u_c(t) = R_s i_c(t) + L_c(\theta(t)) \frac{di_c(t)}{dt} + L_{ca}(\theta(t)) \frac{di_a(t)}{dt} + L_{cb}(\theta(t)) \frac{di_b(t)}{dt} + e_c(t) \quad (3)$$

$$T(t) = \frac{e_a(t) + e_b(t) + e_c(t)}{\omega(t)} \quad (4)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

gdzie:

- $e_a, e_b, e_c$  – siła elektromotoryczna indukowana w danej fazie;
- $i_a, i_b, i_c$  – prądy w poszczególnych fazach maszyny;
- $u_a, u_b, u_c$  – napięcia na zaciskach maszyny;
- $L_a, L_b, L_c$  – indukcyjności własne poszczególnych pasm;
- $L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$  – indukcyjności wzajemne;
- $R_s$  – rezystancja pasma;
- $\omega$  – prędkość kątowa;
- $\theta$  – kąt położenia wirnika;
- $t$  – czas;
- $T$  – moment.

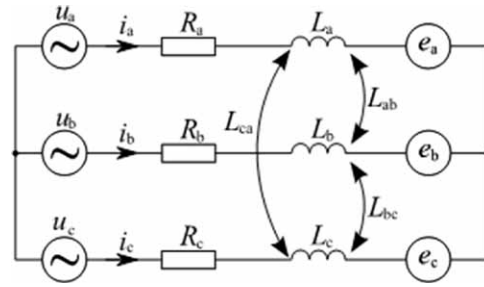
### 3. Symulacje komputerowe

Do badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych generatora obciążanego asymetrycznie wykorzystano maszynę z magnesami trwałymi typu: PM WSG132M-4 ze stojanem  $Q_s = 36$  bez skosu i wirnikiem IPMV posiadającym magnesy umieszczone wewnątrz w kształcie litery V. Parametry maszyny:  $P_N = 5,5$  kW,  $U_N = 50$  V,  $I_N = 63,5$  A,  $n_N = 1500$  1/min,  $\eta_N = 80,5\%$ .

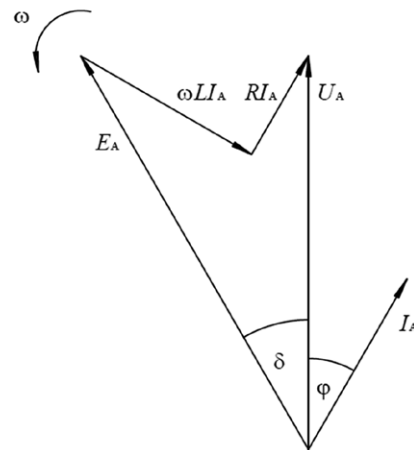
Symulacje wykonano w programie Ansys Maxwell. Na rys. 3 przedstawiono model połowo-obwodowy generatora wykorzystany do symulacji.

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego przy symetrycznym i niesymetrycznym obciążeniu generatora wzbudzanego magnesami trwałymi. Porównanie wartości momentu oraz przyspieszenia drgań umieszczono w tabeli 1.

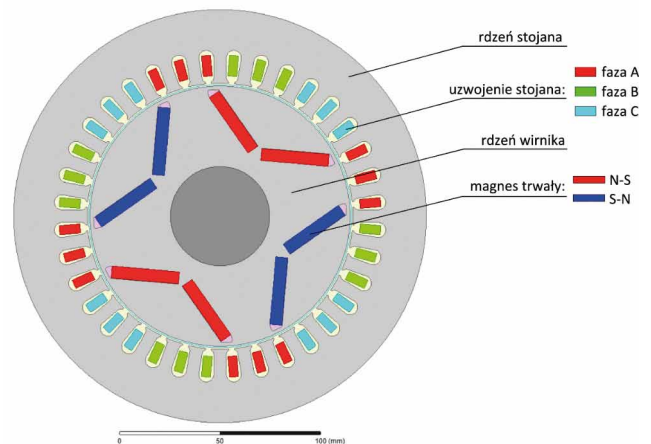
Dla asymetrii obciążenia zaobserwować można znaczne zwiększenie pulsacji momentu, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie poziomu wibracji w maszynie.



Rys. 1. Schemat zastępczy



Rys. 2. Wykres wektorowy jednej fazy



Rys. 3. Widok modelu połowo-obwodowego

Na rys. 5 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądów dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi, zaś na rys. 6 – porównanie widm częstotliwościowych tych prądów.

### 4. Badania laboratoryjne

Na rysunkach 7-9 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz przyspieszenia drgań przy symetrycznym

Tabela 1. Porównanie wartości momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia

	Sym. obc.	Asym. obc.
Maksimum momentu, $T_{max}$ (Nm)	43,63	46,09
Minimum momentu, $T_{min}$ (Nm)	32,91	-2,91
Wartość szczyt - szczyt momentu, $T_{pp}$ (Nm)	10,72	49,00
Wartość średnia momentu, $T$ (Nm)	38,04	20,59

Tabela 2. Porównanie wartości momentu i przyspieszenia drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia.

