# Politechnika Śląska Wydział Elektryczny Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie

# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

# mgr inż. Marcin Barański

# DIAGNOSTYKA DRGAŃ W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI WYKORZYSTUJĄCA SYGNAŁY WŁASNE

promotor: dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL

promotor pomocniczy: dr inż. Artur Polak, KOMEL

Gliwice, 2018

# Spis treści

SPIS	TREŚCI	2
SPIS	OZNACZEŃ	5
1. W	/STĘP	7
1.1.	ŹRÓDŁA DRGAŃ W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH	7
	1.1.1. Łożyska	
	1.1.2. Naciąg magnetyczny	
	1.1.3. Niewyważenie	
	1.1.4. Konstrukcja kadłuba	
	1.1.5. Sprzęgnięcie	
	1.1.6. Posadowienie	
	1.1.7. Asymetria zasilania lub obciążenia	
1.2.	GENEZA WYKORZYSTANIA MASZYNY JAKO CZUJNIK DRGAŃ	
1.3.	POTRZEBA WYKORZYSTANIA MASZYNY JAKO CZUJNIK DRGAŃ	
1.4.	AKTUALNY STAN TECHNIKI	
1.5.	CEL PRACY	
1.6.	TEZA PRACY	
1.7.	ZAKRES PRACY	
2. M	IETODOLOGIA	
2.1.	Przedmiot badań	
	2.1.1. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 36$	
	2.1.2. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 48$	
	2.1.3. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 60$	
	2.1.4. Wirnik SPM bez skosu o liczbie biegunów $2p = 4$	
	2.1.5. Wirnik SPM ze skosem o liczbie biegunów $2p = 4$	
	2.1.6. Wirnik SPM bez skosu o liczbie biegunów $2p = 12$	
	2.1.7. Wirnik IPM	
	2.1.8. Wirnik IPMV	
2.2.	OBIEKTY BADAŃ	
2.3.	CEL BADAŃ	
2.4.	APARATURA	
3. M	IODEL MATEMATYCZNY I SYMULACJE KOMPUTEROWE	
3.1.	Ogólny model matematyczny	
3.2.	SYMULACJE KOMPUTEROWE	
<b>4. B</b>	ADANIA LABORATORYJNE NA STOLE WIBRACYJNYM	
4.1.	STÓŁ WIBRACYJNY	
4.2.	OBIEKT BADAŃ	
4.3.	BADANIA LABORATORYJNE	

4.3.1.	Sygnały własne maszyny PM a sygnał z czujnika drgań przy wymuszeniu impulsowym	. 28
4.3.2.	Sygnały własne maszyny PM a sygnał z czujnika drgań przy wymuszeniu jednostajnym	. 30
4.3.3.	Badania na stole wibracyjnym przy napędzaniu maszyny	. 34
4.4. Pods	UMOWANIE	36
5. ASYME	TRIA OBCIĄŻENIA GENERATORA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI	37
5.1. Symu	JLACJE KOMPUTEROWE	37
5.1.1.	Wpływ asymetrii obciążenia generatora PM na poziom wibracji	. 37
5.1.2.	Prąd generatora PM przy asymetrii obciążenia	. 38
5.1.3.	Napięcie międzyfazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia	. 39
5.1.4.	Napięcie fazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia	. 40
5.2. BADA	ANIA LABORATORYJNE	41
5.2.1.	Wpływ asymetrii obciążenia generatora na przebieg momentu i drgań	. 41
5.2.2.	Prąd generatora PM przy asymetrii obciążenia	. 42
5.2.4.	Napięcie fazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia	. 44
5.3. Pods	UMOWANIE	45
6. SILNIK	PM PRZY ASYMETRYCZNYM ZASILANIU.	47
6.1. BADA	ANIA LABORATORYJNE	47
6.1.1.	Asymetria zasilania a poziom drgań silnika PM na biegu jałowym	. 47
6.1.2.	Asymetria zasilania a przebieg momentu i drgań silnika PM w stanie obciążenia	. 51
6.1.2.1	1. Prąd obciążenia silnika PM przy asymetrii zasilania	. 52
6.2. PODS	UMOWANIE	55
7. ASYME	TRIA SZCZELINY POWIETRZNEJ	57
7.1. Symu	JLACJE KOMPUTEROWE GENERATORA PM	57
7.1.1.	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM	1. 58
7.1.2.	Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM	. 60
7.1.3.	Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na przebieg momentu	. 62
7.1.4.	Prąd obciążenia generatora PM przy asymetrii szczeliny powietrznej	. 63
7.1.5.	Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia	. 65
7.1.6.	Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia	. 67
7.2. BADA	ANIA LABORATORYJNE GENERATORA PM	69
7.2.1.	Asymetria szczeliny powietrznej generatora PM na biegu jałowym a drgania	. 69
7.2.2.	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej	. 70
7.2.3.	Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej	. 72
7.2.4.	Asymetria szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia a poziom wibracji	. 73
7.2.5.	Prąd obciążenia generatora PM przy asymetrii szczeliny powietrznej	. 74
7.2.6.	Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia	. 76
7.2.7.	Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia	. 77
7.3. Symu	JLACJE KOMPUTEROWE SILNIKA PM	78
7.3.1.	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM	. 79

	7.3.2.	Napięcia fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM	81
	7. <i>3.3</i> .	Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom momentu w silniku PM w stanie obciąż	enia83
	7.3.4.	Prąd obciążenia silnika PM przy asymetrii szczeliny powietrznej	84
	7.3.5.	Analiza napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej silnika l	₽M w
	stanie	obciążenia	86
7.4.	BADA	NIA LABORATORYJNE SILNIKA PM	91
	7.4.1.	Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom wibracji w silniku PM na biegu jałowy	m 91
	7.4.2.	Prąd biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM	92
	7.4.3.	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej	94
	7.4.4.	Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej	95
	7.4.5.	Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom wibracji w silniku PM w stanie obciąże	enia 96
	7.4.6.	Prąd przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia	97
	7.4.7.	Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia	99
	7.4.8.	Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia	100
7.5.	PODS	UMOWANIE	102
8. N	IEWY	WAŻENIE MASZYNY ZE WZBUDZENIEM OD MAGNESÓW TRWAŁYCH	104
8.1.	WPŁY	W NIEWYWAŻENIA NA POZIOM WIBRACJI W GENERATORZE <b>PM</b>	104
	8.1.1.	Wpływ niewyważenia na poziom wibracji pracującego na biegu jałowym	105
	8.1.2.	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy niewyważeniu	105
	8.1. <b>3</b> .	Napięcie fazowe biegu jałowego przy niewyważeniu	107
	8.1.4.	Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w stanie obciążenia	108
	8.1.5.	Prąd obciążenia przy niewyważeniu	109
	8.1.6.	Napięcie międzyfazowe przy niewyważeniu w stanie obciążenia	110
	8.1.7.	Napięcie fazowe generatora PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia	112
8.2.	WPŁY	W NIEWYWAŻENIA NA POZIOM WIBRACJI W SILNIKU PM	113
	8.2.1.	Wpływ niewyważenia na poziom wibracji silnika pracującego na biegu jałowym	113
	8.2.2.	Prąd biegu jałowego przy niewyważeniu	114
	<i>8.2.3</i> .	Napięcie międzyfazowe biegu jałowego silnika PM przy niewyważeniu	116
	8.2.4.	Napięcie fazowe biegu jałowego silnika PM przy niewyważeniu	117
	8.2.5.	Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w silniku PM w stanie obciążenia	118
	8.2.6.	Prąd obciążenia silnika PM przy niewyważeniu	119
	8.2.7.	Napięcie międzyfazowe silnika PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia	121
	8.2.8.	Napięcie fazowe silnika PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia	122
8.3.	PODS	JMOWANIE	123
9. P	ODSUI	MOWANIE	125
9.1.	ZAKR	ES DALSZYCH PRAC	127
SPIS	RYSU	NKÓW	128
SPIS	TABE	L	132
BIBL	JOGR	AFIA	134

# Spis oznaczeń

а	_	przyspieszenie drgań
a <sub>p</sub>	_	wartość szczytowa przyspieszenia
C <sub>a</sub>	_	współczynnik szczytu przyspieszenia
C <sub>v</sub>	_	współczynnik szczytu prędkości drgań
d	_	średnica elementu tocznego
D	_	średnica podziałowa łożyska
е	_	siła elektromotoryczna
$e_{\rm AB}$	_	siła elektromotoryczna czujnika elektrodynamicznego
e <sub>U,V,W</sub>	_	siła elektromotoryczna indukowana w fazach U, V, W
$E_1, E_2, E_{k1}, E_{k2}$	_	amplituda siły elektromotorycznej
f	_	częstotliwość
$f_0$	_	częstotliwość od elementu tocznego
$f_1$	_	pierwsza szukana częstotliwość
$f_2$	_	druga szukana częstotliwość
f <sub>H01</sub>	_	częstotliwość pierwszej harmonicznej
ſĸ	_	k-ta częstotliwość
f <sub>k1</sub>	_	pierwsza szukana częstotliwości dla k-tej składowej
f <sub>k2</sub>	_	druga szukana częstotliwości dla k-tej składowej
f <sub>kosz</sub>	_	częstotliwość od koszyka
$f_{\rm r}$	_	częstotliwość wynikająca z prędkości obrotowej
fwew	_	częstotliwość od bieżni wewnętrznej
fzew	_	częstotliwość od bieżni zewnętrznej
h	_	wznios osi wału
$\eta_{ m N}$	_	sprawność znamionowa
i	_	wartość chwilowa prądu obciążenia
Ι	_	wartość skuteczna prądu obciążenia
$i_0$	_	wartość chwilowa prądu biegu jałowego
$I_0$	_	wartość skuteczna prądu biegu jałowego
I <sub>0 XX</sub>	_	wartość skuteczna składowej prądu o danej częstotliwości dla biegu jałowego
<i>i</i> <sub>A, B, C</sub>	_	wartość chwilowa prądu w fazach A, B, C
I <sub>N</sub>	_	wartość skuteczna prądu znamionowego
$i_{\rm U, V, W}$	_	wartość chwilowa prądu w fazach A, B, C
I <sub>XX</sub>	_	wartość skuteczna składowej prądu o danej częstotliwości
l	_	długość ramienia
$L_{\rm U, V, W}$	_	indukcyjność własna fazy U, V, W
L <sub>UV, VW, WU</sub>	_	indukcyjność wzajemna między fazami U i V, V i W, W i U
т	_	liczba faz
m <sub>niew</sub>	_	masa niewyważona
n	_	prędkość obrotowa
Ν	_	liczba zwojów
n <sub>N</sub>	_	znamionowa prędkość obrotowa
Р	—	moc czynna
р	_	liczba par biegunów
P <sub>N</sub>	_	moc czynna znamionowa
$Q_{\rm s}$	_	liczba żłobków
R	_	rezystancja
R <sub>s</sub>	_	rezystancja fazy
t	_	czas
Т	_	moment na wale maszyny
T <sub>max</sub>	_	wartość maksymalna momentu
$T_{\min}$	_	wartość minimalna momentu
$T_{\rm pp}$	_	wartość międzyszczytowa momentu
U	_	napięcie

