

Adam DECNER, Tomasz JAREK

DRGANIA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – ANALIZA SYGNAŁÓW WŁASNYCH

Streszczenie

W artykule zostały przedstawione zagadnienia związane z wykrywaniem i oceną drgań maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi na podstawie sygnałów własnych m.in. takich jak indukowane napięcie. Przedstawiony został obiekt badań oraz stanowisko badawcze służące do badań laboratoryjnych maszyny z magnesami trwałymi poddanej drganiom. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w postaci przebiegów czasowych, widm częstotliwościowych oraz hodografów wektora przestrzennego.

WSTĘP

W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się wzrost zainteresowania maszynami synchronicznymi wzbudzonymi magnesami trwałymi. Spowodowane jest to rozwojem technologii materiałów magnetycznych oraz przekształtników energoelektronicznych. Ważnym aspektem w rozwoju popularności tych maszyn są ich właściwości takie jak [1]:

- duża gęstość mocy na jednostkę objętości,
- wysoka sprawność,
- dobre właściwości regulacyjne w szerokim zakresie prędkości obrotowej,
- duża przeciążalność momentem.

Maszyny z magnesami trwałymi są często wykorzystywane m.in. w układach napędowych pojazdów elektrycznych oraz jako generatory w małych elektrowniach wodnych [2] oraz wiatrowych (przy współpracy z przekształtnikami energoelektronicznymi).

W przeciwieństwie do maszyn synchronicznych z klasycznym wzbudzeniem, strumień wzbudzenia pochodzi od magnesów trwałych umieszczonych najczęściej w wirniku. Zaletą takiego rozwiązania jest brak konieczności doprowadzania napięcia poprzez pierścienie ślizgowe do wirnika. Niestety, ze względu na brak uzwojenia wzbudzenia nie możliwa jest regulacja strumienia wzbudzenia, a co za tym idzie – brak możliwości regulacji napięcia przy pracy prądnicowej. Ciekawą własnością maszyny wzbudzonej magnesami trwałymi jest generowanie się siły elektromotorycznej podczas drgań maszyny. Zjawisko to niejednokrotnie uniemożliwia poprawny pomiar rezystancji uzwojeń – szczególnie w przypadku maszyn o większej liczbie par biegunów. Pod względem konstrukcji, omawianą maszynę można porównać do czujnika drgań – w obydwu przypadkach ruch magnesu względem uzwojenia generuje w nim siłę elektromotoryczną. Z tego podobieństwa wyniknęła idea wykorzystania sygnałów własnych maszyny z magnesami trwałymi (takie jak napięcie czy prąd) do analizy drgań maszyny.

1. BADANIA LABORATORYJNE

1.1. Obiekt badań

Jako obiekt badań została zaprojektowana i wykonana trójfazowa prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi, przedstawiona na rysunku 1.

Najważniejsze parametry i informacje o maszynie:

- moc znamionowa: $P_N = 5 \text{ kW}$,
- prędkość znamionowa $n_N = 1500 \text{ obr/min}$,
- napięcie znamionowe: $U_N = 47 \text{ V}$,
- liczba biegunów: $2p = 4$,

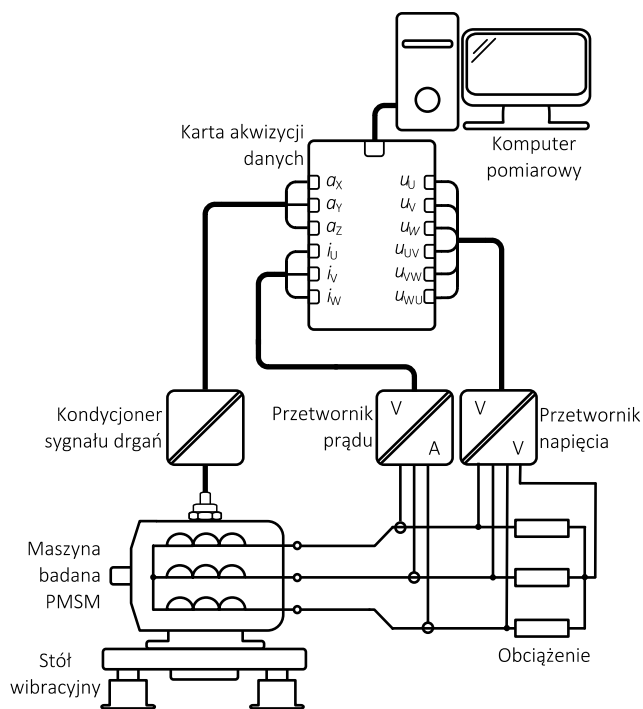
- wznios maszyny: $H = 132 \text{ mm}$,
- uzwojenie: 3-fazowe (gwiazda), symetryczne, rozłożone,
- magnesy: umieszczone wewnątrz wirnika (IPM).