	Sym. obc.	Asym. obc.
Maksimum momentu, $T_{max}$ (Nm)	35,13	19,79
Minimum momentu, $T_{min}$ (Nm)	33,16	13,51
Wartość szczyt - szczyt momentu, $T_{pp}$ (Nm)	1,97	6,28
Wartość średnia momentu, $T$ (Nm)	34,32	16,64
Wartość RMS przyspieszenia drgań, $a$ ( $m/s^2$ )	3,56	4,96
Maksimum przyspieszenia drgań, $a_{max}$ ( $m/s^2$ )	11,81	14,45

i niesymetrycznym obciążeniu generatora wzbudzanego magnesami trwałymi. Porównanie wartości momentu oraz przyspieszenia drgań umieszczono w tabeli. 2.

Na rys. 10 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądów dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 11.

### 5. Podsumowanie

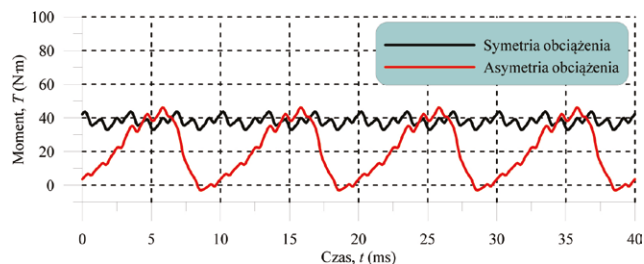
Przedstawione wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych potwierdzają, że asymetria obciążenia generatora wzbudzanego magnesami trwałymi powoduje pojawienie się pulsacji momentu, co ma swoje odzwierciedlenie w zwiększeniu poziomu vibracji [1].

Opisana analiza problemu pozwoliła na wyselekcjonowanie i opisanie równaniem matematycznym (6) zestawu częstotliwości harmonicznych, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska drgań. Równanie to posłużyło do obliczeń analitycznych zamieszczonych w dalszej części tego rozdziału [3].

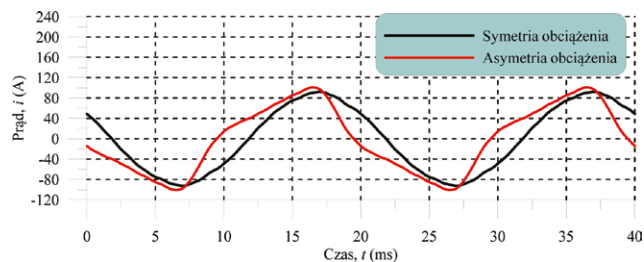
$$f_k = (2k - 1) \frac{np}{20} \quad (6)$$

gdzie:

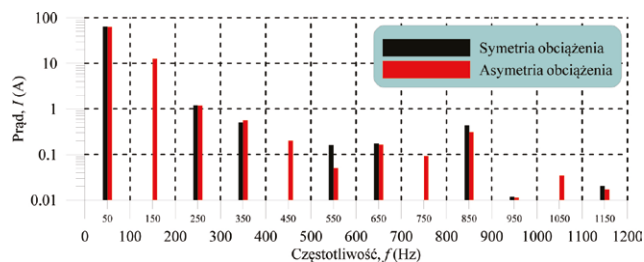
- $f_k$  – szukane  $k$ -te harmoniczne;
- $p$  – liczba par biegunów;
- $k$  – liczba naturalna;
- $n$  – prędkość obrotowa.



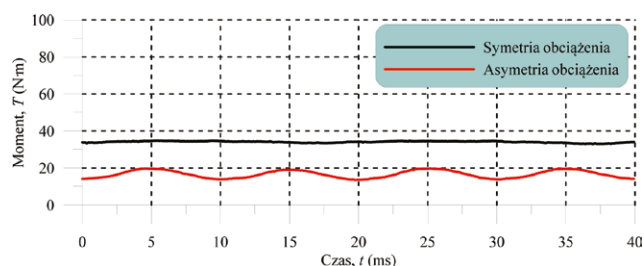
Rys. 4. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia - wynik symulacji



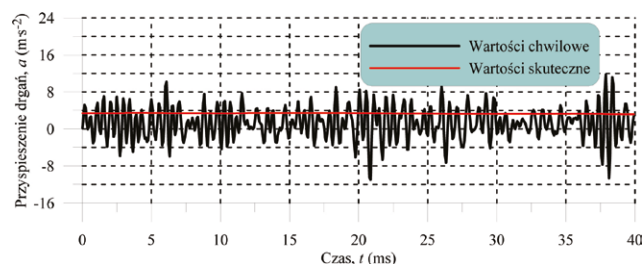
Rys. 5. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia



