

Detekcja asymetrii szczeliny powietrznej w generatorze ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, bazująca na analizie częstotliwościowej prądu

Marcin Barański

1. Wstęp

Asymetria szczeliny powietrznej w maszynie elektrycznej jest zjawiskiem negatywnym i może doprowadzić do poważnej usterki całego napędu. Dlatego ważne jest bezzwłoczne przeciwdziałanie – w przeciwnym razie uszkodzenie będzie się pogłębiać.

Nierównomierny rozkład szczeliny powietrznej może powstawać już na etapie wytwarzania danej maszyny i nie wyklucza jej pracy, jednak będzie się to objawiać wahaniami głównie momentu elektromagnetycznego. Pulsacje będą powodowały wzrost poziomu wibracji oraz hałasu.

Wzrost poziomu wibracji w maszynie elektrycznej jest zazwyczaj objawem uszkodzenia. Zignorowanie symptomów zwykle doprowadza do awarii, której koszty mogą przewyższyć koszt napędu [1].

2. Ekscentryczność

Niesymetryczna szczelina posiada największy oraz najczęstszy wpływ na asymetryczny rozkład pola magnetycznego w maszynie elektrycznej. Może być ona spowodowana ugięciami wału lub kadłuba, mimośrodowym osadzeniem rdzenia wirnika na wale wynikającym z sumowania się łańcucha tolerancji technologicznych, uszkodzeniem łożyska lub gniazda łożyskowego, a w przypadku maszyn z magnesami trwałymi niesymetrycznym osadzeniem magnesów na wirniku. Dodatkowo w takich maszynach może występować moment zaczepowy, który również powoduje niesymetrię pola magnetycznego [2].

Wynikiem niesymetrycznego rozkładu szczeliny jest naciąg magnetyczny. Jest to w większości przypadków siła promieniowa, która może być również następstwem:

- nieprawidłowego wykonania uzwojeń – powstaje wówczas asymetria sił magnetomotorycznych występujących w obwodzie magnetycznym;
- anizotropii magnetycznej rdzenia oraz asymetrii szczeliny powietrznej względem osi stojana.

Istnieją trzy rodzaje asymetrii szczeliny powietrznej zwanej ekscentrycznością:

- statyczna – rys. 1;
- dynamiczna – rys. 2;
- mieszana – rys. 3.

Ekscentryczność statyczna charakteryzuje się tym, że położenie maksymalnej szczeliny na obwodzie maszyny jest stałe

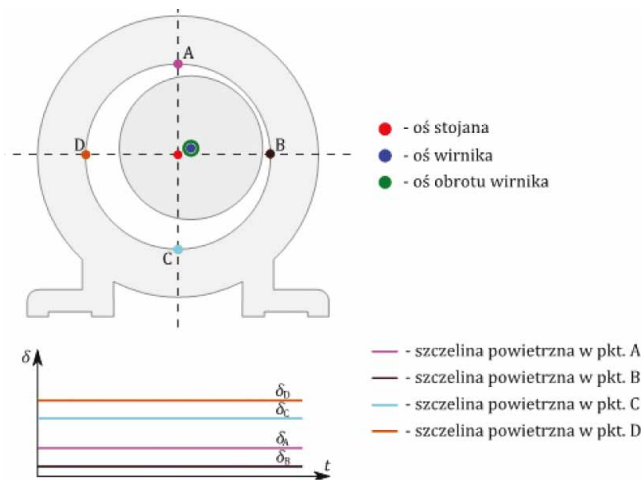
Streszczenie: W artykule autor przedstawia wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na prąd generatora ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych. Publikacja zawiera wyniki symulacji komputerowych wykonanych w programie Ansys Maxwell 2D oraz wyniki badań laboratoryjnych dotyczące zjawiska ekscentryczności. Do badań wykorzystano specjalną konstrukcję generatora wyposażonego w tarcze łożyskowe umożliwiające zmianę usytuowania wirnika względem stojana. Rozwiązanie to zostało opatentowane. Przedstawiono przebiegi czasowe prądu wraz z analizą częstotliwościową – zarówno dla symulacji, jak również badań laboratoryjnych. Wyselekcjonowano szereg częstotliwości, które towarzyszą asymetrii szczeliny powietrznej. W podsumowaniu przedstawiono również autorskie równanie matematyczne, które stanowi pewnego rodzaju marker dla rozpatrywanego zjawiska. Pozwala ono na podstawie analizy częstotliwościowej prądu maszyny zdiagnozować rozkład szczeliny powietrznej.