Rys. 1. Obiekt badań – trójfazowa prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi

1.2. Stanowisko badawcze

Układ pomiarowy wraz ze stanowiskiem został przedstawiony na rysunku 2. Badana maszyna wzbudzana magnesami trwałymi została zamocowana na płycie stołu wibracyjnego o regulowanej częstotliwości drgań. Do kadłuba maszyny zamontowano trójosiowy czujnik drgań, którego sygnały przetwarzane były przez dedykowany kondycjoner. Do zacisków omawianego generatora z magnesami trwałymi zostało podłączone obciążenie rezystancyjne oraz zestaw przetworników pomiarowych napięcia i prądu. Sygnały pomiarowe napięcia, prądu oraz przyspieszenia drgań były rejestrowane na komputerze pomiarowych przy wykorzystaniu karty akwizycji danych. Układ pomiarowy umożliwił jednoczesny pomiar wartości chwilowych: 3 napięć fazowych, 3 napięć międzyfazowych oraz 3 prądów generatora a także przyspieszenia drgań w 3 osiach.

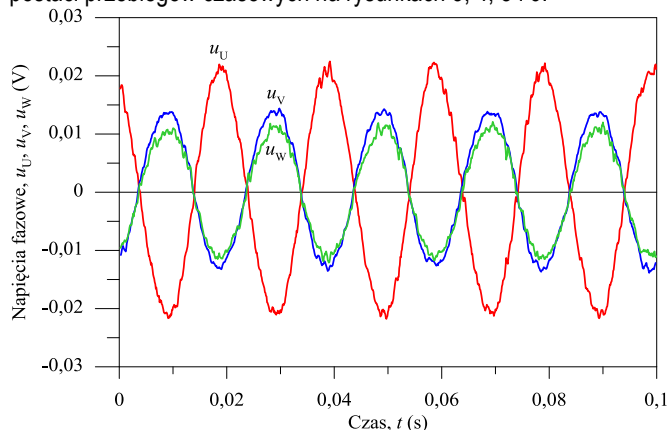


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

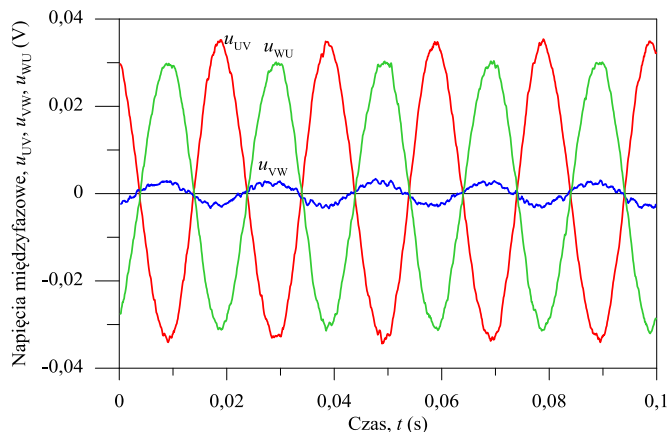
1.3. Wyniki pomiarów

Wartość rezystancyjnego obciążenia została dobrana dla znamionowego punktu pracy. Wirnik maszyny został ustawiony w dowolnej pozycji. Podczas pomiarów częstotliwość drgań stołu wynosiła 50 Hz.

