

Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych

Streszczenie. Praca przedstawia zastosowanie wibracyjnej metody diagnostycznej dla generatorów z magnesami trwałymi pracujących w stanach asymetrii obciążenia. Wykorzystuje ona specyficzne właściwości konstrukcyjne maszyn z magnesami trwałymi, tj. indukowanie się SEM pod wpływem wibracji. W pracy przedstawiono min. podobieństwo maszyny z magnesami trwałymi do czujnika drgań, zawarto wyniki obliczeń, symulacji oraz badań laboratoryjnych. Metoda ta jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

Abstract. The paper presents a vibration diagnostic method designed for permanent magnets (PM) generators with point operation asymmetry. Specific structural properties of machines excited by permanent magnets are used in this method - electromotive force (EMF) generated due to vibrations. In this article several issues will be discussed: the similarity of permanent magnet machines to vibration sensor, calculations, results of simulation and laboratory tests. The method is the subject of patent application. (The vibrations problem of PM generators with point operation asymmetry – analysis of own signals).

Słowa kluczowe: generator, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania.

Keywords: generator, permanent magnets, diagnostics, vibration.

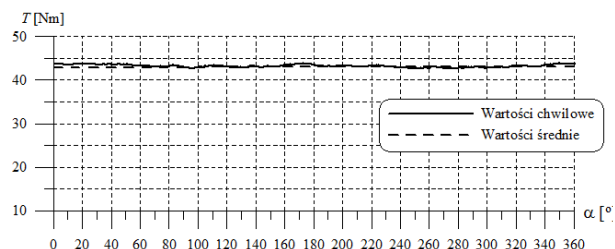
Wstęp

W obecnych czasach można zaobserwować stały wzrost zastosowań maszyn z magnesami trwałymi, zarówno w przemyśle jak również u odbiorców indywidualnych. Jednym z przykładów jest wykorzystanie generatorów PM w elektrowniach zarówno wiatrowych jak i również wodnych. Maszyny te w porównaniu z innymi charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami: duża przeciążalność momentem, dobre właściwości regulacyjne, wysoka sprawność, duża gęstość mocy oraz stosunkowo prosta konstrukcja. W tabeli 1 zestawiono katalogowe parametry trzech typów maszyn elektrycznych.

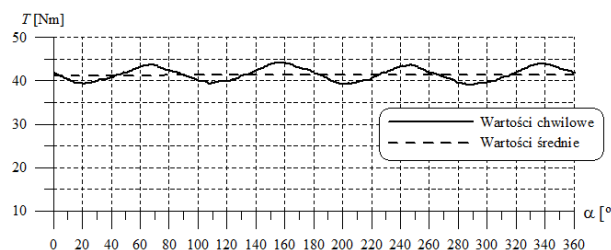
Tabela 1. Porównanie parametrów maszyn elektrycznych

Typ maszyny elektrycznej	h	P kW	n 1/min	η %	m kg
Asynchroniczna	200	30.0	1472	92.5	265
Prądu stałego	160	34.7	1560	88.5	247
PM	160	31.2	1500	91.8	110

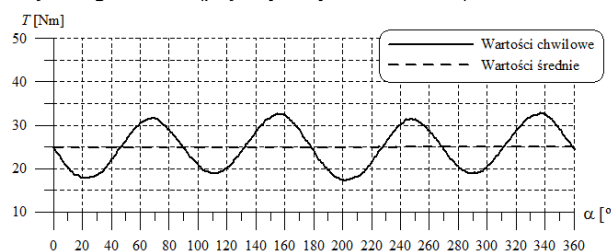
Przy wszystkich zaletach generatorów ze wzbudzeniem od magnesów trwałych należy szczególnie zwrócić uwagę na jedną z wad, tj. wzrost poziomu wibracji przy asymetrycznym obciążeniu. Jest to wynik pojawienia się pulsacji w momencie elektromagnetycznym – Rys.2-3. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne, gdyż przy dłuższej eksploatacji generatora w takim stanie, może doprowadzić do degradacji poszczególnych podzespołów, a nawet do poważnej awarii całego zespołu maszynowego.