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

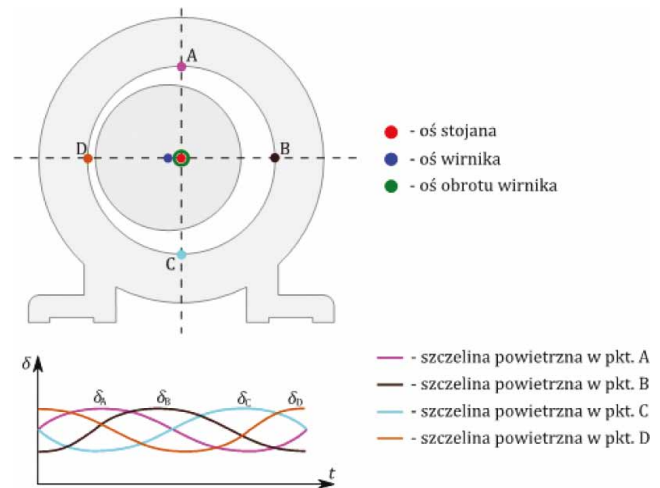
AIR GAP ASYMMETRY DETECTION OF PM GENERATOR BASED ON FREQUENCY ANALYSIS OF CURRENT

Abstract: In this article author described an influence of air gap asymmetry of PM generator current. The publication contains results of computer simulations and laboratory tests results of eccentricity. For tests was used generator with special bearing shields. These shields make possible change position between rotor and stator of machine. This is the subject of patent application. The waveforms of current and frequency analysis for simulations and laboratory tests are presented in the paper. A series of frequencies has been selected that accompany the asymmetry of the air gap. The mathematical equation – a marker for this disruption is presented in the summary. This equation make possible air gap distribution diagnose based on frequency analysis of generator current.

Keywords: electrical machine, permanent magnets, diagnostics, eccentricity



Rys. 1. Ekscentryczność statyczna

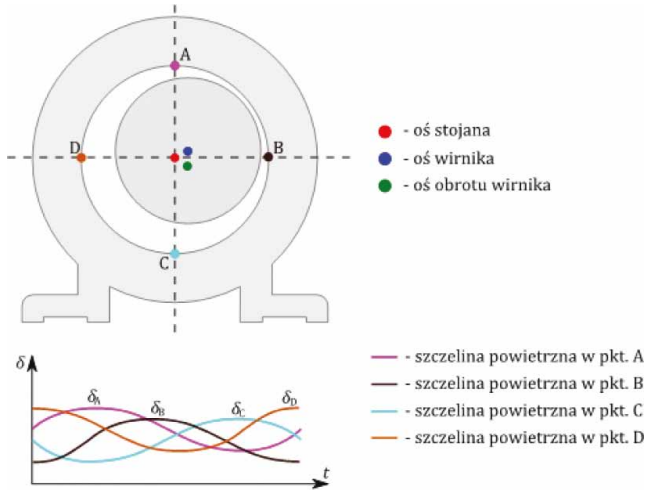


Rys. 2. Ekscentryczność dynamiczna

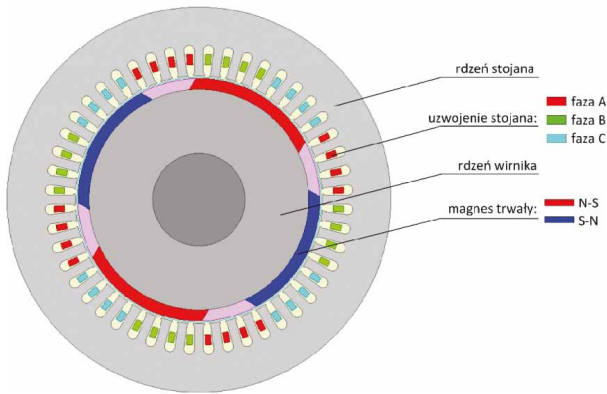
i może wynikać z owalności rdzenia bądź błędów montażowych. W przypadku mimośrodowości dynamicznej położenie maksymalnej szczeliny zmienia się wraz z pozycją wirnika i może wynikać ze zużycia się węzłów łożyskowych, zgiętego wału itp. Najczęściej jest więc spowodowana zużyciem się maszyny podczas jej eksploatacji. Mieszana jest połączeniem obu powyższych.

3. Symulacje komputerowe

Do symulacji wykorzystano model polowo-obwodowy generatora z magnesami trwałymi typu (rys. 4): PMzsg132M-4 ze stojanem 48 żłobkowym i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny: $P_N = 6,0 \text{ kW}$, $U_N = 84 \text{ V}$, $I_N = 41,2 \text{ A}$, $n_N = 1500 \text{ 1/min}$, $\eta_N = 91,0\%$. Maszyna została zaprojektowana ze szczeliną powietrzną



Rys. 3. Ekscentryczność mieszana



Rys. 4. Model polowo-obwodowy generatora z magnesami trwałymi

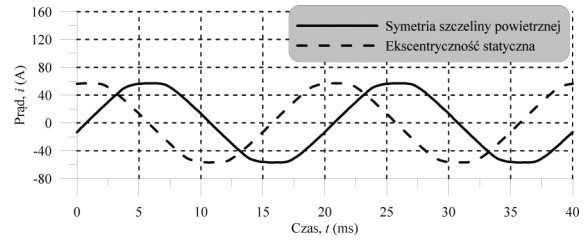
$\delta = 1,5 \text{ mm}$ – celem ułatwienia modelowania asymetrii rozkładu pola.