$u_{AB}$	—	napięcie wyjściowe czujnika elektrodynamicznego
$U_{ m N}$	—	napięcie znamionowe
$u_{\rm U, \ V, \ W}$	_	wartość chwilowa napięcia faz U, V, W
$u_{\rm U0}$	_	wartość chwilowa napięcia biegu jałowego fazy U
$u_{\rm UV, VW, WU}$	_	wartość chwilowa napięcia między fazami U i V, V i W, W i U
$u_{\rm UV0}$	_	wartość chwilowa napięcia biegu jałowego między fazami U i V
$U_{\mathrm{U, V, W}}$	—	wartość skuteczna napięcia faz U, V, W
$U_{\rm U~XX}$	—	wartość skuteczna składowej napięcia fazowego o danej częstotliwości
$U_{ m U0}$	—	wartość skuteczna napięcia biegu jałowego fazy U
$U_{\rm U0~XX}$	—	wartość skuteczna składowej napięcia fazowego o danej częstotliwości dla biegu jałowego
UUV, VW, WU	—	wartość skuteczna napięcia między fazami U i V, V i W, W i U
U <sub>UV XX</sub>	—	wartość skuteczna napięcia międzyfazowego dla danej częstotliwości
$U_{ m UV0}$	—	wartość skuteczna napięcia biegu jałowego między fazami U i V
	—	wartość skuteczna składowej napięcia międzyfazowego o danej częstotliwości dla biegu
$U_{\rm UV0~XX}$		jałowego
v	—	wartość skuteczna prędkości drgań,
v <sub>max</sub>	—	wartość maksymalna prędkości drgań
v <sub>p</sub>	—	wartość szczytowa prędkości drgań,
$v_{X, Y, Z}$	—	wartość prędkości drgań w osi X, Y, Z
$X_{d}$	—	reaktancja w osi d
$X_{q}$	—	reaktancja w osi q
Ζ	_	liczba elementów tocznych
β	_	kąt pracy łożyska
δ	_	szczelina powietrzna
$\delta_{\min}$	_	minimalna szczelina powietrzna
$\delta_{\max}$	_	maksymalna szczelina powietrzna
φ1, φ2, φk1, φk2	—	kąt przesunięcia sygnału sinusoidalnego
η	—	sprawność
$\Theta$	—	kąt położenia wirnika
$\Phi_{\rm m}$	_	strumień magnetyczny

# 1. Wstęp

# 1.1. Źródła drgań w maszynach elektrycznych

Obecnie niemal w każdym zakładzie przemysłowym znajdują się napędy elektryczne, które wymagają badań okresowych. Diagnostyka monitorująca ma na celu przeciwdziałać uszkodzeniom, które pociągają za sobą wysokie koszty napraw. Stopniowa degradacja niektórych elementów urządzenia jest spowodowana w dużej mierze nadmiernym poziomem wibracji, które od zawsze towarzyszą pracy maszyn wirujących. Diagnostyka drganiowa ma za zadanie uzyskanie zbioru informacji dotyczących stopnia zużycia danych podzespołów [1].

Na wibracje w maszynie elektrycznej najczęściej mają wpływ czynniki zawierające się w obrębie maszyny:

- luźne lub uszkodzone łożysko,
- naciąg magnetyczny,
- niewyważenie,
- konstrukcja kadłuba.

ale i również czynniki zewnętrzne:

- sprzęgnięcie,
- posadowienie,
- asymetria zasilania lub obciążenia.

# 1.1.1. Łożyska

Duża część awarii i uszkodzeń maszyn elektrycznych jest spowodowana niewłaściwą pracą łożysk danej maszyny [2]. Do oceny stanu technicznego węzłów łożyskowych zwykle wykorzystuje się diagnostykę drganiową. Najczęściej spotykane metody diagnostyczne łożysk to:

• wytyczne PN oraz ISO. Normy zakładają pomiar wartości skutecznej prędkości drgań w paśmie częstotliwości od 10 do 1000 Hz i porównanie z kryteriami (Rys.1.1) [3], [4].



Rys. 1.1. Dopuszczalne wartości prędkości drgań w maszynach elektrycznych

 pomiar współczynnika szczytu C, wyznaczany dla sygnału drganiowego odfiltrowanego filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości granicznej 1 kHz. Współczynnik C może zostać obliczony zarówno dla prędkości jak i przyspieszenia drgań (1). Dopuszczalne wartości współczynnika szczytu przedstawiono w tabeli 1.1. Natomiast rysunek 1.2 przedstawia proces degradacji łożyska w oparciu o współczynnik szczytu [5],

$$C_{v} = \frac{v_{p}}{v} \quad \text{lub} \quad C_{a} = \frac{a_{p}}{a} \tag{1}$$

gdzie:

 $a_{\rm p}$ ,  $v_{\rm p}$  – wartość szczytowa przyspieszenia, prędkości drgań, a, v – wartość skuteczna przyspieszenia, prędkości drgań,  $C_a$ ,  $C_v$  – współczynnik szczytu przyspieszenia, prędkości drgań.

Tabela 1.1. Dopuszczalne wartości współczynnika szczytu



Rys. 1.2. Proces degradacji łożyska

- metoda SPA (Shock Profile Area). Sygnał drganiowy jest mierzony czujnikiem o częstotliwości rezonansowej 250 kHz. Następnie jest poddany wąskopasmowej filtracji oraz detekcji obwiedni. Końcowy etap to analiza impulsów. Do określenia stanu technicznego węzła łożyskowego wykorzystuje się:
  - pole powierzchni pod krzywą rozkładu prawdopodobieństwa wartości maksymalnych impulsów drgań,
  - o widmo obwiedni impulsów,
  - o maksymalny poziom impulsów udaru.

Z rozeznania literaturowego wynika, iż wartość SPA dla łożysk uszkodzonych jest minimum sześć razy większa niż dla łożyska nieuszkodzonego. Poziom wartości maksymalnej impulsów dla uszkodzonego łożyska jest co najmniej trzy razy większy niż dla łożyska dobrego [5],

 metoda SPM (Shock Pulse Method) [6]. Istotą metody jest analiza czoła oscylacji powstałych na częstotliwości rezonansowej czujnika drgań (ok. 32kHz). Wykrywana i analizowana jest fala udarowa wywołana poprzez zderzanie się dwóch mas. Fala jest generowana przez impulsy udarowe, które powstają na styku elementów tocznych i bieżni podczas pracy łożyska. Stosując metodę można obserwować trend zmian zachodzących w węźle łożyskowym począwszy od stanu nowego łożyska, poprzez różne etapy jego eksploatacji, aż do momentu kiedy konieczna jest jego wymiana (Rys.1.3) [5],



Rys. 1.3. Proces degradacji łożyska - SPM

- metoda energii impulsowej SE (Spike Energy). Bazuje na analizie impulsowego charakteru wibracji generowanych przez uszkodzony węzeł łożyskowy. Sygnał drganiowy wysokiej częstotliwości zostaje poddany filtracji pasmowej i analizie, która ma na celu wykrycie pojawiających się impulsów w jego widmie [5],
- metoda analizy częstotliwościowej [7]. W metodzie wykorzystano fakt, iż w widmie drgań każdego łożyska zakodowana jest informacja o jego geometrii, mechanice i funkcjonalności.



Rys. 1.4. Geometria łożyska tocznego

Istnieją zależności, które pozwalają wyznaczyć określone częstotliwości odpowiedzialne za dany defekt elementu łożyska (2) - (5) (Rys.1.4).

o element toczny,

$$f_0 = \frac{1}{2} f_r \frac{D}{d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right)$$
(2)

o bieżnia zewnętrzna,

$$f_{\text{zew}} = \frac{1}{2} z f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$$
(3)

9

o bieżnia wewnętrzna,

$$f_{\text{wew}} = \frac{1}{2} z f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right)$$
(4)

o koszyk.

$$f_{\rm kosz} = \frac{1}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \tag{5}$$

gdzie:

 $\beta$  – kąt pracy łożyska, d – średnica elementu tocznego, D – średnica podziałowa łożyska,  $f_0$  – częstotliwość związana z elementem tocznym,  $f_{kosz}$  – częstotliwość związana z koszykiem,  $f_r$  – częstotliwość wynikająca z prędkości obrotowej,  $f_{wew}$  – częstotliwość od bieżni wewnętrznej,  $f_{zew}$  – częstotliwość od bieżni zewnętrznej, z – liczba elementów tocznych [5], [8],

- metoda detekcji obwiedni [7]. Sygnał drganiowy z przetwornika poddawany jest filtracji pasmowo-przepustowej o częstotliwości zależnej od drgań własnych węzła łożyskowego danej maszyny. Następnie modulowany jest przez impulsy pochodzące od uszkodzonego łożyska, zostaje wyprostowany oraz wyznacza się jego obwiednię. Poddaje się ją analizie częstotliwościowej i wykorzystując zależności przytoczone w metodzie analizy częstotliwościowej określa się uszkodzenie łożyska [5],
- ocena trajektorii. Wyznaczanie trajektorii drgań dokonywane jest przy pomocy dwóch przetworników umieszczonych w osiach x oraz y. Amplituda drgań w płaszczyźnie xy zawsze przewyższa wartość każdej z osobna. Pomiar tylko w jednej płaszczyźnie nie odzwierciedla maksymalnej amplitudy drgań danej maszyny (Rys.1.5). Idealnym obrazem drgań w płaszczyźnie xy jest okrąg o niewielkiej średnicy [8],



Rys. 1.5. Trajektoria drgań

## 1.1.2. Naciąg magnetyczny



Rys. 1.6. Symetria szczeliny powietrznej

Naciąg magnetyczny w maszynie elektrycznej to w większości przypadków siła promieniowa, która jest wynikiem niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej [9]. Asymetria ta może być wynikiem:

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

Asymetryczna szczelina posiada największy oraz najczęstszy wpływ na niesymetryczny 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 [10]. Dodatkowo w takich maszynach może występować moment zaczepowy, który również powoduje niesymetrię pola magnetycznego [11], [12]. Występowanie dużych sił naciągu magnetycznego powoduje wzrost poziomu drgań w maszynie elektrycznej. Istnieją trzy rodzaje asymetrii szczeliny powietrznej (ekscentryczności) [13], [14]:

• statyczna – charakteryzuje się tym, że położenie maksymalnej szczeliny na obwodzie maszyny jest stałe i może wynikać z owalności rdzenia wirnika bądź stojana i sumowania się tolerancji technologicznych – rysunek 1.7,



Rys. 1.7. Ekscentryczność statyczna

 dynamiczna - położenie maksymalnej szczeliny zmienia się wraz z pozycją wirnika i może wynikać z zużycia węzłów łożyskowych, zgiętego wału, itp. Najczęściej jest więc spowodowana zużyciem się maszyny podczas jej eksploatacji – rysunek 1.8,



Rys. 1.8. Ekscentryczność dynamiczna

• mieszana – jest połączeniem obu powyższych – rysunek 1.9.