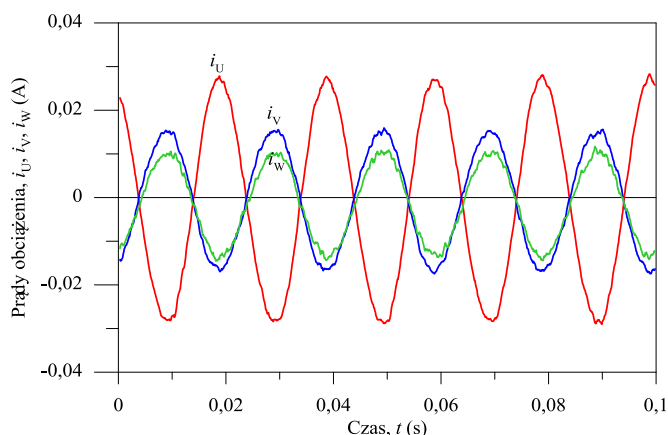
Wyniki pomiarów zostały przedstawione w formie graficznej w postaci przebiegów czasowych na rysunkach 3, 4, 5 i 6.



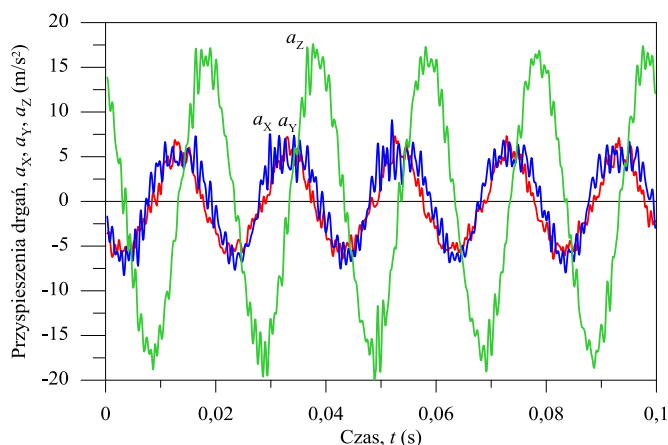
Rys. 3. Przebiegi czasowe generowanych napięć fazowych



