

# Diagnostyka drganiowa trakcyjnych maszyn elektrycznych – przykład niewywagi

Marcin Barański

## Wstęp

W ostatnich latach nastąpił wzrost popularności oraz zastosowań maszyn z magnesami trwałymi (PM). Spowodowane jest to znaczącym rozwojem technologii oraz zwiększeniem produkcji magnesów trwałych. Maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych są wykorzystywane między innymi w energetyce odnawialnej oraz wszelkiego rodzaju napędach trakcyjnych. Jednym z przykładów jest silnik wyprodukowany przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel do samochodu Fiat Fiorino (rysunek 1). Twórcy napędów trakcyjnych coraz częściej sięgają po silniki z magnesami trwałymi. Decydują o tym ich bardzo dobre parametry: duża przeciążalność momentem, dobre właściwości regulacyjne, wysoka sprawność, duża gęstość mocy oraz stosunkowo prosta konstrukcja. W tabeli 1 zestawiono parametry trzech typów silników.

Tabela 1. Porównanie parametrów silników elektrycznych

Rodzaj silnika elektrycznego	h	P	n	$\eta$	m
		kW	1/min	%	kg
Silnik asynchroniczny	200	30,0	1472	92,5	265
Silnik prądu stałego	160	34,7	1560	88,5	247
Silnik z magnesami trwałymi	160	31,2	1500	91,8	110

W każdym napędzie elektrycznym mogą występować zjawiska niepożądane, które generują nadmierne drgania oraz hałas. Od zawsze towarzyszą one pracy wirujących maszyn elektrycznych i ich zwiększony poziom zazwyczaj jest początkiem stopniowej degradacji poszczególnych elementów. Aby



Rys. 1. Fiat Fiorino z silnikiem PM wyprodukowanym przez KOMEL, projekt nr NR01-0084-10

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono drganiową metodę diagnozowania silników trakcyjnych wzbudzonych magnesami trwałymi, które są wykorzystywane m.in. w pojazdach elektrycznych. Metoda wykorzystuje właściwości maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, a mianowicie zjawisko indukowania się napięcia w uzwojeniu twornika pod wpływem drgań mechanicznych wirnika względem stojana. Przedstawiono genezę metody, podobieństwo do elektrodynamicznego czujnika drgań, wyniki obliczeń oraz badań laboratoryjnych mających na celu detekcję częstotliwości, które odpowiadają wibracjom, wymuszonych niewywagą wirnika.

Słowa kluczowe: drgania, silniki trakcyjne, maszyny elektryczne, magnesy trwałe, diagnostyka

## THE VIBRATION DIAGNOSTIC OF ELECTRICAL TRACTION MACHINES – UNBALANCE EXAMPLE

**Abstract:** This article presents a vibration diagnostic method designed for permanent magnets (PM) traction motors. Those machines are commonly used in traction drives of electrical vehicles. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in this method – electromotive force (EMF) generated due to vibrations. This work presents: the method genesis, the similarity of permanent magnet machine and vibration sensor, results of calculations and laboratory tests.

Keywords: Vibration, Traction Motors, Electrical Machines, Permanent Magnets, Diagnostic

zniwelować możliwość wystąpienia uszkodzenia, którego koszt naprawy może wielokrotnie przekroczyć koszt maszyny, stosuje się badania okresowe. Zadaniem takiej diagnostyki jest wczesne wykrycie zjawisk niepożądanych i przeciwdziałanie poważnym awariom. Zignorowanie tych objawów stwarza zagrożenie wyłączenia maszyny z eksploatacji, co generuje dodatkowe koszty.

Głównym celem diagnostyki drganiowej jest uzyskanie informacji o stopniu zużycia poszczególnych elementów urządzenia. Największe znaczenie mają przebiegi czasowe: przemieszczeń, prędkości lub przyspieszenia drgań. Chcąc uzyskać informację o stanie technicznym badanej maszyny, istotna jest wartość skuteczna (RMS) prędkości drgań. Natomiast do określenia przyczyny konieczne jest przeprowadzenie analizy częstotliwościowej przyspieszenia. Analiza umożliwi rozbięcie wygenerowanego sygnału na składowe, które przy znajomości budowy oraz podstawowych parametrów maszyny można

przyporządkować poszczególnym elementom konstrukcyjnym maszyny.