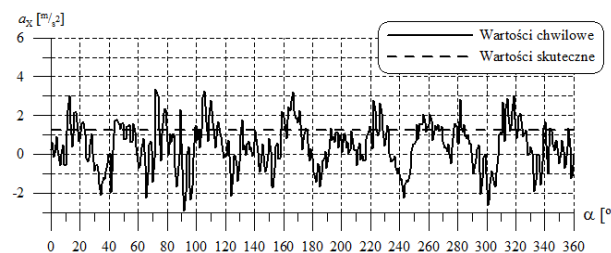
Rys.1. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy symetrycznym obciążeniu generatora



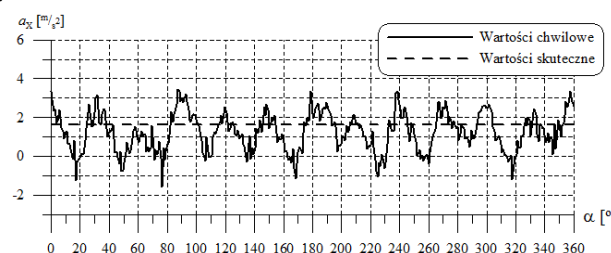
Rys.2. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy asymetrycznym obciążeniu generatora (prąd w jednej fazie $I = 0,75 I_n$)



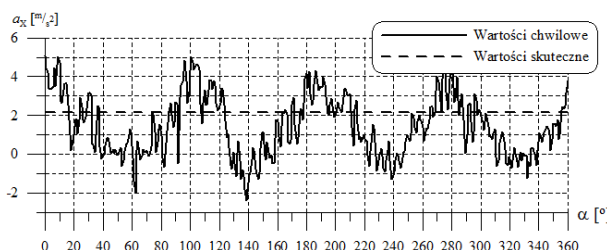
Rys.3. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy asymetrycznym obciążeniu generatora (przerwa w jednej z faz)



Rys.4. Przebieg przyspieszenia drgań przy symetrycznym obciążeniu generatora



Rys.5. Przebieg przyspieszenia drgań przy asymetrycznym obciążeniu generatora (prąd w jednej fazie $I = 0,75 I_n$)



Rys.6. Przebieg przyspieszenia drgań przy asymetrycznym obciążeniu generatora (przerwa w jednej z faz)

Tabela 2. Wpływ pulsacji momentu elektromagnetycznego na wzrost przyspieszenia drgań generatora SMzsg132M-4

Stan obciążenia generatora	T	T_{pp}	a	a_{max}
	Nm	Nm	m/s ²	m/s ²
Obciążenie symetryczne $I = I_n$	43,0	1,2	1,3	3,2
Prąd w jednej z faz $I = 0,75 I_n$	41,3	5,0	1,6	3,4
Prąd w jednej z faz $I = 0$	24,9	15,0	2,2	5,0

Na rysunkach od 1 do 6 oraz w tabeli 2 można zaobserwować wpływ asymetrii obciążenia generatora PM na poziom vibracji i przebieg momentu elektromagnetycznego. Wraz ze wzrostem asymetrii powiększają się pulsacje momentu oraz wzrasta poziom drgań.

Istota metody

Powszechnie stosowaną metodą pomiaru drgań w maszynach elektrycznych jest bezpośredni pomiar przyspieszenia bądź prędkości drgań czujnikami mechaniczno – elektrycznymi. Na przykład czujnikiem z piezoelektrycznym elementem pomiarowym mierzy się przyspieszenie drgań, a czujnikiem magneto – elektrycznym (magnes trwały i cewka indukcyjna) mierzy się prędkość drgań. Pomiar drgań polega na przyłożeniu czujnika do punktu pomiarowego, np. do tarczy łożyskowej maszyny elektrycznej. Drgania mierzy się zwykle w trzech kierunkach: x – poziomym, poprzecznym do osi wału, y – pionowym, z – wzdłużnym. Diagnostyka drganiowa bazuje głównie na pomiarach przy użyciu dedykowanej do tego celu skomplikowanej i kosztownej aparatury [2]-[5]. Przy drganiach przekraczających wartości dopuszczalne według norm i instrukcji eksploatacji zarejestrowany sygnał drganiowy rozkłada się na harmoniczne w celu zidentyfikowania przyczyny powstałych drgań. Mierzac drgania trzeba zwracać uwagę na poprawne zamontowanie czujnika do maszyny, co często stwarza problemy, gdyż maszyna fabrycznie jest rzadko do tego celu przystosowana. Sposób montażu czujnika pomiarowego wpływa na zakres przenoszonego pasma częstotliwości sygnału pomiarowego. Dodatkowo należy zwracać szczególną uwagę na separację obwodu pomiarowego od wszelkiego rodzaju zakłóceń, które mogą spowodować nieprawidłowe wskazania aparatury pomiarowej.

