

# Wpływ zasilania silnika PM na wzrost poziomu wibracji maszyny – diagnostyka na podstawie analizy częstotliwościowej sygnałów własnych

Marcin Barański

## 1. Wstęp

Silniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych charakteryzują się wysoką sprawnością spośród większości maszyn elektrycznych wirujących, którą utrzymują w szerokim zakresie prędkości obrotowych, co stanowi jedną z głównych zalet tych maszyn. Inną zaletą jest najwyższy stosunek mocy do masy.

Maszyny tej konstrukcji posiadają również wady, które próbuje się eliminować lub ograniczać na etapie projektu. Zdaniem autora, z punktu widzenia użytkownika negatywną cechą maszyn PM jest moment zaczepowy, który przekłada się na tętnienia momentu. Tętnienia te mogą się nasilać w przypadku asymetrii obciążenia, zasilania, asymetrii szczeliny powietrznej oraz w innych stanach niepoprawnej pracy maszyny.

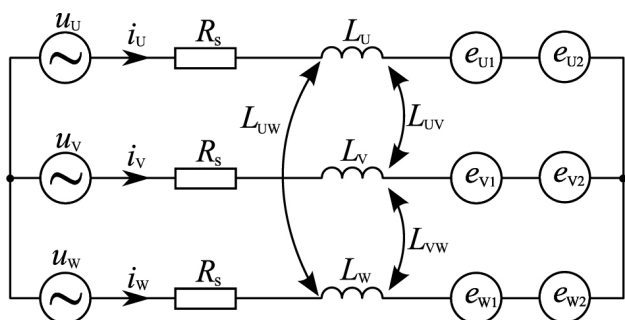
W przypadku asymetrii zasilania silnika wirujące pole magnetyczne przybiera kształt eliptyczny zamiast kołowego. Występują wtedy dodatkowe momenty harmoniczne przeciwnej kolejności, które wpływają na wartość chwilową momentu wypadkowego, powodując jego pulsację. Towarzyszy temu wzrost poziomu wibracji oraz intensywny hałas, co utrudnia, a może nawet uniemożliwić pracę maszyny [3].

## 2. Model matematyczny asymetrycznie zasilanej maszyny PM

W literaturze modele maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi dla ustalonego stanu pracy przedstawiane są głównie w osiach współrzędnych „d, q”. Umożliwia to posługiwanie się stałymi wartościami reaktancji  $X_d$  i  $X_q$ . W przedstawionym modelu (1–5) nie korzysta się z transformacji. Uwzględnia się reaktancje jako funkcje kąta położenia wirnika [4].

Założenia:

- uzwojenie trójfazowe, połączone w gwiazdę, symetryczne;
- stan pracy ustalonej.



Rys. 1. Schemat zastępczy

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wpływ asymetrii zasilania silnika ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych na generację drgań w rozpatrywanej maszynie. W pracy przedstawiono model matematyczny asymetrycznie zasilanej maszyny z magnesami trwałymi oraz wyniki badań laboratoryjnych. Autor przedstawił przebiegi czasowe momentu oraz prądu wraz z analizą częstotliwościową. Dodatkowo przedstawiono przebiegi czasowe prędkości drgań dla symetrycznego oraz asymetrycznego zasilania silnika – zarówno dla biegu jałowego, jak również dla stanu obciążenia. W podsumowaniu przedstawiono również autorskie równanie matematyczne, które stanowi pewnego rodzaju marker dla rozpatrywanego zjawiska. Umożliwia to jego zdiagnozowanie na podstawie analizy częstotliwościowej sygnału własnego. Metoda diagnostyczna bazująca na przedstawionej zależności została opatentowana.

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

## 🇬🇧 SUPPLY ASYMMETRY OF PM MOTOR AS A VIBRATION SOURCE – DIAGNOSTICS BASED ON FREQUENCY ANALYSIS OF OWN SIGNALS

**Abstract:** An influence of supply asymmetry of PM motor for the generation of vibrations in the tested machine is described in this article. There are shown mathematical model and laboratory test results. The waveforms of torque and current and frequency analysis for laboratory tests are presented in the paper. The waveforms of vibration speed for idle run and load state are also presented. The mathematical equation – a marker for this disruption is presented in the summary. The method was patented.