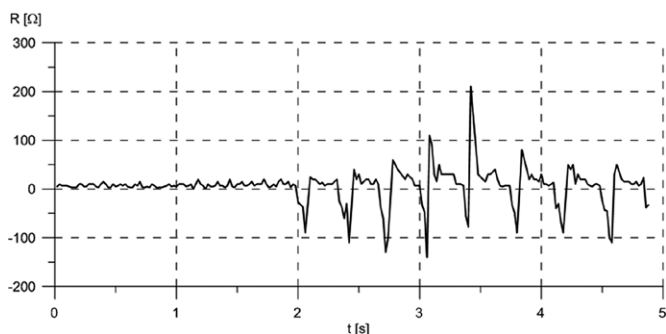
Większość pomiarów drgań bazuje na wykorzystaniu zewnętrznych czujników pomiarowych oraz dedykowanej do tego celu kosztownej aparatury. Podczas takich badań należy zwrócić uwagę na poprawny montaż czujnika do maszyny, co często jest problemem, gdyż maszyna rzadko jest do tego przystosowana. Sposób zamontowania sensora wpływa na zakres przenoszonych częstotliwości sygnału pomiarowego. Ważne jest również odseparowanie układu pomiarowego od różnych zakłóceń, które powodują nieprawidłowe wskazania aparatury pomiarowej [4], [9].

W tej pracy przedstawiono koncepcję diagnostyki drganiowej z wykorzystaniem sygnału własnego silnika, który zawarty jest w przebiegach napięcia bądź prądu. Uzwojenie twornika oraz obwód wzbudzenia, oprócz ich podstawowej funkcji, pełnią także funkcję czujnika drgań. Pomiaru pozwalające na detekcję zwiększonego poziomu drgań, z wykorzystaniem uzwojenia maszyny, mogą być wykonywane online w czasie normalnej eksploatacji maszyny. Główną zaletą opisywanej metody identyfikacji wibracji jest to, że układ pomiarowy nie wymaga stosowania dodatkowych czujników do pomiaru [1–3].

Metoda bazuje na tym, że zarejestrowane napięcie bądź prąd maszyny zostają poddane analizie częstotliwościowej pozwalającej na wyodrębnienie charakterystycznych częstotliwości ściśle związanych ze wzrostem wibracji.

## 1. Geneza powstania metody

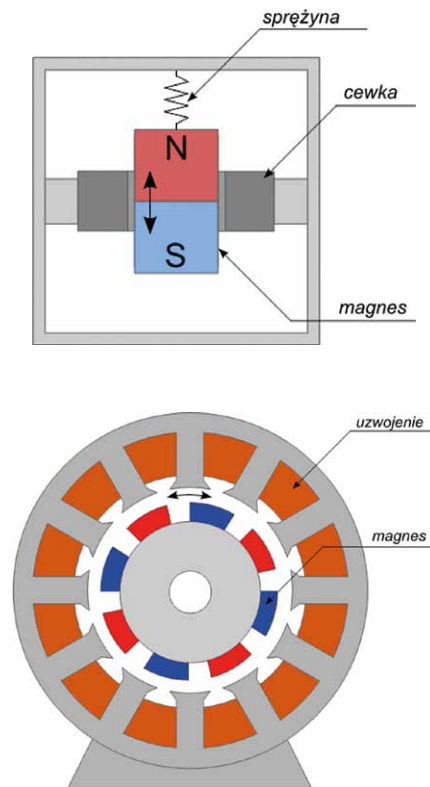
Idea wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi jako czujnika drgań pojawiła się podczas pomiarów rezystancji uzwojeń takich maszyn. W czasie badań wykryto zakłócenia, które ujawniają się, gdy w otoczeniu badanej maszyny występuje źródło drgań (patrz rysunek 2). Podczas pomiarów innych rodzajów maszyn elektrycznych zjawisko to nie występuje. Natomiast w maszynie z magnesami trwałymi, która znajduje się w otoczeniu oddziaływania wibracji, w uzwojeniach indukują się siła elektromotoryczna (SEM), która wprowadza zakłócenia i poprawny pomiar rezystancji uzwojeń nie jest możliwy [8].



Rys. 2. Zakłócenia w pomiarze rezystancji uzwojenia maszyny PM

## 2. Maszyna PM a czujnik drgań

Maszyna elektryczna z magnesami trwałymi w swojej konstrukcji bardzo przypomina elektrodynamiczny czujnik drgań – można to zaobserwować na rysunku 3. Jego działanie opiera się na tym, że pod wpływem wibracji przemieszczający się



Rys. 3. Czujnik elektrodynamiczny i maszyna PM

wewnątrz cewki magnes indukują w niej napięcie zależne od poziomu wibracji. W klasycznej maszynie PM pod wpływem drgań wirnik z magnesami trwałymi generuje SEM w uzwojeniu. Zarówno czujnik, jak maszyna do generacji sygnału pomiarowego nie potrzebują zewnętrznych źródeł zasilania. Czułość układu w obu przypadkach jest zależna od ilości zwojów uzwojenia [6].