Rys. 1.9. Ekscentryczność mieszana

#### 1.1.3. Niewyważenie

Niewyważenie w maszynie występuje wtedy, gdy wirnik posiada taki rozkład mas, że podczas wirowania występuje zmienne obciążenie na węzłach łożyskowych [15]. Wał wirnika ma również tendencje do uginania się. Rozróżnia się niewyważenia [5]:

- statyczne,
- dynamiczne,
- momentowe.

Są dwa rodzaje przyczyn niewyważenia wirnika: początkowe oraz nabyte. Do niewyważenia początkowego zalicza się wady konstrukcyjne, materiałowe oraz wykonawcze. Natomiast do niewyważeń nabytych, które mają większy wpływ na stan techniczny maszyny zaliczamy [5]:

- niestaranny montaż,
- obluzowanie i zmiana położenia wirnika,
- korozja,
- gromadzenie się osadu na wirniku,
- odkształcenia pod wpływem temperatury,

• przytarcie wirnika.

Podczas diagnostyki drganiowej maszyny elektrycznej można zauważyć charakterystyczne objawy towarzyszące niewyważeniu wirnika:

- wzrost wartości RMS drgań od składowej towarzyszącej prędkości obrotowej,
- częstotliwość drgań opisujących niewyważenie pokrywa się z częstotliwością od prędkości obrotowej,
- amplituda drgań zmienia się wraz z prędkością obrotową,
- trajektoria posiada kształt okręgu lub elipsy,
- przy dużym niewyważeniu i małych oporach tarcia maszyna kołysze się przy zatrzymywaniu.

Aby zapobiec uszkodzeniu maszyny należy po stwierdzeniu powyższych objawów wirnik wyważyć. W literaturze można napotkać następujące metody wyważania:

- jednopłaszczyznowa,
- dwupłaszczyznowa amplitudowo fazowa,
- on line.

## 1.1.4. Konstrukcja kadłuba

Podstawową zasadą przy projektowaniu kadłubów jest zasada symetrii. W konstrukcji maszyny elektrycznej powinna występować symetria obrotowa, która charakteryzuje się tym, że co pewien stały kąt powtarzają się własności sprężyste i bezwładnościowe. Konstrukcje symetryczne posiadają zawsze lepsze parametry wibroakustyczne niż konstrukcje niesymetryczne. Związane jest to z przenikaniem energii do posadowienia oraz elementów przyległych. Brak symetrii w wykonaniu kadłuba może doprowadzić do braku kompensacji wibracji [16].

# 1.1.5. Sprzęgnięcie

Prawidłowe ustawienie zespołu maszynowego pozwala zapobiec przedwczesnemu uszkodzeniu maszyny, a w głównej mierze łożysk oraz sprzęgieł. Jest to jeden z najważniejszych warunków bezawaryjnej pracy napędu, jaki musi być spełniony. W innym wypadku następuje:

- wzrost poziomu drgań,
- przyspieszenie degradacji łożysk, wału, uszczelnień,
- nieprawidłowa praca sprzęgieł,
- asymetria szczeliny powietrznej w maszynie.

Aby sprzęgnięcie zespołu maszynowego było prawidłowe należy doprowadzić do tego, aby oś obrotu maszyny napędowej pokrywała się z osią obrotu urządzenia napędzanego – w większości przypadków odbywa się to według sprzęgieł. Korekcji ustawienia w płaszczyznach pionowej i poziomej dokonuje się na maszynie, która jest bardziej mobilna – najczęściej jest to maszyna napędowa, gdyż urządzenia stanowiące obciążenie w większości przypadków nie mają możliwości zmian swojego położenia.

### 1.1.6. Posadowienie

Istotny wpływ na bezawaryjną pracę napędów elektrycznych ma ich posadowienie. Najczęściej w warunkach przemysłowych stosuje się:

- fundament blokowy charakteryzuje go bardzo duża sztywność w porównaniu ze sztywnością podłoża, na którym jest ustawiony,
- fundament ramowy złożony z odkształcalnych belek i płyt, których sztywność jest porównywalna ze sztywnością podłoża,
- fundament stalowy spawane z blach i kształtowników, główną ich zaletą jest szybkość ich budowy.

Posadowienia mają określone widmo częstotliwości drgań własnych. Jeżeli częstotliwość fundamentu jest większa od największej częstotliwości wynikającej z ruchu posadowionego napędu to taki fundament nazywamy wysoko strojonym. Jeżeli natomiast częstotliwość fundamentu jest mniejsza od największej częstotliwości wynikającej z ruchu posadowionego napędu to taki fundament nazywamy nisko strojonym. Przy rozruchu maszyny, takie posadowienie osiąga stan rezonansowy przynajmniej raz.

Posadowienia blokowe oraz ramowe wykonuje się zarówno jako wysoko i nisko strojone. Natomiast fundamenty stalowe wykonuje sią zawsze jako nisko strojone. Jeżeli częstotliwość własna napędu jest parokrotnie wyższa od częstotliwości własnej posadowienia to drgania fundamentu są bardzo małe. Nawet przy rozruchu, podczas osiągnięcia częstotliwości rezonansowej, drgania fundamentu nie przekraczają dopuszczalnych wartości.

Przy wadliwym wykonaniu posadowienia może dojść do jego uszkodzenia poprzez pojawianie się mikropęknięć, które mogą powodować wystąpienie wibracji samego fundamentu, co z kolei negatywnie wpływa na sam napęd (stopniowa degradacja węzłów łożyskowych) [16].

# 1.1.7. Asymetria zasilania lub obciążenia

W przypadku asymetrii zasilania silników, jak również asymetrii obciążenia generatorów wirujące pole magnetyczne przybiera kształt eliptyczny zamiast kołowego. Pojawiają się 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.

# 1.2. Geneza wykorzystania maszyny jako czujnik drgań

Idea wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi jako czujnik drgań pojawiła się przypadkiem. Podczas niektórych pomiarów rezystancji uzwojeń takich maszyn występują nieprawidłowości, (Rys.1.10) które ujawniają się, jeżeli w otoczeniu badanej maszyny znajduje się źródło drgań. Podczas podobnych pomiarów innych rodzajów maszyn zjawisko to nie występuje. W maszynie z magnesami trwałymi, nie pracującej lecz usadowionej na podłożu które przenosi drgania pochodzące z innych źródeł, w uzwojeniach twornika indukuje się siła elektromotoryczna (SEM), która powoduje błędny pomiar rezystancji uzwojenia. Stanowi to poważny problem, np. podczas rejestracji krzywej stygnięcia uzwojeń po próbie nagrzewania [17].



Rys. 1.10. Błędny pomiar rezystancji uzwojenia

Analizując problem zaburzeń zwrócono uwagę na podobieństwo budowy maszyny z magnesami trwałymi (PM) do budowy czujnika elektrodynamicznego (Rys.1.11), służącego do pomiaru drgań [18]:

- w czujniku magnes jest zawieszony na sprężynie wewnątrz cewki. Pod wpływem wibracji magnes się przemieszcza i generuje w cewce sygnał napięcia proporcjonalny do prędkości drgań. Istnieją również konstrukcje gdzie cewka jest ruchoma, natomiast magnes jest przymocowany sztywno do obudowy. W maszynie PM natomiast magnesy umieszczone są w ułożyskowanym wirniku a uzwojenie pełni rolę cewki pomiarowej,
- czułość jest zależna od liczby zwojów w cewce,
- brak konieczności zasilania ze źródła zewnętrznego.



Rys. 1.11. Budowa czujnika elektrodynamicznego oraz maszyny PM

Na rysunkach 1.12 oraz 1.13 przedstawiono charakterystyki prędkości drgań w funkcji częstotliwości drgań – sygnał z czujnika drgań oraz napięć fazowych w funkcji częstotliwości drgań. Wymuszenie zrealizowano poprzez zasilanie stołu wibracyjnego ze źródła napięcia umożliwiającego zmianę częstotliwości. Przedstawione przebiegi są charakterystyką stołu wibracyjnego, na którym prowadzono badania wyznaczoną za pomocą fabrycznego czujnika drgań oraz przy pomocy maszyny z magnesami trwałymi pełniącej taką rolę.



Rys. 1.12. Charakterystyka prędkości drgań w funkcji częstotliwości



Rys. 1.13. Charakterystyki napięć fazowych w funkcji częstotliwości

Analizując charakterystyki można zaobserwować znaczne podobieństwo między sygnałami pochodzącymi z maszyny PM, a sygnałem pomiarowym z czujnika drgań, co świadczy o możliwości wykorzystania maszyny wzbudzanej magnesami trwałymi jako czujnik drgań.

### 1.3. Potrzeba wykorzystania maszyny jako czujnik drgań

Powszechnie stosowaną metodą pomiaru drgań w maszynach elektrycznych jest bezpośredni pomiar przyspieszenia bądź prędkości drgań czujnikami mechaniczno – elektrycznymi. Na przykład czujnik z piezoelektrycznym elementem pomiarowym służy do pomiaru przyspieszenia drgań, a czujnik magneto – elektryczny (magnes trwały i cewka indukcyjna) prędkości drgań. Pomiar drgań polega na przyłożeniu czujnika do punktu pomiarowego, np. do tarczy łożyskowej maszyny elektrycznej. Pomiaru drgań dokonuje 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. Przy drganiach przekraczających wartości dopuszczalne według norm i instrukcji eksploatacji zarejestrowany sygnał drganiowy należy rozłożyć na składowe w celu zidentyfikowania przyczyny powstałych drgań. Mierząc 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.

Napędy, w skład których wchodzą maszyny z magnesami trwałymi, są często zamontowane w trudno dostępnych miejscach dla diagnosty (elektrownie wiatrowe, małe elektrownie wodne, silniki pojazdów elektrycznych) i bezpośredni pomiar drgań czujnikami elektromechanicznymi jest często niemożliwy. Zachodzi, więc potrzeba użycia innego sposobu oceny drgań tych maszyn bez konieczności stosowania czujników elektromechanicznych.

# 1.4. Aktualny stan techniki

Autor przeanalizował liczne prace z zagadnienia diagnostyki maszyn elektrycznych i nie są mu znane publikacje opisujące diagnostykę drganiową bazującą na sygnałach własnych maszyny. Świadczy to o innowacyjności i niestandardowym podejściu do zagadnienia diagnostyki maszyn z magnesami trwałymi. Potwierdza to również sprawdzona czystość patentowa udzielonych autorowi patentów.