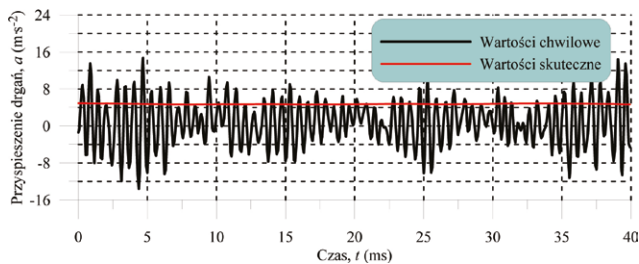
Rys. 6. Widmo częstotliwościowe prądu I(f) przy symetrii i asymetrii obciążenia



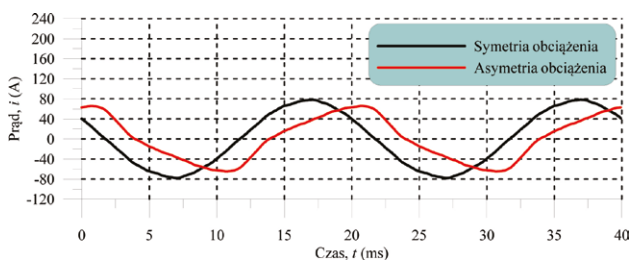
Rys. 7. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia



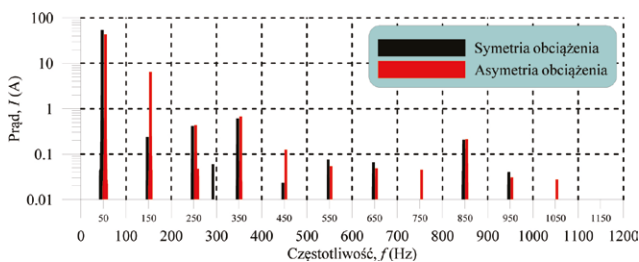
Rys. 8. Przebieg przyspieszenia drgań przy symetrycznym obciążeniu generatora



Rys. 9. Przebieg przyspieszenia drgań przy asymetrycznym obciążeniu generatora



Rys. 10. Czasowy przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 11. Widmo częstotliwościowe prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 3 umieszczono wartości skuteczne harmonicznym prądu, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości. Są to rezultaty symulacji komputerowych.

W tabeli 4 umieszczono wartości skuteczne harmonicznym prądu, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości. Są to rezultaty badań laboratoryjnych.

W tabeli 5 zestawiono porównanie wyników symulacji z wynikami badań laboratoryjnych.

Wyniki podane w powyższych tabelach mają zbliżone wartości. Zarówno badania laboratoryjne, jak również symulacje komputerowe mają poparcie w wynikach otrzymanych przy pomocy opracowanego wcześniej równania matematycznego, co potwierdza, iż można przy jego pomocy selekcjonować tzw. markery dla asymetrii obciążenia generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi.

Tabela 3. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych harmonicznym

	Sym. obc.	Asym. obc.	Wzrost %
Harmoniczna prądu, $I_{150}$ (mA)	1,8	12559,1	697 628
Harmoniczna prądu, $I_{450}$ (mA)	0,8	201,4	25 075
Harmoniczna prądu, $I_{750}$ (mA)	1,8	92,6	5044
Harmoniczna prądu, $I_{1050}$ (mA)	1,5	3,5	133

Tabela 4. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych harmonicznym

	Sym. obc.	Asym. obc.	Wzrost %
Harmoniczna prądu, $I_{150}$ (mA)	235,0	6379,3	2615
Harmoniczna prądu, $I_{450}$ (mA)	23,2	126,0	443
Harmoniczna prądu, $I_{750}$ (mA)	7,8	45,2	479
Harmoniczna prądu, $I_{1050}$ (mA)	7,9	27,8	252

Tabela 5. Harmoniczne charakterystyczne dla niesymetrycznego obciążenia generatora PM

	Bad. lab.	Sym. komp.	Obl. anal.
Częstotliwość podstawowej harmonicznym, $f_{50}$ (Hz)	50,16	50,11	50,16
Harmoniczna, $f_{150}$ (Hz)	150,07	150,11	150,48
Harmoniczna, $f_{450}$ (Hz)	449,80	450,11	451,44
Harmoniczna, $f_{750}$ (Hz)	749,53	750,11	752,40
Harmoniczna, $f_{1050}$ (Hz)	1049,26	1050,11	1053,36

## Literatura

- [1] BARAŃSKI M., DECNER A., POLAK A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*, IEEE TDEI, 5/2014.
- [2] BARAŃSKI M.: *Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [3] BARAŃSKI M., GLINKA T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi*. Zgłoszenie patentowe P. 411942.
- [4] GORYCA Z., ZIÓŁEK M., MALINOWSKI M.: *Moment zaczepowy wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe” 2010.
- [5] PISTELOK P., ROSSA R.: *Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi dedykowane dla małych elektrowni wodnych*. „Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe” 2/2015.

✉ Marcin Barański – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

artykuł recenzowany