W elektrowniach wiatrowych w których prądnice wzbudzone magnesami trwałymi są zabudowane w gondoli elektrowni, a także w małych elektrowniach wodnych w których prądnice wraz z turbinami są zatopione w wodzie, bezpośredni pomiar drgań czujnikami elektromechanicznymi jest utrudniony bądź niemożliwy. Zachodzi, więc potrzeba użycia innego sposobu oceny drgań prądnic bez konieczności stosowania czujników elektromechanicznych.

Przeprowadzając pomiary niesymetrii obciążenia prądnic wzbudzonych magnesami trwałymi zauważono wzrost ich drgań mechanicznych – można to zaobserwować w tabeli 2. Wynika z tego, że niesymetria obciążenia prądnicy generuje drgania, które indukują w uzwojeniu maszyny napięcia o częstotliwości wyrażonej równaniem

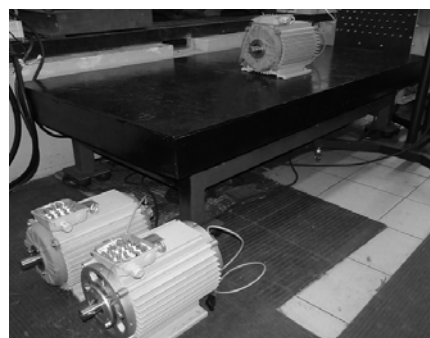
(1). To spostrzeżenie nasunęło pomysł aby, w prądnicach wzbudzonych magnesami trwałymi, pracujących w trudnodostępnych warunkach, gdzie pomiar drgań jest utrudniony, oceniać drgania w oparciu o analizę harmoniczną prądu lub napięcia. Wykorzystuje się do tego celu specyficzne właściwości maszyn z magnesami trwałymi, a więc indukowanie się SEM w uzwojeniu pod wpływem drgań.

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

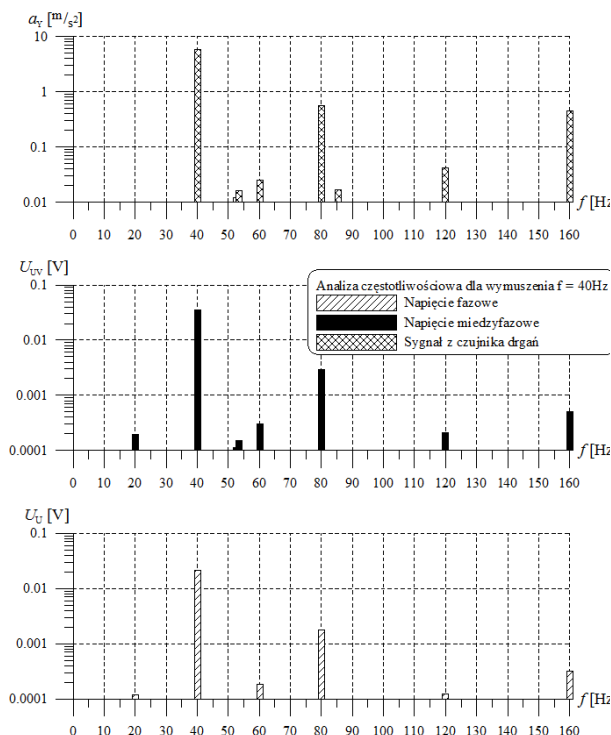
gdzie: f_k – szukane częstotliwości, p – liczba par biegunów, n – prędkość obrotowa, k – liczba naturalna

Generator PM czujnikiem drgań

Maszyna z magnesami trwałymi swoją budową przypomina czujnik elektrodynamiczny drgań, w więc magnes umieszczony wewnątrz cewki. Jeżeli występują vibracje to magnes się przemieszcza i w cewce indukuje się napięcie zależne od drgań. Podobnie jest w maszynie PM – wirnik z magnesami pod wpływem drgań przemieszcza się w stojanie, a w uzwojeniu indukuje się SEM. Im większe vibracje, tym większa wartość napięcia. Podobnie jak w przypadku czujnika elektrodynamicznego zasilanie zewnętrzne jest niepotrzebne [6].