# 1.5. Cel pracy

Podstawowym celem pracy jest opracowanie metody diagnostyki drganiowej napędów z maszynami wzbudzanymi magnesami trwałymi. Założeniem metody jest wykorzystanie sygnałów własnych maszyny (natężenie prądu, napięcie) jako sygnał diagnostyczny oraz wyeliminowanie czujnika drgań i aparatury drganiowej w aplikacjach przemysłowych i laboratoryjnych.

# 1.6. Teza pracy

Tezą pracy jest wykazanie poprzez badania laboratoryjne i potwierdzenie symulacjami komputerowymi, że "badania diagnostyczne drgań napędów z maszynami elektrycznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych metodą sygnałów własnych, wykorzystują ich specyficzne właściwości pozwalające użyć maszynę jako czujnik drgań".

# 1.7. Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- 1. Rozpoznanie literaturowe zagadnienia.
- 2. Przedstawienie modelu matematycznego, modelu symulacyjnego oraz symulacje komputerowe:
  - symulacje komputerowe w reżimie pracy generatorowej analiza asymetrii obciążenia oraz analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej,
  - symulacje komputerowe w režimie pracy silnikowej analiza asymetrii zasilania oraz analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej.
- 3. Badania laboratoryjne sygnałów własnych maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi:
  - badania maszyny nienapędzanej oraz niezasilanej,
  - badania laboratoryjne w reżimie pracy generatorowej analiza asymetrii obciążenia, analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej oraz analiza niewyważenia,
  - badania laboratoryjne w režimie pracy silnikowej analiza asymetrii zasilania, analiza asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej oraz analiza niewyważenia.
- 4. Opracowanie równań analitycznych będących markerami poszczególnych anomalii w pracy maszyn elektrycznych ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych.

# 2. Metodologia

# 2.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były maszyny elektryczne z magnesami trwałymi o wielkości mechanicznej 132 (wznios osi wału h = 132 mm), które zostały wykonane w oparciu o różne kompilacje czterech stojanów oraz sześciu wirników:

# 2.1.1. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 36$

Wykonano dwa dwuuzwojeniowe stojany o liczbie żłobków  $Q_s = 36$ , jeden ze skosem, drugi bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 4 i 2p = 12 – rysunek 2.1.





# **2.1.2.** Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 30$



Wykonano stojan o liczbie żłobków  $Q_s = 48$ , ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, o liczbie biegunów 2p = 4 –rysunek 2.2.



Rys. 2.2. Stojan o liczbie żłobków  $Q_s = 48$ 



# 2.1.3. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 60$

Wykonano stojan o liczbie żłobków  $Q_s = 60$ , ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana o liczbie biegunów 2p = 4 - rysunek 2.3.





Rys. 2.3. Stojan o liczbie żłobków  $Q_s = 60$ 

## 2.1.4. Wirnik SPM bez skosu o liczbie biegunów 2p = 4

Wykonano wirnik SPM (z magnesami umieszczonymi na powierzchni), bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 4 - rysunek 2.4.



Rys. 2.4. Wirnik SPM bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 4

# 2.1.5. Wirnik SPM ze skosem o liczbie biegunów 2p = 4

Wykonano wirnik SPM (z magnesami umieszczonymi na powierzchni), ze skosem skokowym odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, o liczbie biegunów 2p = 4 – rysunek 2.5.



Rys. 2.5. Wirnik SPM ze skosem skokowym, o liczbie biegunów 2p = 4

### 2.1.6. Wirnik SPM bez skosu o liczbie biegunów 2p = 12

Wykonano wirnik SPM (z magnesami na powierzchni), bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 12 - rysunek 2.6.



Rys. 2.6. Wirnik SPM bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 12

# 2.1.7. Wirnik IPM

Wykonano dwa wirniki IPM (z magnesami umieszczonymi wewnątrz), jeden ze skosem odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, drugi bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 4 - rysunek 2.7.



Rys. 2.7. Blacha wirnika IPM o liczbie biegunów 2p = 4

### 2.1.8. Wirnik IPMV

Wykonano wirnik IPMV (z magnesami umieszczonymi wewnątrz w kształcie litery V), bez skosu, o liczbie biegunów 2p = 4 - rysunek 2.8.



Rys. 2.8. Blacha wirnika IPMV o liczbie biegunów 2p = 4

# 2.2. Obiekty badań

Parametry przebadanych generatorów oraz silników PM zamieszczono w tabeli 2.1 oraz tabeli 2.2.

Typ	Liczba żłobków	Liczba biegunów	Rodzaj wirnika	Skos w stojanie	Skos w wirniku	Moc, <i>P</i> (kW)	Napięcie, U (V)	Prąd, I (A)	Prędkość obrotowa, n (1/min)	Sprawność, η (%)
PMzsg132M-12	36	12	SPM	NIE	NIE	3,0	62.0	27.9	500	68.0
PMzsg132M-4	36	4	SPM	NIE	TAK	6,0	60.0	57.7	1500	85.0
PMwsg132M-4	36	4	IPM	NIE	TAK	5,0	47.0	61.4	1500	81.0
PMwsg132M-4	36	4	IPMV	NIE	NIE	5,5	50.0	63.5	1500	80.5
PMzsg132M-4	36	4	SPM	TAK	NIE	6,0	60.0	57.7	1500	85.0
PMzsg132M-12	36	12	SPM	TAK	NIE	3,0	62.0	27.9	500	80.5
PMwsg132M-4	36	4	IPM	TAK	NIE	5,0	47.0	61.4	1500	81.0
PMwsg132M-4	36	4	IPMV	TAK	NIE	5,5	50.0	63.5	1500	80.5
PMzsg132M-4	48	4	SPM	TAK	NIE	6,0	84.0	41.2	1500	91.0
PMzsg132M-4	48	4	SPM	TAK	TAK	6,5	76.0	54.3	1500	91.0
PMwsg132M-4	48	4	IPM	TAK	NIE	5,5	65.0	48.8	1500	89.0
PMwsg132M-4	48	4	IPMV	TAK	NIE	5,5	69.0	46.0	1500	89.0
PMzsg132M-4	60	4	SPM	TAK	NIE	5,5	103.0	30.8	1500	92.0
PMwsg132M-4	60	4	IPM	TAK	TAK	5,5	80.0	39.7	1500	89.0
PMwsg132M-4	60	4	IPM	TAK	NIE	5,5	80.0	39.7	1500	89.0
PMwsg132M-4	60	4	IPMV	TAK	NIE	5,5	84.0	37.8	1500	89.5

Tabela 2.1. Parametry generatorów z magnesami trwałymi

Tabela 2.2. Parametry silników z magnesami trwałymi

Typ	Liczba żłobków	Liczba biegunów	Rodzaj wirnika	Skos w stojanie	Skos w wirniku	Moc, <i>P</i> (kW)	Napięcie, U (V)	Prąd, <i>I</i> (A)	Prędkość obrotowa, n (1/min)	Sprawność, η (%)
SMzsg132M-12	36	12	SPM	NIE	NIE	3.0	67.0	47.9	500	70.0
SMzsg132M-4	36	4	SPM	NIE	TAK	6.5	65.0	72.1	1500	87.0
SMwsg132M-4	36	4	IPM	NIE	TAK	5.5	57.0	64.0	1500	87.0
SMwsg132M-4	36	4	IPMV	NIE	NIE	5.5	57.0	64.0	1500	87.0
SMzsg132M-4	36	4	SPM	TAK	NIE	6.5	65.0	72.1	1500	87.0
SMzsg132M-12	36	12	SPM	TAK	NIE	3.0	67.0	47.9	500	86.0
SMwsg132M-4	36	4	IPM	TAK	NIE	5.5	57.0	64.0	1500	87.0
SMwsg132M-4	36	4	IPMV	TAK	NIE	5.5	58.0	62.9	1500	87.0
SMzsg132M-4	48	4	SPM	TAK	NIE	6.5	82.0	55.9	1500	91.0
SMzsg132M-4	48	4	SPM	TAK	TAK	6.5	82.0	55.3	1500	91.0
SMwsg132M-4	48	4	IPM	TAK	NIE	6.5	74.0	57.7	1500	91.0
SMwsg132M-4	48	4	IPMV	TAK	NIE	6.5	76.0	54.3	1500	91.0
SMzsg132M-4	60	4	SPM	TAK	NIE	6.5	108.0	45.8	1500	91.0
SMwsg132M-4	60	4	IPM	TAK	TAK	6.5	90.0	45.8	1500	91.0
SMwsg132M-4	60	4	IPM	TAK	NIE	6.5	90.0	45.8	1500	91.0
SMwsg132M-4	60	4	IPMV	TAK	NIE	6.5	94.0	43.9	1500	91.5

# 2.3. Cel badań

Celem badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy istnieje możliwość wykorzystania maszyny z magnesami trwałymi także jako czujnik drgań do analizy problemów, z którymi można się spotkać w normalnej eksploatacji napędów elektrycznych:

- asymetria obciążenia generatora PM,
- asymetria zasilania silnika PM,
- asymetria szczeliny powietrznej w pracy generatorowej oraz silnikowej maszyny PM,
- niewyważenie generatora oraz silnika PM.

# 2.4. Aparatura

Do badań została wykorzystana następująca aparatura:

- komputer PC z przeznaczeniem do pomiarów,
- karta pomiarowa DaqBoard 2000,
- przetworniki napięciowe LEM CV3 1000,
- przetworniki prądowe LEM IT150 S,
- moduł do pomiaru drgań SV06,
- czujnik drgań DYTRAN 3143M1,
- przetwornik momentu HBM T20WN 200 (N·m),
- rezystor nastawny,
- maszyna pomocnicza prądu stałego GGB 200.2K o mocy P = 15.5 (kW).

# 3. Model matematyczny i symulacje komputerowe

## 3.1. Ogólny model matematyczny

Literaturowe modele maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi, dla ustalonego stanu pracy standardowo przedstawiane są w osiach współrzędnych prostokątnych "d, q". Forma ta umożliwia posługiwanie się stałymi wartościami reaktancji  $X_d$  i  $X_q$  [19], [20]. Metoda ta jednak nie ma interpretacji w formie elektrycznego schematu zastępczego. W modelu maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, prezentowanym w rozprawie, nie korzysta się z transformacji. W modelu uwzględnia się reaktancje, które są funkcją kąta położenia wirnika  $\Theta$  [21], [22], [23], [24].

Założenia dla modelu matematycznego:

- uzwojenie twornika jest m fazowe (m = 3) symetryczne, połączone w gwiazdę,
- rozpatruje się stan pracy ustalonej bądź quasi-ustalonej,
- pomija się wpływ siły magnetomotorycznej twornika na zmianę stanu nasycenia obwodu magnetycznego, to znaczy reaktancje nie są funkcjami prądu twornika.