Keywords: electrical machine, permanent magnets, diagnostics, vibration

$$u_U(t) = R_s i_U(t) + L_U(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{UV}(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + L_{UW}(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + e_{U1}(t) + e_{U2}(t) \quad (1)$$

$$u_V(t) = R_s i_V(t) + L_V(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + L_{UV}(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{VW}(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + e_{V1}(t) + e_{V2}(t) \quad (2)$$

$$u_W(t) = R_s i_W(t) + L_W(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + L_{UW}(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{VW}(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + e_{W1}(t) + e_{W2}(t) \quad (3)$$

$$T(t) = \frac{(e_{U1}(t) + e_{U2}(t))i_U(t) + (e_{V1}(t) + e_{V2}(t))i_V(t) + (e_{W1}(t) + e_{W2}(t))i_W(t)}{\omega(t)} \quad (4)$$

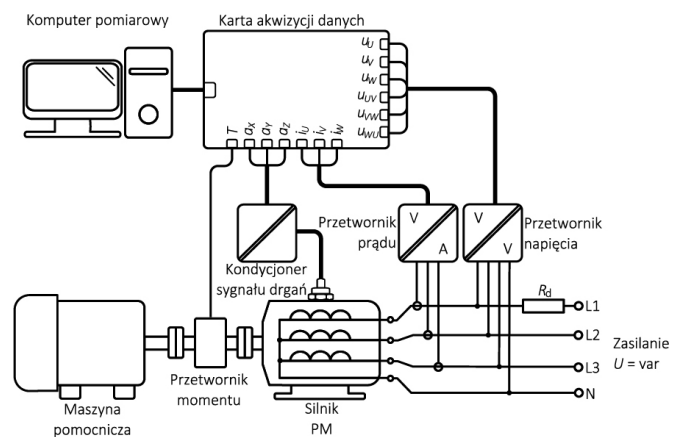
$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

gdzie:

- $e_{U1}, e_{V1}, e_{W1}$  – siła elektromotoryczna indukowana w danej fazie;
- $e_{U2}, e_{V2}, e_{W2}$  – siła elektromotoryczna zaburzenia;
- $i_U, i_V, i_W$  – prądy w poszczególnych fazach maszyny;
- $u_U, u_V, u_W$  – napięcia na zaciskach maszyny;
- $L_U, L_V, L_W$  – indukcyjności własne poszczególnych pasm;
- $L_{UV}, L_{VW}, L_{UW}$  – indukcyjności wzajemne;
- $R_s$  – rezystancja fazy;
- $\omega$  – prędkość kątowna;
- $\theta$  – kąt położenia wirnika;
- $t$  – czas;
- $T$  – moment elektromagnetyczny.

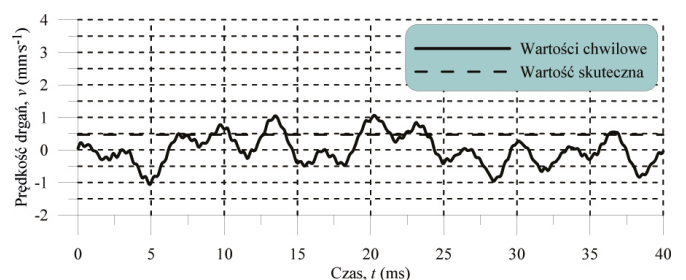
### 3. Badania laboratoryjne

Analizę niesymetrycznego zasilania silnika synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych przedstawiono, wykorzystując wyniki badań maszyny typu: SMzsg132M-4 ze stojanem o liczbie żłobków:  $Q_s = 36$ , bez skosu. Wirnik natomiast w wykonaniu ze skosem skokowym odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni (SPM). Parametry maszyny:  $P_N = 6,5$  kW,  $U_N = 65$  V,  $I_N = 72,1$  A,  $n_N = 1500$  1/min,  $\eta_N = 87,0\%$ . Badania przeprowadzono dla asymetrii zasilania:  $U_U = 39,1$  V,  $U_V = 36,2$  V,  $U_W = 36,8$  V w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2. Na rysunkach 3-7 przedstawiono przebiegi prędkości drgań oraz momentu obciążenia przy symetrycznym oraz asymetrycznym zasilaniu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi. Przebiegi prędkości drgań przedstawiono zarówno dla biegu jałowego silnika, jak i w stanie jego obciążenia. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań umieszczono w tabelach 1 i 2. Przebiegi czasowe zostały przedstawione dla jednego pełnego obrotu maszyny.