Rys.7. Badania generatora PM na stole wibracyjnym

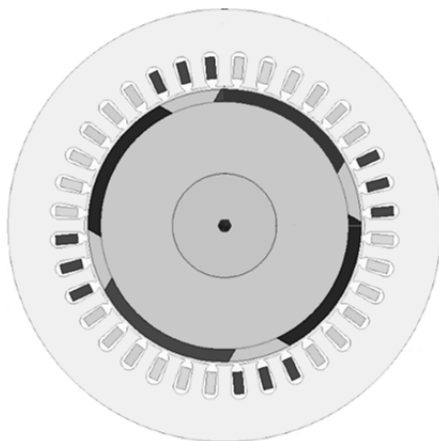


Rys.8. Analiza częstotliwościowa sygnałów: własnych oraz z czujnika drgań – badania statyczne na stole wibracyjnym

Celem sprawdzenia tego zjawiska przebadano niezasilaną i nienapędzaną maszynę wzbudzaną z magnesami trwałymi na stole wibracyjnym – Rys.7. Na rysunku 8 przedstawiono zarejestrowane przebiegi napięć fazowych oraz międzyfazowych – wyindukowanie się napięć potwierdza teorię, że maszyna PM może być używana jako czujnik drgań. Należy jednak wyodrębnić sygnał pomiarowy z sygnału roboczego, co może przysporzyć nieco trudności. Wartość sygnału jest niewielka w stosunku do sygnału roboczego, a więc nie można się na niej opierać. Autor do selekcji wykorzystuje analizę częstotliwościową, jednak należy pamiętać, że jeśli maszyna pracuje z układem przekształtnikowym konieczna jest filtracja takich przebiegów [7]-[9].

Wyniki obliczeń, symulacji oraz badań laboratoryjnych

Do obliczeń, symulacji oraz badań laboratoryjnych wykorzystano generator wzbudzany magnesami trwałymi typu SMzsg132M-4 o parametrach: $P_N = 6,5 \text{ kW}$, $U_N = 82 \text{ V}$, $I_N = 55,9 \text{ A}$, $n_N = 1500 \text{ 1/min}$, $T_N = 41,4 \text{ Nm}$. Generator posiada stojan ze skosem z liczbą żłobków $Q = 36$. Wirnik posiada magnesy naklejone na powierzchni (SPM) – rysunek 9.



Rys.9. Model polowy generatora SMzsg132M-4

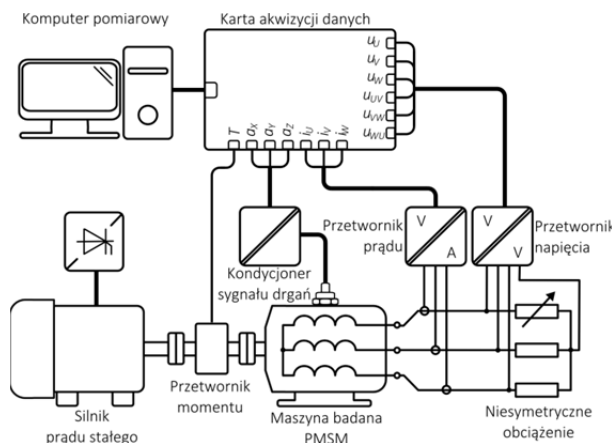
Symulacje komputerowe przeprowadzono w środowisku Ansys Maxwell. Jest to oprogramowanie wykorzystujące MES i służy ono do analizy dwu i trójwymiarowych pól elektromagnetycznych o niskiej częstotliwości. Można je stosować przy rozwiązywaniu zagadnień stałego, jak również zmiennego pola magnetycznego, które może być wywołane przez zmienny w czasie prąd elektryczny płynący w uzwojeniu lub zmienne położenie magnesów trwałych. Obliczenia mogą być wykonywane dla materiałów liniowych i nieliniowych [10].