Ogólny model matematyczny maszyny (6) – (10), przy powyższych założeniach bazuje na elektrycznym schemacie zastępczym przedstawionym na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat zastępczy maszyny PM

$$u_{\rm U}(t) = R_{\rm s}i_{\rm U}(t) + L_{\rm U}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm U}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm UV}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm V}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm UW}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm W}(t)}{{\rm d}t} + e_{\rm U1}(t) + e_{\rm U2}(t)$$
(6)

$$u_{\rm V}(t) = R_{\rm s}i_{\rm V}(t) + L_{\rm V}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm V}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm UV}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm U}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm VW}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm W}(t)}{{\rm d}t} + e_{\rm V1}(t) + e_{\rm V2}(t)$$
(7)

$$u_{\rm W}(t) = R_{\rm s}i_{\rm W}(t) + L_{\rm W}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm W}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm UW}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm U}(t)}{{\rm d}t} + L_{\rm VW}(\theta(t))\frac{{\rm d}i_{\rm V}(t)}{{\rm d}t} + e_{\rm W1}(t) + e_{\rm W2}(t)$$
(8)

$$T(t) = \frac{\left(e_{\rm U1}(t) + e_{\rm U2}(t)\right)i_{\rm U}(t) + \left(e_{\rm V1}(t) + e_{\rm V2}(t)\right)i_{\rm V}(t) + \left(e_{\rm W1}(t) + e_{\rm W2}(t)\right)i_{\rm W}(t)}{\omega(t)} \tag{9}$$

$$w(t) = \frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

23

gdzie:

 $e_{\rm U1}$ ,  $e_{\rm V1}$ ,  $e_{\rm W1}$  – siła elektromotoryczna indukowana w danej fazie;  $e_{\rm U2}$ ,  $e_{\rm V2}$ ,  $e_{\rm W2}$  – siła elektromotoryczna zaburzenia;  $i_{\rm U}$ ,  $i_{\rm V}$ ,  $i_{\rm W}$  – prądy w poszczególnych fazach maszyny;  $u_{\rm U}$ ,  $u_{\rm V}$ ,  $u_{\rm W}$  – napięcia na zaciskach maszyny;  $L_{\rm U}$ ,  $L_{\rm V}$ ,  $L_{\rm W}$  – indukcyjności własne poszczególnych pasm;  $L_{\rm UV}$ ,  $L_{\rm VW}$ ,  $L_{\rm UW}$  – indukcyjności wzajemne;  $R_{\rm s}$  – rezystancja fazy;  $\omega$  – prędkość kątowa;  $\Theta$  – kąt położenia wirnika; t – czas; T – moment elektromagnetyczny.

Przedstawione w kolejnych rozdziałach wyniki badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych symulacji komputerowych pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi poszczególnych częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla określonych stanów niepożądanych w maszynach z magnesami trwałymi. Pozwoliło to na uzupełnienie modelu matematycznego (11) – (24):

• asymetria obciążenia generatora PM lub zasilania silnika PM,

$$f_{k} = (2k-1)\frac{n \cdot p}{20}$$
(11)

$$e_{\rm Ub}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k + \varphi_k))$$
(12)

$$e_{\rm Vb}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k + \varphi_k - \frac{2\pi}{3}))$$
(13)

$$e_{\rm Wb}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k + \varphi_k + \frac{2\pi}{3}))$$
(14)

• asymetria rozkładu szczeliny powietrznej (ekscentryczność).

$$f_{k1} = \mathbf{k} \cdot f - \frac{(p-1)f}{p} \tag{15}$$

$$f_{k2} = 2\mathbf{k} \cdot f \tag{16}$$

$$e_{\rm Ub}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_{k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{k1} + \varphi_{k1})) + \sum_{k=1}^{\infty} (E_{k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{k2} + \varphi_{k2}))$$
(17)

$$e_{\rm Vb}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_{k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{k1} + \varphi_{k1} - \frac{2\pi}{3})) + \sum_{k=1}^{\infty} (E_{k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{k2} + \varphi_{k2} - \frac{2\pi}{3}))$$
(18)

$$e_{\rm wb}(t) = \sum_{\rm k=1}^{\infty} (E_{\rm k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\rm k1} + \varphi_{\rm k1} + \frac{2\pi}{3})) + \sum_{\rm k=1}^{\infty} (E_{\rm k2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\rm k2} + \varphi_{\rm k2} + \frac{2\pi}{3}))$$
(19)

• niewyważenie,

$$f_1 = \frac{(p-1)f_{\rm H01}}{p}$$
(20)

$$f_2 = \frac{(p+1)f_{\rm H01}}{p}$$
(21)

$$e_{\rm Ub}(t) = E_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 + \varphi_1) + E_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 + \varphi_2)$$
(22)

24

$$e_{\rm Vb}(t) = E_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 + \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}) + E_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 + \varphi_2 - \frac{2\pi}{3})$$
(23)

$$e_{\rm Wb}(t) = E_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 + \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) + E_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 + \varphi_2 + \frac{2\pi}{3})$$
(24)

gdzie:

 $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_{k1}$ ,  $E_{k2}$  – amplituda siły elektromotorycznej;  $f_1$ ,  $f_2$ – szukane częstotliwości;  $f_{k1}$ ,  $f_{k2}$ – szukane częstotliwości dla k-tej składowej;  $f_k$ – szukane k-te częstotliwości;  $f_{H01}$  – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanej maszyny; p – liczba par biegunów; k – liczba naturalna; n – prędkość obrotowa;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_{k1}$ ,  $\varphi_{k2}$  – kąt przesunięcia sygnału sinusoidalnego.

Porównując przedstawiony model matematyczny (6) – (10) maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych do czujnika elektrodynamicznego drgań przyjęto założenia:

- rozpatrywanie w jednej osi (jedna faza),
- indukcyjność uzwojenia nie zmienia się w funkcji czasu,
- maszyna nie jest ani napędzana, ani zasilana.

Równanie przybiera postać (25):

$$u(t) = e(t) = -N \frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}(t)}{\mathrm{d}t}$$
(25)

Natomiast w czujniku elektrodynamicznym (26):

$$u_{\rm AB}(t) = e_{\rm AB}(t) = -N \frac{\mathrm{d}\Phi_{\rm m}(t)}{\mathrm{d}t}$$
(26)

Można zaobserwować zbieżność równań, która potwierdza podobieństwo maszyny z magnesami trwałymi do elektrodynamicznego sensora drgań. Problemem pozostaje fakt wyodrębnienia siły elektromotorycznej wygenerowanej poprzez zwiększenie poziomu drgań z pełnego modelu matematycznego maszyny będącej w ruchu. Zdaniem autora jest to tylko możliwe poprzez analizę częstotliwościową.

#### **3.2.** Symulacje komputerowe

W ramach realizacji tematu wykonano symulacje komputerowe w programie Ansys Maxwell na kilkunastu modelach polowo – obwodowych (przykład na rysunku 3.2) wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES). Zastosowane oprogramowanie służy do analizy dwu- i trójwymiarowych pól elektromagnetycznych o niskiej częstotliwości. Znajduje zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień stałego, jak również zmiennego pola magnetycznego – wywołanego przez m.in. zmienny w czasie prąd elektryczny płynący w uzwojeniu lub przez ruch magnesów trwałych. Obliczenia mogą być wykonywane dla materiałów liniowych i nieliniowych. Na proces tworzenia i analizowania modelu maszyny składają się następujące kroki:

- utworzenie geometrii modelu,
- zdefiniowanie warunków brzegowych,
- określenie właściwości materiałowych poszczególnych elementów modelu,
- zdefiniowanie wzbudzenia układu przydzielenie i pogrupowanie poszczególnych uzwojeń oraz określenie wymuszenia napięcia/prądu w uzwojeniach,
- sprecyzowanie ustawień siatki elementów skończonych,
- określenie parametrów symulacji (krok i czas symulacji) a także zdefiniowanie ruchu wirnika względem stojana,
- symulacja modelu,
- analiza wyników wyznaczenie przebiegów czasowych m.in. napięć, prądów, momentu mechanicznego, strumienia magnetycznego oraz rozkłady pól magnetycznych (indukcji magnetycznej, natężenia pola magnetycznego, itp.).



Rys. 3.2. Przykład modelu polowo – obwodowego wraz z powiększeniem siatki dyskretyzacyjnej

# 4. Badania laboratoryjne na stole wibracyjnym

# 4.1. Stół wibracyjny

Badania przeprowadzono na stole wibracyjnym przedstawionym na rysunku 4.1. W wykorzystanym urządzeniu zastosowano wymuszenie mechaniczne. Posiada ono wymiary: 1 m x 2 m. Wibrator posiada możliwość zmiany masy niewyważonej, co przekłada się na zmianę amplitudy drgań. Zasilanie stołu umożliwia zmianę częstotliwości wibracji.



Rys. 4.1. Stół wibracyjny

## 4.2. Obiekt badań

Do badań na stole wibracyjnym wykorzystano generator z magnesami trwałymi typu: PMzsg132M–12 ze stojanem  $Q_s = 36$  bez skosu i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny:  $P_N = 3.0$  kW,  $U_N = 62$  V,  $I_N = 27.9$  A,  $n_N = 500$  1/min,  $\eta_N = 68\%$ .

# 4.3. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne wykonano w celu sprawdzenia, czy maszyna PM może być odpowiednikiem czujnika drgań, czy analizę sygnałów własnych można porównać z analizą sygnałów z sensora wibracji. Badania przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Układ pomiarowy do badań maszyny PM na stole wibracyjnym

# 4.3.1. Sygnały własne maszyny PM a sygnał z czujnika drgań przy wymuszeniu impulsowym

Na rysunkach 4.3 – 4.5 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prędkości drgań w trzech osiach mierzonej czujnikiem fabrycznym, napięć międzyfazowych i napięć fazowych testowanej maszyny, zarejestrowanych podczas badań. Maszyna podczas testów nie była zasilana, ani napędzana, zaciski były otwarte. Wymuszenie drgań miało charakter impulsowy.



Rys. 4.5. Przebiegi czasowe napięć fazowych  $(a - u_U, b - u_V, c - u_W)$ 

Analizując przedstawione przebiegi można zaobserwować, że przy wymuszeniu impulsowym indukują się sygnały napięć międzyfazowych oraz fazowych, które mogą zostać wykorzystane do diagnostyki drganiowej.

Natomiast na rysunkach 4.6 - 4.9 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prędkości drgań w trzech osiach, napięć międzyfazowych, napięć fazowych, prądów, zarejestrowanych przy wymuszeniu impulsowym drgań. Maszyna podczas testów nie była zasilana, ani napędzana, natomiast zaciski były zwarte poprzez rezystancję o wartości, która przy prędkości znamionowej spowodowałaby przepływ prądu znamionowego.



Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych  $(a - u_U, b - u_V, c - u_W)$ 



Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów ( $a - i_U$ ,  $b - i_V$ ,  $c - i_W$ )

Na powyższych przebiegach czasowych zauważyć można, podobnie jak przy pracy z otwartymi zaciskami, że przy wymuszeniu impulsowym w stanie "obciążenia" również obserwuje się mierzalne sygnały napięć międzyfazowych, fazowych oraz prądów.