## 3. Kalkulacje oraz badania laboratoryjne

Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi, o liczbie par biegunów  $p$  i pracujących z prędkością obrotową  $n$ , obejmuje rejestrację przebiegu napięcia lub prądu diagnozowanej maszyny, wykonanie analizy częstotliwościowej sygnału pomiarowego oraz wydzielenie częstotliwości [7]:

$$f_1 = \frac{(p-1)f}{p} \quad (1)$$

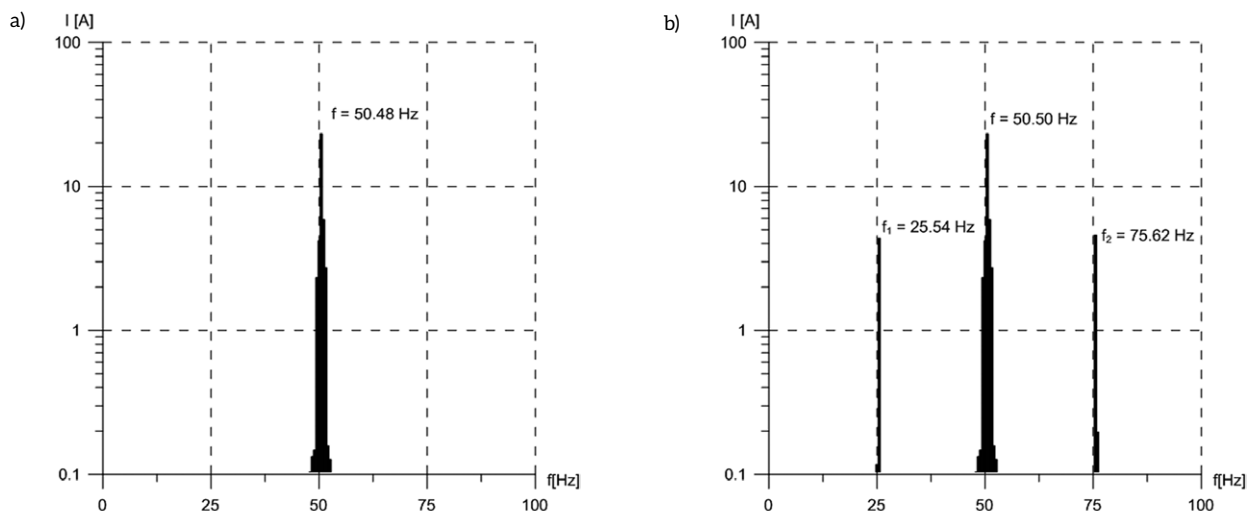
$$f_2 = \frac{(p+1)f}{p} \quad (2)$$

gdzie:

$f_1, f_2$  – szukane częstotliwości;

$p$  – liczba par biegunów;

$f$  – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanego generatora.



Rys. 4. Wyniki badań laboratoryjnych silnika SMwsPA132S4: a – analiza częstotliwościowa prądu silnika pracującego bez zakłóceń; b – analiza częstotliwościowa prądu silnika pracującego z niewyważą wirnika

Kalkulacje oraz badania przeprowadzono dla silnika SMwsPA132S4 o parametrach:  $I_N = 160$  A,  $P_N = 15$  kW,  $n_N = 3400$  1/min. ( $p = 2$ ), który wykorzystywany jest jako napęd trakcyjny w wielu aplikacjach, w których Instytut Komel bierze udział.

$$f_1 = \frac{(p-1)f}{p} = \frac{(2-1) \cdot 50}{2} = 25 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{(p+1)f}{p} = \frac{(2+1) \cdot 50}{2} = 75 \text{ Hz}$$

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń i badań laboratoryjnych. Przedstawiono częstotliwości, które zdiagnozowano dla silnika pracującego z niewyważą wirnika.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń oraz badań laboratoryjnych silnika SMwsPA132S4

Częstotliwości	$f$	$f_1$	$f_2$
	Hz	Hz	Hz
Wyznaczone z równań: (1), (2)	50,00	25,00	75,00
	50,50	25,25	75,75
Wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych	50,50	25,54	75,62

#### 4. Podsumowanie

Na rysunku 4 oraz w tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów laboratoryjnych. Wyznaczono częstotliwości generowane w maszynie PM z niewyważą wirnika. Niewyważenie uzyskano poprzez niecentryczne umocowanie dodatkowej masy na wale maszyny. Kalkulacje oraz badania eksperymentalne pokazują użyteczność przedstawionej diagnostycznej