Rys. 2. Układ pomiarowy

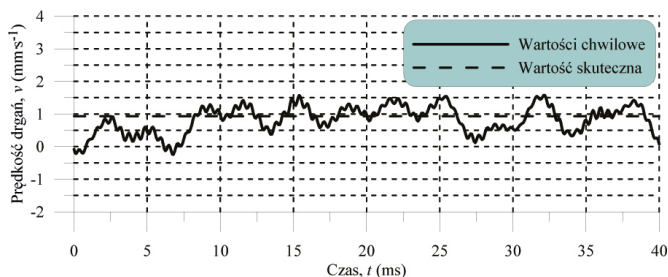
Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz wartości zebrane w tabeli 1 pokazują, że asymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, pracującego na biegu jałowym



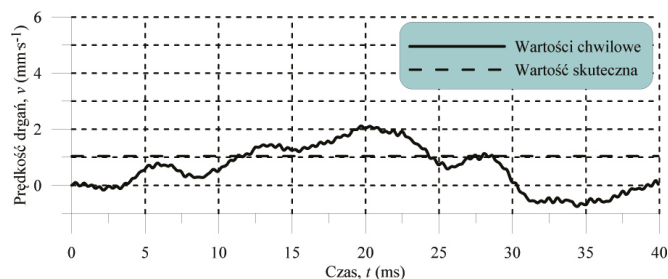
Rys. 3. Przebieg prędkości drgań przy symetrii zasilania - bieg jałowy

powoduje zwiększenie poziomu wibracji maszyny – wartość skuteczna prędkości drgań w tym przypadku wzrosła o 98%.

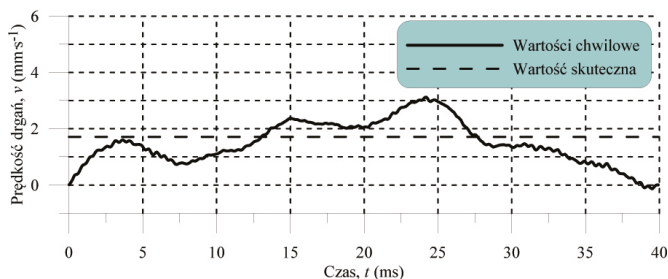
Analiza wartości zestawionych w tabeli 2 pokazuje, iż niesymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu (111%) i powoduje to wzrost wibracji maszyny (64%).



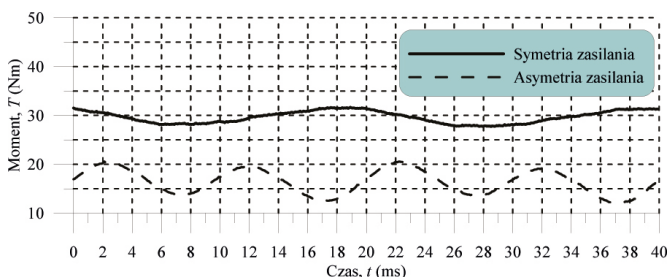
**Rys. 4.** Przebieg prędkości drgań przy asymetrii zasilania – bieg jałowy



**Rys. 5.** Przebieg prędkości drgań przy symetrii zasilania – stan obciążenia



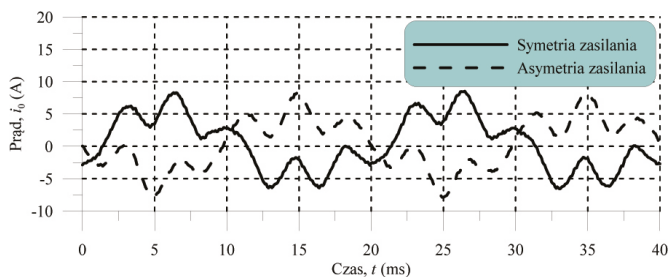
**Rys. 6.** Przebieg prędkości drgań przy asymetrii zasilania – stan obciążenia



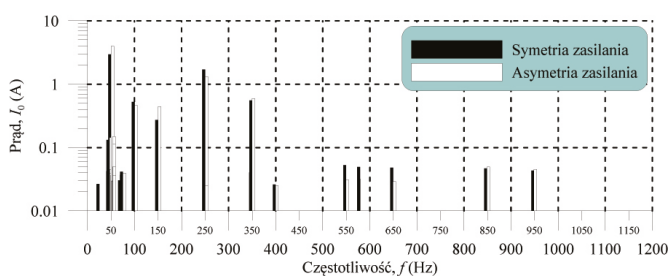
**Rys. 7.** Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii zasilania

Badania przeprowadzono w taki sposób, aby nie przekraczać prądu znamionowego silnika dla każdej z faz, dlatego przy asymetrycznym zasilaniu średni moment ma mniejszą wartość.

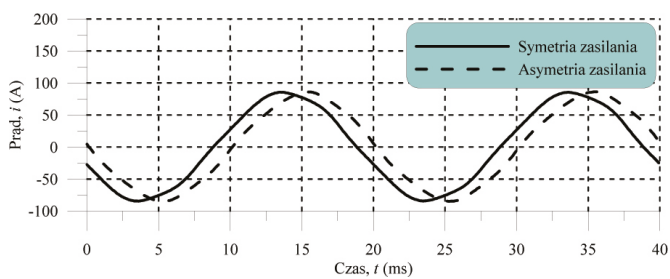
Poniżej przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądów (rys. 8 i 10) dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych – rysunki 9 oraz 11.