# 4.3.2. Sygnały własne maszyny PM a sygnał z czujnika drgań przy wymuszeniu jednostajnym

Na rysunkach 4.10 - 4.12 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prędkości drgań w trzech osiach, napięć międzyfazowych, napięć fazowych oraz widm częstotliwościowych tych sygnałów, zarejestrowanych podczas badań na stole wibracyjnym. Maszyna podczas testów nie była zasilana, ani napędzana, zaciski były otwarte. Wymuszenie drgań było stałe o częstotliwości f = 50 Hz.



Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe





80 90 100

60 70

Czas, t (ms)

10

20 30 40 50

0

Rozpatrując przebiegi można zaobserwować, iż przy pracy maszyny z otwartymi zaciskami przy wymuszeniu jednostajnym na stole wibracyjnym zaobserwować można mierzalne sygnały napięć międzyfazowych oraz fazowych, a ich podstawowe harmoniczne są takie same jak pierwsze harmoniczne sygnałów drganiowych pochodzących z czujnika drgań. Istnieje zatem możliwość wykorzystania maszyny PM do analizy drganiowej.

110 120

0 10 20

30 40 50

60 70 80

Czestotliwość, f(Hz)

90 100 110 120 130 140 150 160

Na rysunkach 4.13 – 4.16 natomiast przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prędkości drgań w trzech osiach, napięć międzyfazowych, napięć fazowych, prądów oraz

widm częstotliwościowych tych sygnałów, zarejestrowanych podczas badań na stole wibracyjnym. Maszyna podczas testów nie była zasilana, ani napędzana, zaciski były zwarte poprzez rezystancję o wartości, która przy prędkości znamionowej spowodowałaby przepływ prądu znamionowego. Wymuszenie drgań było ustalone o częstotliwości drgań f = 50 Hz.



Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe



Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe



Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe



Rys. 4.16. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe

Przebiegi czasowe na powyższych ilustracjach również ukazują, że przy pracy maszyny w stanie "obciążenia" na stole wibracyjnym przy wymuszeniu jednostajnym, wyodrębnić można mierzalne sygnały napięć międzyfazowych, fazowych oraz prądów, a ich podstawowe harmoniczne są takie same jak pierwsze harmoniczne sygnałów drganiowych pochodzących z czujników drgań. Podobnie jak przy pracy przy otwartych zaciskach.

### 4.3.3. Badania na stole wibracyjnym przy napędzaniu maszyny

W tym podrozdziale przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prędkości drgań, napięć międzyfazowych, napięć fazowych oraz widm częstotliwościowych tych sygnałów, zarejestrowanych podczas badań na stole wibracyjnym. Maszyna o liczbie biegunów 2p = 12, podczas testów była napędzana, zaciski były otwarte. Wymuszeniami były drgania ustalone o częstotliwości f = 40 Hz, prędkość obrotowa n = 600 obr/min (Rys.4.17 – 4.22).



Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu f = 40 Hz



Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań f = 40 Hz



Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań f = 40 Hz



Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu f = 40 Hz

 Składowa napięcia
 Maszyna wyważona
 Wzrost

 %
 %

< 1.0

1.8

 $U_{\rm UV\,20}\,({\rm mV})$ 

 $U_{\rm UV\,100}\,({\rm mV})$ 



> 1000

783

11.0

15.9

Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu f = 40 Hz



Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu f = 40 Hz

Tabela 4.2. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %		
$U_{\rm U20}({\rm mV})$	< 1.0	11.0	> 1000		
$U_{\rm U100}({\rm mV})$	< 1.0	16.0	> 1500		

Analiza rysunków: 4.17–4.22 oraz wartości zebranych w tabelach: 4.1 i 4.2 ukazuje, że przy napędzaniu maszyny przy wymuszeniu ustalonym o częstotliwości drgań f = 40 Hz, podczas badań na stole wibracyjnym wokół podstawowej harmonicznej  $f_{H01}=60$  Hz pojawiają się częstotliwości f = 20 Hz oraz f = 100 Hz (oddalone o 40 Hz od podstawowej harmonicznej w jedną i drugą stronę – częstotliwość od prędkości obrotowej wibratora po obu stronach podstawowej harmonicznej testowanego generatora).

### 4.4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania przy użyciu stołu wibracyjnego ukazały możliwość użycia maszyny elektrycznej ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych do celów diagnostyki drganiowej. Użycie wymuszeń: impulsowego oraz ustalonego dowiodło, że zarówno w stanie dynamicznym, jak i ustalonym w maszynie PM indukuje się SEM, która może być użyta do diagnostyki wibracyjnej. Badania napędzanej maszyny pokazały, że do wyselekcjonowania sygnału pomiarowego należy użyć analizy częstotliwościowej, gdyż sygnał diagnostyczny jest dużo mniejszy niż sygnał " roboczy" testowanego napędu.
# 5. Asymetria obciążenia generatora z magnesami trwałymi

Analiza wpływu niesymetrycznego obciążenia na pracę generatora synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych jest to pierwszy przykład zastosowania dla przedstawianej metody. Wykorzystano wyniki badań oraz symulacji komputerowych maszyny typu: PMwsg132M – 4 ze stojanem  $Q_s = 36$  bez skosu i wirnikiem IPMV posiadającym magnesy umieszczone wewnątrz w kształcie litery V. Parametry maszyny:  $P_N = 5.5$  kW,  $U_N = 50$  V,  $I_N = 63.5$  A,  $n_N = 1500$  1/min,  $\eta_N = 80.5\%$ . Symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych. Badania wykonano dla asymetrii:  $I_U = 0.4$  A,  $I_V = 66.4$  A,  $I_W = 66.3$  A. Wszystkie przebiegi czasowe przedstawiono dla jednego pełnego obrotu badanej maszyny.

# 5.1. Symulacje komputerowe

Do symulacji wykorzystano model polowo – obwodowy generatora z magnesami trwałymi typu: PMwsg132M – 4 (Rys.5.1). Jest to model generatora, na którym przeprowadzono badania laboratoryjne.



Rys. 5.1. Widok modelu polowo - obwodowego poddanego symulacjom komputerowym

### 5.1.1. Wpływ asymetrii obciążenia generatora PM na poziom wibracji

Na rysunku 5.2 umieszczono czasowe przebiegi momentu przy symetrycznym i niesymetrycznym obciążeniu generatora wzbudzanego magnesami trwałymi. Porównanie wartości momentu, otrzymanych z symulacji umieszczono w tabeli 5.1.



Rys. 5.2. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia - wynik symulacji

		Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost/Spadek (%)
T <sub>max</sub> (N	·m)	43.63	46.09	6
$T_{\min}$ (N·	m)	32.91	-2.91	-109
$T_{\rm pp}$ (N·r	n)	10.72	49.00	357
$T(\mathbf{N} \cdot \mathbf{m})$	)	38.04	20.59	-46

Tabela 5.1. Porównanie wartości momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia

Analizując powyższe przebiegi oraz wartości zebrane w tabeli 5.1 zauważyć można, iż asymetria obciążenia generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu o 357 %. Symulacje przeprowadzono w taki sposób, aby nie przekraczać prądu znamionowego generatora dla każdej z faz, dlatego przy asymetrycznym obciążeniu średni moment ma mniejszą wartość.

### 5.1.2. Prąd generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.3 przedstawiono przebiegi czasowe prądów dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 5.4.



Rys. 5.3. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 5.4. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 5.2 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 697 628 %.

Składowa prądu	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
$I_{150}(mA)$	1.8	12 559.1	697 628
$I_{450}(mA)$	0.8	201.4	25 075
$I_{750}(mA)$	1.8	92.6	5 044
$I_{1050}$ (mA)	1.5	3.5	133

Tabela 5.2. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych

### 5.1.3. Napięcie międzyfazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.5 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 5.6.



Rys. 5.5. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 5.6. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 5.3 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 2 972 233 %.

Składowa napięcia	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
$U_{\rm UV \ 150} ({\rm mV})$	0.3	8917.0	2 972 233
U <sub>UV 450</sub> (mV)	0.4	143.0	35 650
U <sub>UV 750</sub> (mV)	1.2	65.8	5 383
$U_{\rm UV \ 1050}({\rm mV})$	1.8	24.5	1 261

Tabela 5.3. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych dla poszczególnych składowych

### 5.1.4. Napięcie fazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.7 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 5.8.



Rys. 5.7. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 5.4 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 565 %.

Składowa napięcia	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
$U_{\rm U\ 150}({\rm mV})$	1506.6	10017.9	565
$U_{\rm U\ 1050}({\rm mV})$	143.7	235.2	64

Tabela 5.4. Wartości skuteczne napięć fazowych dla poszczególnych składowych

# 5.2. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 5.9. Generator wzbudzany magnesami trwałymi był napędzany za pomocą maszyny prądu stałego. Na wale umieszczono przetwornik momentu, obciążenie generatora zostało zrealizowane za pomocą trójfazowego regulowanego rezystora. Wszystkie pomiary oraz rejestracje zostały wykonane przy użyciu karty pomiarowej współpracującej z przetwornikami oraz komputerem pomiarowym.



Rys. 5.9. Układ pomiarowy do badań generatora PM z asymetrią obciążenia

# 5.2.1. Wpływ asymetrii obciążenia generatora na przebieg momentu i drgań

Na rysunkach 5.10 – 5.12 przedstawiono przebiegi momentu oraz prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym obciążeniu generatora wzbudzanego magnesami trwałymi. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań umieszczono w tabeli 5.5.



Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 5.12. Przebieg prędkości drgań przy asymetrycznym obciążeniu generatora

	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost/Spadek (%)
$T_{\rm max}$ (N·m)	35.13	19.79	-44
$T_{\min}$ (N·m)	33.16	13.51	-59
$T_{\rm pp}$ (N·m)	1.97	6.28	218
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	34.32	16.64	-51
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.54	1.67	209
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.63	4.01	146

Tabela 5.5. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia

Analiza rysunków 5.10 – 5.12 oraz wartości zebranych w tabeli 5.5 pokazuje, że asymetria obciążenia generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych powoduje zwiększenie pulsacji momentu (218 %), co powoduje wzrost wibracji maszyny (209 %).

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

#### 5.2.2. Prąd generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.13 przedstawiono przebiegi czasowe prądów dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 5.14.



W tabeli 5.6 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 2 615 %.

Składowa prądu	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
$I_{150}$ (mA)	235.0	6379.3	2 615
$I_{450}$ (mA)	23.2	126.0	443
$I_{750}$ (mA)	7.8	45.2	479
$I_{1050}$ (mA)	7.9	27.8	252

Tabela 5.6. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych

# 5.2.3. Napięcie międzyfazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.15 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych. dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 5.16.