Rys. 4. Przebiegi czasowe generowanych napięć międzyfazowych

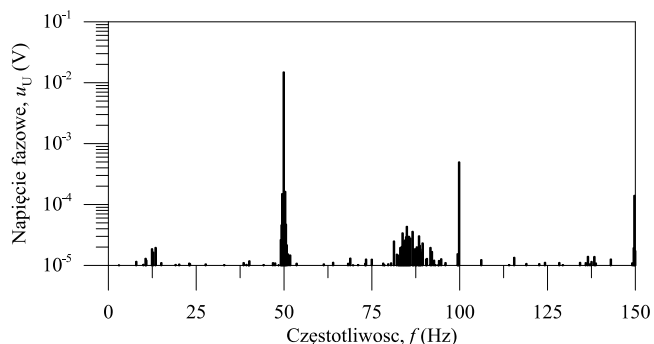


Rys. 5. Przebiegi czasowe prądów obciążenia

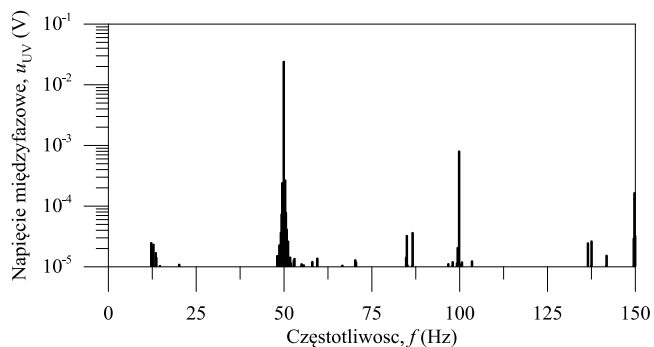


Rys. 6. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań maszyny

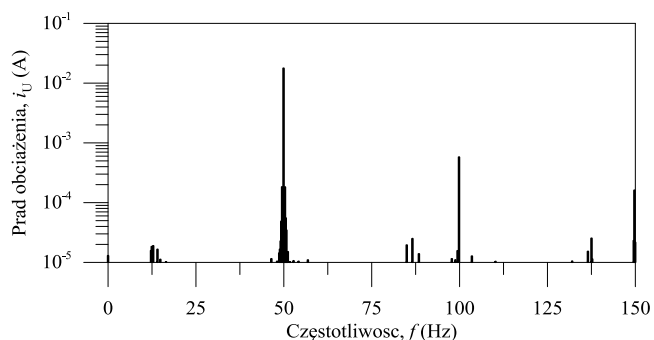
Jak można zauważyć na przedstawionych wykresach, przebiegi napięć fazowych i międzyfazowych, a co za tym idzie także i prądów obciążenia, mają charakter sinusoidalny. Wygenerowanie się napięć na zaciskach generatora świadczy o tym, że wirnik z magnesami przemieszcza się względem uzwojonego stojanu pod wpływem drgań. Przebiegi czasowe napięć fazowych u_V i u_W są ze sobą w fazie, zatem wirnik nie wykonuje w tym przypadku ruchu obrotowego. Niewielkie napięcie międzyfazowe u_{VW} świadczy o tym, że wirnik został ułożony w pozycji, w której oś q wirnika prawie pokrywa się z osią fazy U . Na rysunkach 7, 8, 9 i 10 przedstawiono widma częstotliwościowe przebiegów czasowych napięcia fazowego, napięcia międzyfazowego, prądu obciążenia oraz przyspieszenia drgań w jednej z osi. Można zauważyć, że częstotliwość pierwszej harmonicznej wszystkich sygnałów jest identyczna i wynosi 50 Hz. Widoczna jest także druga harmoniczna (100 Hz) oraz trzecia (150 Hz). Na podstawie przebiegów czasowych oraz widm częstotliwościowych można stwierdzić, że sygnały drgań oraz sygnały własne badanej maszyny (napięcia i prądy) mają bardzo zbliżony charakter. Można więc na ich podstawie określić (bez wykorzystania czujników drgań) czy nie występują drgania maszyny.



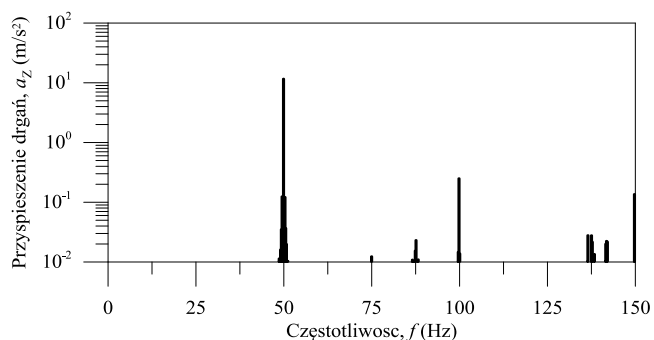
Rys. 7. Widmo częstotliwościowe napięcia fazowego.



Rys. 8. Widmo częstotliwościowe napięcia międzyfazowego.

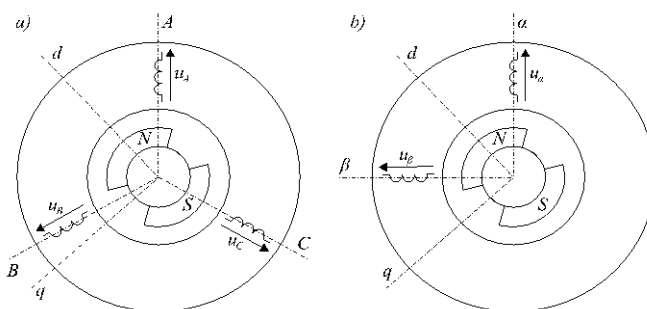


Rys. 9. Widmo częstotliwościowe prądu obciążenia.



Rys. 10. Widmo częstotliwościowe sygnału przyspieszenia drgań.