metody drganiowej dla maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi. Różnice między wynikami obliczeń a badaniami laboratoryjnymi są niewielkie (1,15% oraz -0,17%) – świadczy to o poprawności przyjętego sposobu wyznaczania częstotliwości, odpowiadających zwiększonemu poziomowi drgań powstałych na skutek niewyważa. Przeprowadzona analiza pokazuje możliwość wykorzystania maszyny wzbudanej przy użyciu magnesów trwałych jako czujnika drgań dla samej siebie. Do tej pory nie napotkano na takie rozwiązanie, gdzie do oceny stanu technicznego pod kątem drgań wykorzystuje się sygnał własny maszyny [11], [15–21]. Jest to podejście innowacyjne i niestandardowe. Przedstawiona metoda, zdaniem autora, znacznie upraszcza diagnostykę drganiową w maszynach z magnesami trwałymi. Powoduje, iż nie jest wymagane stosowanie kosztownych czujników pomiarowych, a diagnosta nie przejmuje się ich montażem, co w niektórych przypadkach stanowi istotny problem z uwagi na dostęp, np. w pojeździe elektrycznym. Sama obserwacja przebiegów czasowych napięć lub prądów badanych maszyn, ze względu na istotną różnicę między wartościami generowanej SEM a składową pochodzącą od wibracji, nie pozwala na wychwycenie anomalii. Konieczna jest analiza częstotliwościowa badanego przebiegu napięcia bądź prądu. Sposób detekcji pozwala przeprowadzać diagnostykę online, z wykorzystaniem komputera pokładowego pojazdu elektrycznego [5], [10]. Należy jednak pamiętać, że większość silników z magnesami trwałymi współpracuje z falownikami i przed analizą częstotliwościową należy badany przebieg poddać odpowiedniej filtracji (szczególnie sygnał napięciowy) [12–14].

#### Literatura

- [1] BARAŃSKI M.: *Vibration diagnostic method of permanent magnets generators – detecting of vibrations caused by unbalance*, IEEEExplore, 2014.
- [2] BARAŃSKI M.: *PM electrical machines diagnostic – methods selected*, Materiały konferencyjne ICEMDS, 2014.

- [3] BARAŃSKI M.: *Permanent magnet machine can be a vibration sensor for itself*, Materiały konferencyjne ICEMDS, 2014.
- [4] BARAŃSKI M., DECNER A.: *Funkcja przyspieszenia drgań  $a_y = f(a_x)$  jako narzędzie do określania stanu technicznego łożyska*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 4/2012.
- [5] BARAŃSKI A., DECNER A.: *Telemetria w diagnozowaniu maszyn elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 4/2012.
- [6] BARAŃSKI M., DECNER A., POLAK A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*, IEEE TDEI, 5/2014.
- [7] BARAŃSKI M., GLINKA T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi*. Zgłoszenie patentowe P.405669, 2013 r.
- [8] BARAŃSKI M., JAREK T.: *Analysis of PMSM vibrations based on Back-EMF measurements*, IEEEExplore, 2014.
- [9] BARAŃSKI M., POLAK A.: *Bearings vibration diagnosis based on hodograph XY*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 1/2014.
- [10] DECNER A.: *Zdalne monitorowanie maszyn elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 3/2011.
- [11] LAKSHMIKANTH S., NATRAJ K.R., REKHA K.R.: *Noise and Vibration Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motors – A Review*. „International Journal of Electrical and Computer Engineering”, 3/2012.
- [12] MACIĄŻEK M., PASKO M., BUŁA D.: *Optimization of time in Active Power Filter control*, 8th International Workshop OPEE, 2007.
- [13] MACIĄŻEK M., PASKO M., GRABOWSKI D.: *Active power filters-optimization of sizing and placement*, Technical Sciences, 2013.
- [14] MACIĄŻEK M., PASKO M.: *Prediction in control systems of active power filters*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 4/2010.
- [15] NANDI S., TOLYAT H.A., LI X.: *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review*. Industry Applications Conference, 1/1999.
- [16] SZYMANIEC S.: *Pomiary częstotliwości drgań własnych i rezonansowych maszyn elektrycznych w warunkach ich eksploatacji*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 3/2012.
- [17] SZYMANIEC S.: *Ścieżki pomiarowe do pomiarów drgań względnych w maszynach elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 81/2009.
- [18] SZYMANIEC S.: *Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 82/2009.
- [19] SZYMANIEC S.: *Drgania własne stojana silnika indukcyjnego klatkowego małej mocy – pomiary*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 3/2012.
- [20] SZYMANIEC S., PODHAJECKI J.: *Wyznaczanie drgań własnych stojana silnika indukcyjnego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 87/2010.
- [21] TORREGROSSA D.: *Multiphysics Finite-Element Modeling for Vibration and Acoustic Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine*. IEEE Transactions On Energy Conversion, 26/2011.



Marcin Barański

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

artykuł recenzowany

reklama

Wybierz swoją prenumeratę na [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)



Prenumerata drukowana



Prenumerata elektroniczna



Pakiet