Rys. 5.15. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia

Rys. 5.16. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 5.7 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 1 641 %.

Składowa napięcia	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
$U_{\rm UV \ 150}({\rm mV})$	281.6	4903.1	1641
$U_{\rm UV~450}({\rm mV})$	76.5	1059.3	1285
U <sub>UV 750</sub> (mV)	38.1	1081.4	2738
U <sub>UV 1050</sub> (mV)	23.0	154.7	573

Tabela 5.7. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych dla poszczególnych składowych

### 5.2.4. Napięcie fazowe generatora PM przy asymetrii obciążenia

Na rysunku 5.17 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego obciążenia generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 5.18.



Rys. 5.17. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia



Rys. 5.18. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia

W tabeli 5.8 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 197 %.

Składowa napięcia	Symetria obciążenia	Asymetria obciążenia	Wzrost %
U <sub>U 150</sub> (mV)	1652.7	4903.1	197
U <sub>U 450</sub> (mV)	662.5	1059.3	60
U <sub>U 750</sub> (mV)	755.3	1081.4	43
$U_{\rm U\ 1050}({\rm mV})$	117.4	188.8	61

Tabela 5.8. Wartości skuteczne napięć fazowych dla poszczególnych składowych

#### 5.3. Podsumowanie

W tym rozdziale pokazano pierwszy rozpatrywany przez autora przypadek aplikacyjnego wykorzystania metody będącej przedmiotem rozprawy. Przedstawione rezultaty badań symulacyjnych i laboratoryjnych pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniem matematycznym (11) zestawu częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska drgań. Równanie to posłużyło do obliczeń analitycznych zamieszczonych w dalszej części tego rozdziału. Sposób diagnostyki bazujący na przedstawionym markerze został opatentowany przez autora [25], [26].

$$f_{\rm k} = (2\mathrm{k} - 1)\frac{n \cdot p}{20} \tag{11}$$

gdzie:

 $f_k$ - szukane k-te częstotliwości, p – liczba par biegunów, k – liczba naturalna, n – prędkość obrotowa.

W tabeli 5.9 zestawiono porównanie wyników symulacji z wynikami badań laboratoryjnych oraz obliczeń na podstawie opracowanego markeru.

Częstotliwość,	Badania	Symulacje	Obliczenia
f(Hz)	laboratoryjne	komputerowe	analityczne
50	50.16	50.11	50.16
150	150.07	150.11	150.48
450	449.80	450.11	451.44
750	749.53	750.11	752.40
1050	1049.26	1050.11	1053.36

Tabela 5.9. Składowe charakterystyczne dla niesymetrycznego obciążenia generatora PM

Wyniki podane w tabeli mają bardzo zbliżone wartości częstotliwości charakterystycznych. Zarówno badania laboratoryjne, jak również symulacje komputerowe mają poparcie w wynikach otrzymanych przy pomocy przedstawionego wcześniej równania matematycznego, co potwierdza, iż można przy jego pomocy selekcjonować tzw. markery dla asymetrii obciążenia generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi.

Na rysunku 5.19 przedstawiono wpływ stopnia wprowadzonej w jednej z faz asymetrii prądu na poszczególne składowe. Wyniki podano w tabeli 5.10 wraz z odpowiadającym asymetrii poziomem prędkości drgań.



Rys. 5.19. Wpływ stopnia asymetrii na widmo częstotliwościowe prądu

Tabela 5.10. Wpływ stopnia asymetrii na widmo częstotliwościowe prądu

1 7	1 7		1 0	
	I <sub>N</sub>	0,75 x <i>I</i> <sub>N</sub>	0,5 x <i>I</i> <sub>N</sub>	0 x <i>I</i> <sub>N</sub>
$I_{150}(mA)$	235.0	1590.1	3541.2	6379.3
$I_{450}$ (mA)	23.2	55.1	110.3	126.0
$I_{750}$ (mA)	7.8	24.2	32.8	45.2
$I_{1050}$ (mA)	7.9	13.0	22.4	27.8
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.54	1.08	1.23	1.67

Można zaobserwować, iż wraz ze wzrostem asymetrii obciążenia następuje wzrost amplitud charakterystycznych składowych prądu oraz poziomu prędkości drgań. Świadczy to o możliwości wykorzystania maszyny PM do detekcji drgań w oparciu o wcześniejsze wyskalowanie danego generatora w miejscu jego eksploatacji.

# 6. Silnik PM przy asymetrycznym zasilaniu.

Analizę wpływu niesymetrycznego zasilania na pracę 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 i wirnikiem 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.

# 6.1. Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 6.1. Wszystkie przebiegi czasowe przedstawiono dla jednego pełnego obrotu badanej maszyny. Asymetria zasilania została zrealizowana poprzez rezystancję dodatkową w jednej fazie między silnikiem, a źródłem zasilania.



Rys. 6.1. Układ pomiarowy do badań silnika PM z asymetrią zasilania

#### 6.1.1. Asymetria zasilania a poziom drgań silnika PM na biegu jałowym

Na rysunkach 6.2 oraz 6.3 umieszczono przebiegi prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym zasilaniu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym. Porównanie wartości prędkości drgań umieszczono w tabeli 6.1.



Rys. 6.2. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznym zasilaniu silnika



Rys. 6.3. Przebieg prędkości drgań przy asymetrycznym zasilaniu silnika

Tabela 6.1. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii zasilania

	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost
			%
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.47	0.93	98
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.07	1.59	45

Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz wartości zebrane w tabeli 6.1 pokazują, że asymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego na biegu jałowym powoduje zwiększenie poziomu wibracji maszyny – wartość skuteczna prędkości drgań wzrosła o 98%.

#### 6.1.1.1. Prąd biegu jałowego silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.4 przedstawiono przebiegi czasowe prądów biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 6.5.



Rys. 6.4. Przebieg prądu biegu jałowego przy symetrii i asymetrii zasilania



W tabeli 6.2 zestawiono wartości skuteczne składowych prądu biegu jałowego, dla których przy asymetrii zasilania silnika PM zaobserwowano wzrost wartości. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 64 %.

Tabela 6.2. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Składowa	Symetria	Asymetria	Wzrost
prądu	zasilania	zasilania	%
$I_{0\ 150}({ m mA})$	271.2	445.8	64

Na podstawie wyników w tabeli 6.2 można zauważyć, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje znaczący wzrost wartości 3-ej harmonicznej prądu.

# 6.1.1.2. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.6 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych silnika PM pracującego na biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 6.7.



Rys. 6.6. Przebieg napięcia międzyfazowego na biegu jałowym przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.7. Widmo napięcia międzyfazowego na biegu jałowym przy asymetrii zasilania

W tabeli 6.3 zamieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego biegu jałowego silnika PM, dla których przy asymetrii zasilania zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost %	
$U_{\rm UV0\ 150}({\rm mV})$	172.6	272.6	58	
U <sub>UV0 450</sub> (mV)	< 10.0	17.1	> 71	

Tabela 6.3. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 6.3 zaobserwować można, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM pracującego na biegu jałowym obserwuje się wzrost wartości niektórych składowych napięć międzyfazowych, podobnie jak w przypadku prądu.

#### 6.1.1.3. Napięcie fazowe biegu jałowego silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.8 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych silnika PM pracującego na biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 6.9.



Rys. 6.8. Przebieg napięcia fazowego na biegu jałowym przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.9. Widmo napięcia fazowego na biegu jałowym przy symetrii i asymetrii zasilania

W tabeli 6.4 zestawiono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego biegu jałowego silnika PM, dla których przy asymetrii zasilania zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost %	
$U_{\rm U0\ 150}({\rm mV})$	269.4	361.6	34	
$U_{\rm U0\ 450}({\rm mV})$	117.4	121.1	3	
U <sub>U0 750</sub> (mV)	160.9	164.2	2	
U <sub>U0 1050</sub> (mV)	68.4	74.2	8	

Tabela 6.4. Wartości skuteczne napięć fazowych dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 6.4 można zauważyć, że przy asymetrii zasilania silnika PM pracującego na biegu jałowym następuje wzrost wartości składowych napięć fazowych.

# 6.1.2. Asymetria zasilania a przebieg momentu i drgań silnika PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 6.10 – 6.12 umieszczono przebiegi czasowe momentu oraz prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym zasilaniu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań umieszczono w tabeli 6.5.



Rys. 6.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.11. Przebieg prędkość drgań przy symetrycznym zasilaniu silnika



Rys. 6.12. Przebieg prędkość drgań przy niesymetrycznym zasilaniu silnika

	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost/Spadek (%)
$T_{\rm max}$ (N·m)	31.53	20.46	-35
$T_{\min}$ (N·m)	27.76	12.50	-55
$T_{\rm pp}$ (N·m)	3.77	7.96	111
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	29.65	16.33	-45
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	1.04	1.71	64
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	2.14	3.13	46

Tabela 6.5. Moment i prędkość drgań przy symetrii i asymetrii zasilania

Analiza wartości zestawionych w tabeli 6.5 pokazuje, że niesymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu (111 %) i powoduje to wzrost wibracji maszyny (64 %).

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

# 6.1.2.1. Prąd obciążenia silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.13 przedstawiono przebiegi czasowe prądów dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 6.14.



Rys. 6.13. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.14. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii zasilania

W tabeli 6.6 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa prądu	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost %
$I_{150}(mA)$	206.0	992.0	382
$I_{450}(mA)$	13.0	47.0	262
I <sub>750</sub> (mA)	10.0	22.0	120

Tabela 6.6. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 6.6 stwierdzić można, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje wzrost wartości niektórych składowych prądu. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 382 %.

#### 6.1.2.2. Napięcie międzyfazowe silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.15 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych silnika PM w stanie obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 6.16.



Rys. 6.15. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.16. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii zasilania

W tabeli 6.7 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa	wa Symetria Asymetria		Wzrost	
napięcia	pięcia zasilania zasilania		%	
$U_{\rm UV \ 150} ({\rm mV})$	90.3	892.7	889	
U <sub>UV 450</sub> (mV)	10.5	39.6	277	
U <sub>UV 750</sub> (mV)	12.7	43.6	243	
U <sub>UV 1050</sub> (mV)	< 10.0	11.0	>10	

Tabela 6.7. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych

Wyniki z tabeli 6.7 ukazują wzrost wartości składowych napięć międzyfazowych przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM pracującym w stanie obciążenia. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 889 %.

#### 6.1.2.3. Napięcie fazowe silnika PM przy asymetrii zasilania

Na rysunku 6.17 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych silnika PM pracującego w stanie obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 6.18.