Zarówno symulacje komputerowe, jak również późniejsze badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych. Natomiast podczas badań przy pracy z asymetrycznym rozkładem pola nie przekraczano prądu znamionowego. Symulacje oraz badania wykonano dla asymetrii $\delta_{min} = 0,5 \text{ mm}$, $\delta_{max} = 2,5 \text{ mm}$.

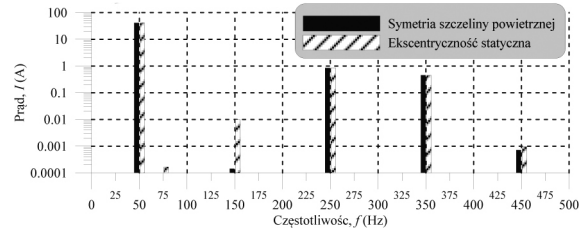
Na rysunkach 5 oraz 7 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądu obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 8 oraz 9. W tabelach 1 oraz 2 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu generatora PM, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.

4. Badania laboratoryjne

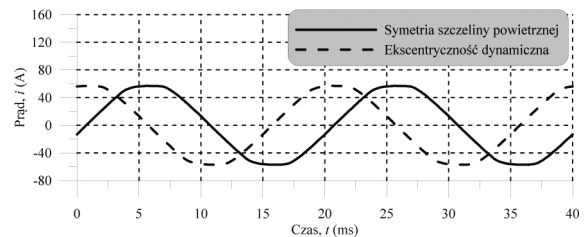
Badania laboratoryjne przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 9.



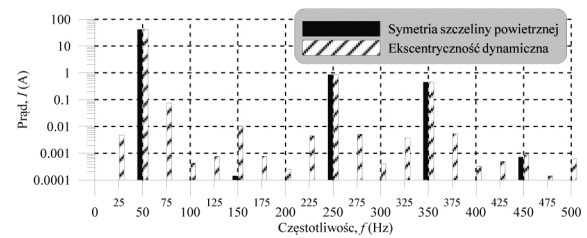
Rys. 5. Przebiegi czasowe prądu – symulacje komputerowe



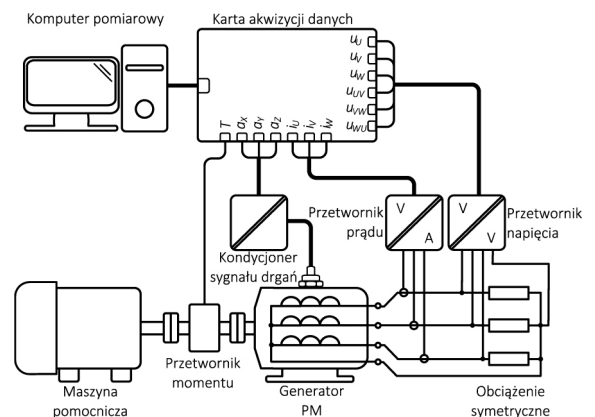
Rys. 6. Widma częstotliwościowe prądu – symulacje komputerowe



Rys. 7. Przebiegi czasowe prądu – symulacje komputerowe



Rys. 8. Widma częstotliwościowe prądu – symulacje komputerowe



Rys. 9. Schemat pomiarowy

Tabela 1. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych harmonicznych

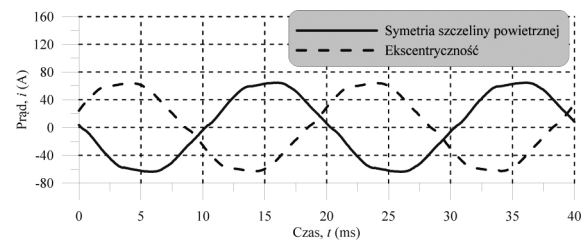
Składowa prądu	Symetria	Asymetria statyczna	Wzrost %
I_{75} (mA)	< 0,1	0,2	> 100
I_{150} (mA)	0,2	10,0	9800

Aby uzyskać asymetrię szczeliny powietrznej, zastosowano specjalne tarcze łożyskowe (rys. 10), które umożliwiają uzyskiwanie przesunięć między stojanem a wirnikiem w osiach x, y oraz z. Konstrukcja tarczy została opatentowana [3]. Tarcze umożliwiają zmiany geometrii w kierunkach x, y o ± 2 mm, natomiast w kierunku z o ± 10 mm od stanu symetrii.