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 10 zgodnie ze schematem zamieszczonym na ilustracji 11.

Do pomiarów oraz rejestracji i analizy wyników wykorzystano wirtualne przyrządy pomiarowe wykonane w środowisku LabView.

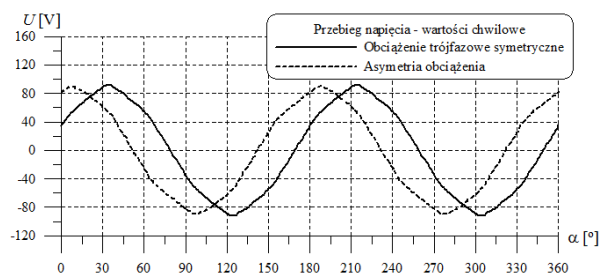


Rys.10. Stanowisko badawcze

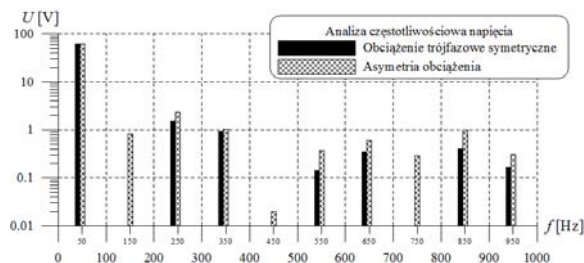


Rys.11. Schemat układu pomiarowego

Poniżej na rysunkach 12-19 oraz w tabelach 3-7 przedstawiono wyniki symulacji oraz badań laboratoryjnych napięcia na zaciskach analizowanego generatora oraz prądu płynącego w jego uzwojeniu (jeden obrót).



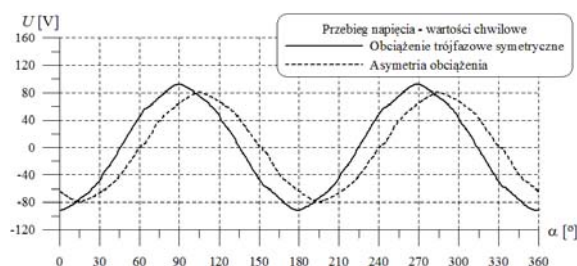
Rys.12. Przebiegi napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych



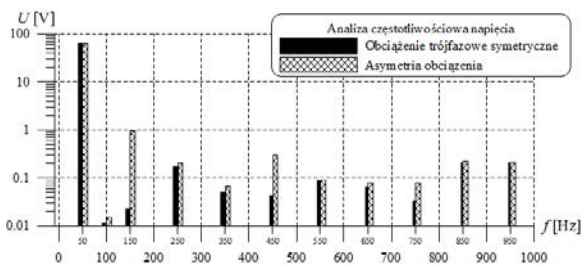
Rys.13. Analiza częstotliwościowa napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych

Tabela 3. Analiza częstotliwościowa napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych

k-ta harmoniczna (1)	U_1 [mV]	U_2 [mV]	U_3 [mV]
Symetria obciążenia	5,0	1,0	1,0
Asymetria obciążenia	826,8	19,9	290,4



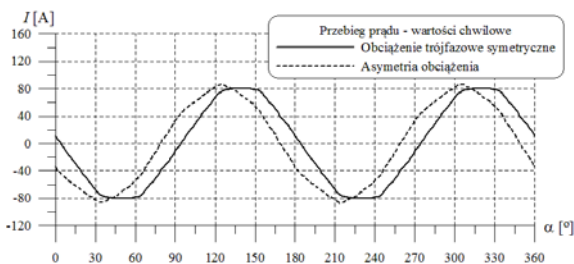
Rys.14. Przebiegi napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych