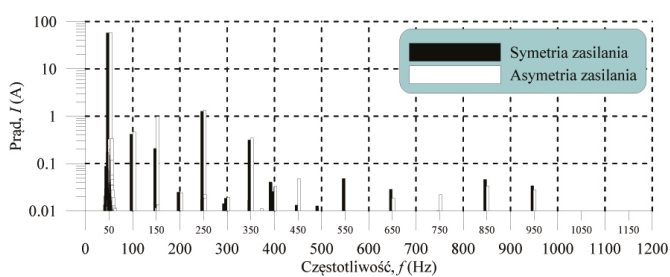
**Rys. 8.** Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii zasilania – bieg jałowy



**Rys. 9.** Widmo częstotliwościowe prądu przy symetrii i asymetrii zasilania – bieg jałowy



**Rys. 10.** Czasowy przebieg prądu przy symetrii i asymetrii zasilania – stan obciążenia



**Rys. 11.** Widmo częstotliwościowe prądu przy symetrii i asymetrii zasilania – stan obciążenia

Tabela 1. Prędkość drgań przy symetrii i asymetrii zasilania – bieg jałowy

	Symetria	Asymetria
$v$ (mm/s)	0,47	0,93
$v_{max}$ (mm/s)	1,07	1,59

Tabela 2. Moment i prędkości drgań przy symetrii i asymetrii zasilania – stan obciążenia

	Symetria	Asymetria
$T_{max}$ (Nm)	31,53	20,46
$T_{min}$ (Nm)	27,76	12,50
$T_{pp}$ (Nm)	3,77	7,96
$T$ (Nm)	29,65	16,33
$v$ (mm/s)	1,04	1,71
$v_{max}$ (mm/s)	2,14	3,13

Tabela 3. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla 3 harmoniczej

Składowa	Symetria	Asymetria
$I_{0,150}$ (mA)	271,2	445,8

Tabela 4. Wartości skuteczne dla poszczególnych składowych – stan obciążenia

Składowa	Symetria	Asymetria
$I_{150}$ (mA)	206,0	992,0
$I_{450}$ (mA)	13,0	47,0
$I_{750}$ (mA)	10,0	22,0

Na podstawie wyników w tabeli 3 można zauważyć, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje wzrost wartości 3 harmoniczej prądu o 64%.

Na podstawie wyników w tabeli 4 stwierdzić można, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje wzrost wartości niektórych składowych prądu. Dla trzeciej harmoniczej zaobserwowano zwiększenie wartości o 382%.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań ukazują, że asymetria zasilania silnika wzbudzanego magnesami trwałymi powoduje pojawienie się zwiększonej pulsacji momentu, co ma swoje odzwierciedlenie w zwiększeniu poziomu wibracji. W przedstawionym przykładzie wartość prędkości drgań przy zastosowanej asymetrii zasilania zwiększyła się o 98% na biegu jałowym oraz o 64% w stanie obciążenia.

Opisana analiza problemu pozwoliła opisać równaniem matematycznym (6) zestaw częstotliwości harmoniczych w sygnałach własnych maszyny, a więc wyznaczyć marker dla opisanego zjawiska [5].

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

gdzie:

$f_k$  – szukane  $k$ -te harmoniczne;

$p$  – liczba par biegunów;

$k$  – liczba naturalna;

$n$  – prędkość obrotowa.

Na podstawie analizy prądu zauważyć można, iż zarówno w przypadku biegu jałowego, jak również stanu obciążenia trzecia harmoniczna zwiększyła swoją wartość – odpowiednio o 64% oraz o 382%.

Wyselekcjonowanie równania (6) pozwoliło na uzupełnienie przedstawionego wcześniej modelu matematycznego, co może ułatwić analityczną analizę powyższego zagadnienia.

$$e_{U2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k)) \quad (7)$$

$$e_{V2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3})) \quad (8)$$

$$e_{W2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3})) \quad (9)$$

#### Literatura

- [1] GORYCA Z., ZIÓŁEK M., MALINOWSKI M.: *Moment zaczepowy wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 88/2010.
- [2] PISTELOK P., ROSSA R.: *Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi dedykowane dla małych elektrowni wodnych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2015.
- [3] BARAŃSKI M.: *Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [4] BARAŃSKI M., DECNER A., POLAK A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*. IEEE TDEI, 5/2014.
- [5] BARAŃSKI M., GLINKA T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi*. Zgłoszenie patentowe P. 411942.

 Marcin Barański

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

Katowice

artykuł recenzowany