Na rysunku 11 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądu obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi, pracującego w stanie obciążenia, oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 12 oraz 13. W tabeli 3 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu generatora PM, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 10. Generator ze zmodyfikowanymi tarczami łożyskowymi



Rys. 11. Przebiegi czasowe prądu – badania laboratoryjne

Tabela 2. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych harmonicznyc

Składowa prądu	Symetria	Asymetria dynamiczna	Wzrost %
I_{25} (mA)	< 0,1	4,8	> 4700
I_{75} (mA)	< 0,1	76,2	> 76100
I_{100} (mA)	< 0,1	0,4	> 300
I_{125} (mA)	< 0,1	0,8	> 700
I_{175} (mA)	< 0,1	0,8	> 700
I_{200} (mA)	< 0,1	0,3	> 200
I_{225} (mA)	< 0,1	4,4	> 4300
I_{275} (mA)	< 0,1	5,1	> 5000
I_{300} (mA)	< 0,1	0,4	> 300
I_{325} (mA)	< 0,1	3,7	> 3600
I_{375} (mA)	< 0,1	5,3	> 5200
I_{400} (mA)	< 0,1	0,3	> 200
I_{425} (mA)	< 0,1	0,5	> 400
I_{475} (mA)	< 0,1	0,2	> 100
I_{500} (mA)	< 0,1	0,6	> 500

Tabela 3. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych harmonicznyc

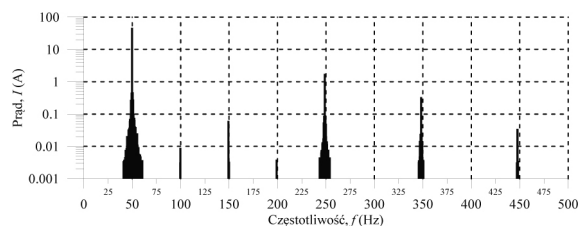
Składowa prądu	Symetria	Asymetria	Wzrost %
I_{75} (mA)	< 1,0	6,0	> 590
I_{125} (mA)	< 1,0	6,8	> 580
I_{200} (mA)	4,0	7,0	75
I_{225} (mA)	< 1,0	8,0	> 700
I_{300} (mA)	< 1,0	24,0	> 2 300
I_{325} (mA)	< 1,0	2,4	> 230
I_{375} (mA)	< 1,0	7,0	> 600

5. Podsumowanie

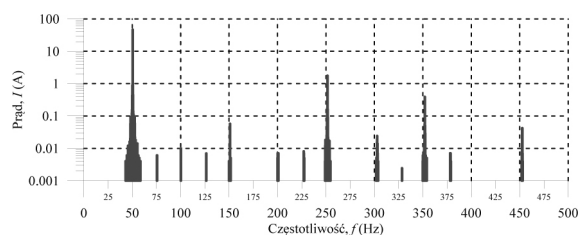
Wyselekcjonowane na podstawie analizy częstotliwościowej prądu obciążenia generatora częstotliwości potwierdzają, iż możliwe jest diagnozowanie asymetrii szczeliny powietrznej poprzez analizę prądu. Przedstawione wyniki symulacji komputerowych oraz badań laboratoryjnych pozwoliły autorowi na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi (1), (2) poszczególnych częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska [4].

$$f_{k1} = k \cdot f - \frac{(p-1)f}{p} \tag{1}$$

$$f_{k2} = 2k \cdot f \tag{2}$$



Rys. 12. Widmo częstotliwościowe prądu dla symetrycznej szczeliny powietrznej



Rys. 13. Widma częstotliwościowe prądu dla asymetrycznej szczeliny powietrznej

gdzie:

- f_{k1}, f_{k2} – szukane częstotliwości;
- p – liczba par biegunów;
- k – liczba naturalna;
- f – częstotliwość pierwszej harmonicznej.

Literatura

- [1] BARAŃSKI M., DECNER A., POLAK A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*. IEEE TDEI, 5/2014.
- [2] WOLNIK T., GLINKA T.: *Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej w tarczowym silniku indukcyjnym*. „Przeгляд Elektrotechniczny” 7/2017.
- [3] BARAŃSKI M., GLINKA T., BIAŁAS A., BĘDKOWSKI B.: *Tarcza łożyskowa maszyny elektrycznej do stanowiska badawczego*. Patent, PAT.225062.
- [4] BARAŃSKI M.: *Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych*. „Przeгляд Elektrotechniczny” 11/2015.

 Marcin Barański
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

artykuł recenzowany