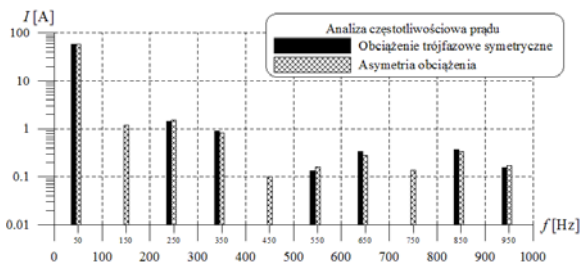
Rys.15. Analiza częstotliwościowa napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych

Tabela 4. Analiza częstotliwościowa napięcia dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych

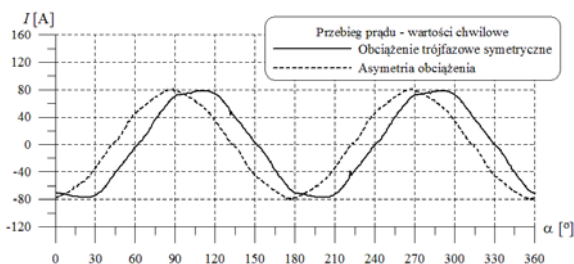
k-ta harmoniczna (1)	U_1 [mV]	U_2 [mV]	U_3 [mV]
Symetria obciążenia	23,0	43,0	32,0
Asymetria obciążenia	969,0	306,0	80,0



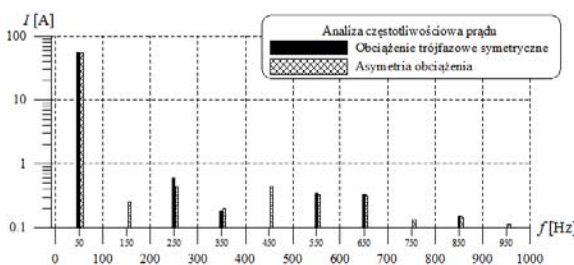
Rys.16. Przebiegi prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych



Rys.17. Analiza częstotliwościowa prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych



Rys.18. Przebiegi prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych



Rys.19. Analiza częstotliwościowa prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych

Tabela 5. Analiza częstotliwościowa prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki symulacji komputerowych

k-ta harmoniczna (1)	I_1 [mA]	I_2 [mA]	I_3 [mA]
Symetria obciążenia	4,0	1,0	1,0
Asymetria obciążenia	1197,9	100,9	137,6

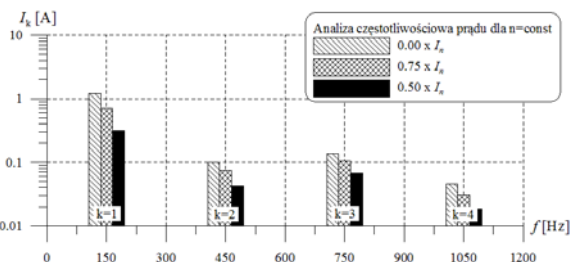
Tabela 6. Analiza częstotliwościowa prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – wyniki badań laboratoryjnych

k-ta harmoniczna (1)	I_1 [mA]	I_2 [mA]	I_3 [mA]
Symetria obciążenia	38,0	31,0	27,0
Asymetria obciążenia	253,0	448,0	135,0

Tabela 7. Analiza częstotliwościowa prądu dla symetrycznego oraz asymetrycznego punktu pracy – porównanie wyników obliczeń, symulacji oraz badań laboratoryjnych

	n [1/min]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Symulacje	1500,0	150,1	450,1	750,1
Badania	1504,8	150,3	450,6	751,0
Równanie (1)	1500,0	150,0	450,0	750,0
	1504,8	150,5	451,4	752,4

Analizując powyższe wyniki można zaobserwować zbieżność zasymulowanych oraz zarejestrowanych przebiegów czasowych napięcia oraz prądu. Zarówno wyniki symulacji oraz badań laboratoryjnych przedstawiają zwiększenie poziomu tych samych częstotliwości w stanach asymetrii. Otrzymane częstotliwości nie odbiegają od obliczeń wykorzystujących równanie (1) – różnica wynosi poniżej 0,15%, co zdaniem autora jest wynikiem bardzo dobrym. Amplitudy różnią się, ale wynika to z tego, że w przypadku symulacji mamy do czynienia z maszyną idealną, natomiast w rzeczywistości pojawia się szereg dodatkowych częstotliwości wynikających z niesymetrii konstrukcji. Jednak zarówno w przypadku symulacji jak również badań otrzymujemy kilku do kilkudziesięciokrotny wzrost poziomu rozpatrywanych częstotliwości.