Inną formą prezentacji generowanego pod wpływem drgań napięcia jest hodograf wektora przestrzennego [3]. Symetryczny układ trójfazowy możemy przedstawić w postaci równoważnego układu dwufazowego – w układzie ortogonalnym stacjonarnym (rysunek 11).



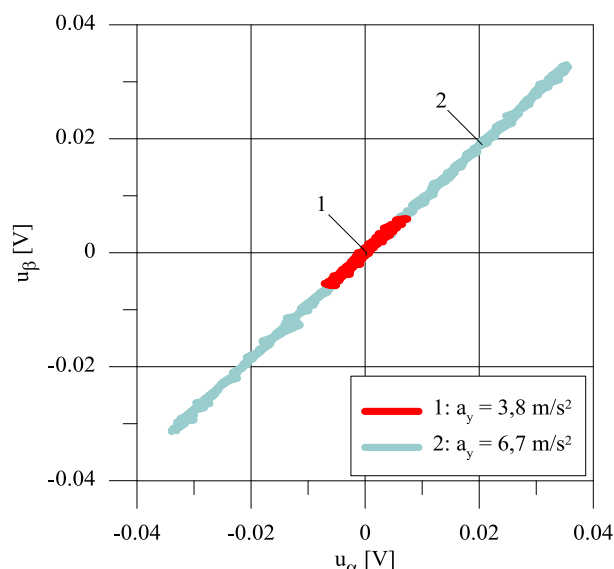
Rys. 11. Interpretacja ukł. 3-fazowego (a) oraz ortogonalnego (b).

Składowe u_α i u_β układu ortogonalnego można wyznaczyć z następujących zależności [4]:

$$u_\alpha = \frac{2}{3} \left(u_U - \frac{u_V + u_W}{2} \right) = u_U \quad (1)$$

$$u_\beta = \frac{u_V - u_W}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Przykład hodografu napięcia generowanego podczas drgań maszyny został przedstawiony na rysunku 12. Na wspólnym wykresie zostały porównane hodografy dla różnych wartości przyspieszeń drgań maszyny (w osi y) lecz tej samej pozycji wirnika względem stojana. Jak można zauważyć, powstałe figury mają ten sam kształt – różnią się natomiast rozmiarem. Wraz ze wzrostem drgań rośnie długość hodografu. Dla różnych kątów położenia wirnika zmienia się kąt nachylenia powstałej figury.



Rys. 12. Hodografy wektora przestrzennego napięcia dla różnych przyspieszeń drgań maszyny.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych zostało przedstawione zjawisko indukowania się siły elektromotorycznej w uzwojeniu maszyny z magnesami trwałymi, która jest poddana wibracjom. Zdaniem autorów, sygnały napięciowe oraz prądowe (podczas obciążenia) mogą służyć do wstępnej oceny intensywności drgań maszyny. Co najważniejsze, metoda ta nie wymaga zastosowania drogich i skomplikowanych czujników i aparatury a także w szczególnych przypadkach nie jest wymagany dostęp do kadłuba maszyny.

BIBLIOGRAFIA

1. Król E., Rossa R., *Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009.
2. Bernatt J., Pistelok P., Rossa R., *Mała elektrownia wodna z wysokosprawnym generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi*. Przegląd Elektrotechniczny 2015, nr 10.
3. Baranski M., Jarek T., *Analysis of PMSM vibrations based on back-EMF measurements*. Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on.
4. Rudnicki T., Czerwiński R., *Pomiar prądów fazowych silnika z magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 4/2012.

INFORMACJA

Praca jest 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”.

VIBRATIONS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE – ANALYSIS OF OWN SIGNALS

Abstract

The article presents issues relating to the detection and evaluation of vibration of permanent magnet synchronous machine based on own signals, among others, such as the induced voltage. The object of study and test stand with measuring system used for laboratory measurements have been presented. The measurement results are presented as waveforms, frequency spectrums and space vector hodographs.

Autorzy:

dr inż. **Adam Decner** – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

mgr inż. **Tomasz Jarek** – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188