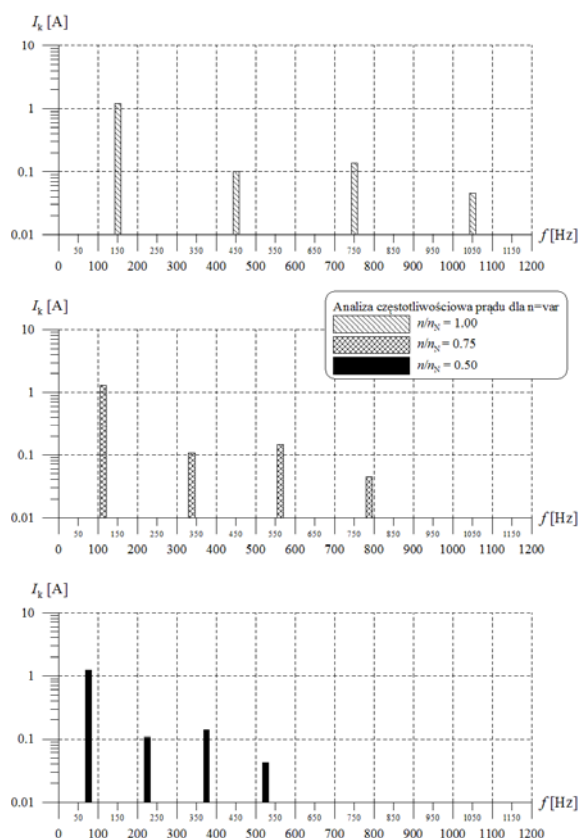


Rys.20. Analiza częstotliwościowa prądu dla różnych stanów asymetrii punktu pracy

Tabela 8. Analiza częstotliwościowa prądu dla różnych stanów asymetrii punktu pracy

k-ta harmoniczna	I_1 [mA]	I_2 [mA]	I_3 [mA]	I_4 [mA]
Asymetria $I = 0.50 I_N$	312,0	42,0	67,0	19,0
Asymetria $I = 0.75 I_N$	697,0	75,0	105,0	31,0
Asymetria $I = 0.00 I_N$	1197,9	100,9	137,6	45,3

Na wykresie 20 oraz w tabeli 8 przedstawiono wyniki analizy częstotliwościowej prądu dla różnych stanów asymetrii obciążenia. Można zaobserwować, iż wraz ze wzrostem asymetrii obciążenia następuje wzrost amplitud charakterystycznych częstotliwości. Świadczy to o możliwości wykorzystania maszyny PM do detekcji drgań powyżej przyjętego poziomu dopuszczalnego w oparciu o wcześniejsze wyskalowanie danego generatora.



Rys.21. Analiza częstotliwościowa prądu dla asymetrii punktu pracy dla różnych prędkości obrotowych

Tabela 9. Analiza częstotliwościowa prądu dla asymetrii punktu pracy dla różnych prędkości obrotowych – wyniki symulacji

Częstotliwość k-tej harmonicznej	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]
Asymetria dla: $n = 0.50n_N$	75,1	225,1	375,1	525,1
Asymetria dla: $n = 0.75n_N$	112,8	337,8	562,8	787,8
Asymetria dla: $n = 1.00n_N$	150,1	450,1	750,1	1050,1

Tabela 10. Analiza częstotliwościowa prądu dla asymetrii punktu pracy dla różnych prędkości obrotowych – wyniki obliczeń (1)

Częstotliwość k-tej harmonicznej	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]
Asymetria dla: $n = 0.50n_N$	75,0	225,0	375,0	525,0
Asymetria dla: $n = 0.75n_N$	112,5	337,5	562,5	787,5
Asymetria dla: $n = 1.00n_N$	150,0	450,0	750,0	1050,0

Powyższy rysunek nr 21 oraz tabele 9-10 przedstawiają wyniki analizy częstotliwościowej prądu dla stanu asymetrii obciążenia dla różnych prędkości obrotowych maszyny. Można zaobserwować zbieżność z wynikami obliczeń (1). Świadczy to o poprawności przyjętego sposobu diagnostyki w całym obszarze prędkości obrotowej generatora PM.

Podsumowanie

Zaletą opisywanego sposobu wykrywania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w generatorach elektrycznych z magnesami trwałymi jest to, że układ pomiarowy nie wymaga stosowania czujników do pomiaru wibracji. Obwód wzbudzenia i uzwojenie twornika pełnią bowiem równocześnie funkcję czujnika pomiarowego drgań. Czujniki do pomiaru drgań stosuje się jednorazowo do skalowania pomiarów dla danego typu maszyny – jeżeli zachodzi potrzeba określenia konkretnego poziomu drgań.

Skalowanie nie jest wymagane w przypadku, gdy celem nie jest wykrycie poziomu drgań, a faktu wystąpienia zaburzenia. Pomiary wibracji tą metodą mogą być wykonywane on-line w czasie normalnej eksploatacji maszyny [11].

Przedstawione wyniki obliczeń, symulacji oraz badań laboratoryjnych potwierdzają możliwość wykorzystywania maszyny z magnesami trwałymi jako czujnik drgań dla samych siebie.

Autor przeanalizował liczne prace z zagadnienia diagnostyki maszyn elektrycznych i nigdzie nie napotkał na podejście, aby do diagnostyki drganiowej wykorzystywane były sygnały własne maszyny [12]-[15]. Świadczy to o innowacyjności i niestandardowym podejściu do zagadnienia diagnostyki maszyn z magnesami trwałymi.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2013-2015 jako projekt badawczy nr 413/L-4/2012 realizowany w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL o nazwie „Wibroakustyczna metoda diagnostyczna silników trakcyjnych i generatorów z magnesami trwałymi na podstawie sygnałów własnych”.

LITERATURA

- [1] Barański M., Glinka T., Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi, Zgłoszenie patentowe P.411942
- [2] Barański M., Glinka T., Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewyważą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi, Zgłoszenie patentowe P.405669
- [3] Szymaniec S., Podhajcecki J., Wyznaczanie drgań własnych stojana silnika indukcyjnego, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 87/2010.
- [4] Szymaniec S., Drgania własne stojana silnika indukcyjnego klatkowego małej mocy – pomiary, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 3/2012
- [5] Barański M., Decner A., A.Polak, Diagnostyka drganiowa węzłów łożyskowych w oparciu o hodograf xy, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2014
- [6] Barański M., Diagnostyka drganiowa generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi – nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważą, Przegląd Elektrotechniczny, 6/2014
- [7] Maciążek M., Pasko M., Bula D., Optimization of time in Active Power Filter control, 8th International Workshop OPEE, 2007
- [8] Maciążek M., Pasko M., Grabowski D., Active power filters-optimization of sizing and placement, Technical Sciences, 2013
- [9] Maciążek M., Pasko M., Prediction in control systems of active power filters, Przegląd Elektrotechniczny, 2010
- [10] Pistelok P., Kądziołka T., Nowa seria wysokosprawnych dwubiegunowych generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 100/2013 cz.2
- [11] Decner A., Zdalne monitorowanie maszyn elektrycznych, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 2011
- [12] Głowacz A., Głowacz W., Głowacz Z., Recognition of armature current of DC generator depending on rotor speed using FFT, MSAF-1 and LDA, Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance And Reliability, 17/2015
- [13] Głowacz A., Diagnostics of dc and induction motors based on the analysis of acoustic signals, Measurement Science Review, 14/2014
- [14] Głowacz A., Diagnostics of direct current machine based on analysis of acoustic signals with the use of symlet wavelet transform and modified classifier based on words, Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance And Reliability, 16/2014
- [15] Głowacz A., Diagnostics of synchronous motor based on analysis of acoustic signals with the use of line spectral frequencies and k-nearest neighbor classifier, Archives of Acoustics, 39/2014

Autorzy: mgr inż. Marcin Barański, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40 - 203 Katowice, E-mail: m.baranski@komel.katowice.pl