Rys. 6.17. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii zasilania



Rys. 6.18. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii zasilania

W tabeli 6.8 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego, dla których przy asymetrii obciążenia generatora PM zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria zasilania	Asymetria zasilania	Wzrost %
U <sub>U 150</sub> (mV)	131.1	504.2	285
U <sub>U 450</sub> (mV)	139.8	317.9	127
U <sub>U 750</sub> (mV)	184.8	289.9	57
$U_{\rm U\ 1050}({\rm mV})$	35.5	54.0	52

Tabela 6.8. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 6.8 można zauważyć, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości składowych napięć fazowych. Dla 3 harmonicznej zaobserwowano zwiększenie wartości o 285 %.

### 6.2. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniem matematycznym (11) poszczególnych składowych, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska. Uzyskane wyniki – tak jak się autor spodziewał stanowią analogię do asymetrii obciążenia w generatorach z magnesami trwałym [25].

$$f_{k} = (2k-1)\frac{n \cdot p}{20}$$
(11)

gdzie:

 $f_k$ - szukane k-te częstotliwości, p – liczba par biegunów, k – liczba naturalna, n – prędkość obrotowa.

Częstotliwość, f(Hz)	Badania laboratoryjne	Obliczenia analityczne
50	50.12	50.12
150	149.97	150.36
450	453.31	451.08
750	749.04	751.80
1050	1052.58	1052.52

Tabela 6.9. Niesymetryczne zasilanie silnika PM pracującego na biegu jałowym

Tabela 6.10. Niesymetryczne zasilanie silnika PM pracującego w stanie obciążenia

Częstotliwość,	Badania	Obliczenia
f(Hz)	laboratoryjne	analityczne
50	50.11	50.11
150	149.92	150.33
450	449.36	450.99
750	748.80	751.65
1050	1048.23	1052.31

Zarówno przy pracy silnika na biegu jałowym, jak również w stanie obciążenia można zauważyć dużą zbieżność z wynikami otrzymanymi przy pomocy opracowanego wcześniej równania matematycznego (Tabela 6.9, Tabela 6.10), co potwierdza, iż można przy jego pomocy selekcjonować tzw. markery dla asymetrii zasilania silników wzbudzanych magnesami trwałymi.

# 7. Asymetria szczeliny powietrznej

Analizę wpływu asymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej na pracę generatora synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych przedstawiono wykorzystując wyniki badań oraz symulacji komputerowych maszyny typu: PMzsg132M–4 ze stojanem 48 żłobkowym i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny:  $P_{\rm N} = 6.0$  kW,  $U_{\rm N} = 84$  V,  $I_{\rm N} = 41.2$  A,  $n_{\rm N} = 1500$  1/min,  $\eta_{\rm N} = 91.0\%$ . Maszyna została zaprojektowana ze szczeliną powietrzną  $\delta = 1.5$  mm – celem ułatwienia modelowania asymetrii rozkładu pola.

Aby uzyskać asymetrię szczeliny powietrznej zastosowano specjalne tarcze łożyskowe (Rys.7.1), które umożliwiają uzyskiwanie przesunięć między stojanem, a wirnikiem w osiach x, y oraz z. Konstrukcja tarczy została opatentowana [27], [28]. Tarcze umożliwiają zmiany geometrii w kierunkach x, y o  $\pm 2$ mm, natomiast w kierunku z o  $\pm 10$  mm od stanu symetrii.

Symulacje komputerowe oraz 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  $\delta_{\min} = 0.5 \text{ mm}, \delta_{\max} = 2.5 \text{ mm}.$ 



Rys. 7.1. Generator ze zmodyfikowanymi tarczami łożyskowymi

## 7.1. Symulacje komputerowe generatora PM

Do symulacji wykorzystano model polowo – obwodowy generatora z magnesami trwałymi typu: PMzsg132M–4 (Rys. 7.2). Jest to model generatora, na którym przeprowadzono badania laboratoryjne.



Rys. 7.2. Widok modelu polowo - obwodowego poddanego symulacjom komputerowym

# 7.1.1. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM

Na rysunkach 7.3 oraz 7.5 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej generatora z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.4 oraz 7.6.

W tabelach 7.1 oraz 7.2 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego generatora PM, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.3. Przebieg napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy ekscentryczności statycznej



Rys. 7.4. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy ekscentryczności statycznej

Tabela 7.1.	Wartości skuteczne	koleinvch	składowych	napiecia	miedzyfazov	vego przy	biegu ia	ałowym
1 40014 /.1.	Wartober bitateeLife	noie in jen	Sitiado it y on	maprovia	myal, milor	, ego piz,	orega je	10 11 111
						~	~ ~	

Składowa	Symetria szczeliny	zeliny Ekscentryczność	
napięcia	powietrznej	statyczna	%
$U_{\rm UV0~75}({\rm mV})$	< 0.1	0.6	>500
$U_{\rm UV0\ 125}({\rm mV})$	< 0.1	0.3	>200
$U_{\rm UV0\ 150}({\rm mV})$	0.5	11.6	2 220
U <sub>UV0 450</sub> (mV)	1.2	1.8	50



Rys. 7.5. Przebieg napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy ekscentryczności dynamicznej



Rys. 7.6. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy ekscentryczności dynamicznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm UV0_{25}}(\rm mV)$	< 0.1	10.7	> 10 600
$U_{\rm UV0_{75}}(\rm mV)$	< 0.1	156.9	> 156 800
$U_{\rm UV0\ 100}({\rm mV})$	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm UV0_{125}}({\rm mV})$	< 0.1	1.2	> 1 100
$U_{\rm UV0_{150}}({\rm mV})$	0.5	22.1	4 320
$U_{\rm UV0_{175}}({\rm mV})$	< 0.1	1.6	> 1 500
U <sub>UV0 225</sub> (mV)	< 0.1	9.1	> 9 000
$U_{\rm UV0_{275}}({\rm mV})$	< 0.1	11.1	> 11 000
$U_{\rm UV0_{300}}({\rm mV})$	< 0.1	1.1	> 1 000
$U_{\rm UV0_{325}}(\rm mV)$	< 0.1	8.5	> 8 400
$U_{\rm UV0~375}({\rm mV})$	< 0.1	11.3	> 11 200
$U_{\rm UV0\ 400}({\rm mV})$	< 0.1	1.5	> 1 400
$U_{\rm UV0_{425}}(\rm mV)$	< 0.1	0.7	> 600
$U_{\rm UV0\_450}(\rm mV)$	1.2	1.8	50
$U_{\rm UV0~500}({\rm mV})$	< 0.1	1.9	> 1 800

Tabela 7.2. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia międzyfazowego przy biegu jałowym

Na podstawie wyników w tabeli 7.2 można zauważyć, przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej generatora PM pracującego na biegu jałowym w napięciu międzyfazowym następuje wzrost wartości większości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz (ekscentryczność dynamiczna). W przypadku ekscentryczności statycznej również odnotowano wzrost wartości, lecz tylko w kilku częstotliwościach stanowiących krotność 25 Hz.

# 7.1.2. Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM

Na rysunkach 7.7 oraz 7.9 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.8 oraz 7.10.

W tabelach 7.3 oraz 7.4 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego generatora PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.7. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy ekscentryczności statycznej



Rys. 7.8. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy ekscentryczności statycznej

Tabela 7.3. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia fazowego przy biegu jałowym

Składowe napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost %
U <sub>U0 75</sub> (mV)	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0\ 150}({\rm mV})$	0.1	10.1	> 10 000



Rys. 7.9. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy ekscentryczności dynamicznej



Rys. 7.10. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy ekscentryczności dynamicznej

Składowa napiecia	Symetria szczeliny powietrznei	Ekscentryczność dynamiczna	Wzrost
$U_{10,25}$ (mV)	< 0.1	5.6	> 5 500
$U_{\rm U0~75}(\rm mV)$	< 0.1	89.9	> 89 800
U <sub>U0 100</sub> (mV)	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm U0_{125}}(\rm mV)$	< 0.1	0.9	> 800
U <sub>U0 150</sub> (mV)	0.1	10.1	10 000
U <sub>U0 175</sub> (mV)	< 0.1	0.9	> 800
U <sub>U0 200</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U0_{225}}(\rm mV)$	< 0.1	5.3	> 5 200
U <sub>U0 275</sub> (mV)	< 0.1	6.0	> 5 900
U <sub>U0 300</sub> (mV)	< 0.1	0.5	> 400
U <sub>U0 325</sub> (mV)	< 0.1	4.4	> 4 300
U <sub>U0 375</sub> (mV)	< 0.1	6.3	> 6 200
U <sub>U0 400</sub> (mV)	< 0.1	0.4	> 300
U <sub>U0 425</sub> (mV)	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm U0\ 475}({\rm mV})$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0500}({\rm mV})$	< 0.1	0.7	> 600

Tabela 7.4. Wartości skuteczne kolejnych składowych	napięcia	fazowego przy	biegu jałowyn
---	----------	---------------	---------------

Wyniki z tabeli 7.4 ukazują w napięciu fazowym wzrost wartości większości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz (ekscentryczność dynamiczna). W przypadku ekscentryczności statycznej również odnotowano wzrost wartości, lecz tylko

w kilku częstotliwościach stanowiących krotność 25 Hz (75 Hz oraz 150 Hz) – podobnie jak w przypadku napięcia międzyfazowego.

## 7.1.3. Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na przebieg momentu

Na rysunkach 7.11 – 7.13 umieszczono czasowe przebiegi momentu przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu w tabelach 7.5 oraz 7.6.



Rys. 7.11. Przebieg momentu przy symetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej



Rys. 7.12. Przebieg momentu przy ekscentryczności statycznej

Tabela 7.5. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej

	Symetria	Ekscentryczność statyczna	Wzrost/Spadek (%)
$T_{\rm max}$ (N·m)	44.83	44.92	0.2
$T_{\min}$ (N·m)	35.72	35.34	-1.1
$T_{\rm pp}$ (N·m)	9.11	9.58	5.2
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	42.33	40.13	5.2



Rys. 7.13. Przebieg momentu przy ekscentryczności dynamicznej

Tabela 7.6. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej

		Symetria	Ekscentryczność dynamiczna	Wzrost/Spadek (%)
1	$T_{\max}$ (N·m)	44.83	46.66	4.1
1	$T_{\min}$ (N·m)	35.72	33.71	-5.6
1	T <sub>pp</sub> (N·m)	9.11	12.95	42.2
1	T (N·m)	42.33	40.19	-5.1

Rozpatrując powyższe przebiegi czasowe oraz wartości zebrane w tabelach można zaobserwować, że asymetria szczeliny powietrznej generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu – przy ekscentryczności statycznej 5,2 %, a przy dynamicznej 42,2 %.

### 7.1.4. Prąd obciążenia generatora PM przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunkach 7.14 oraz 7.16 przedstawiono przebiegi czasowe 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 7.15 oraz 7.17.

W tabelach 7.7 oraz 7.8 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu generatora PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.14. Przebieg prądu obciążenia przy symetrii i ekscentryczności statycznej



Rys. 7.15. Widmo prądu obciążenia przy symetrii i ekscentryczności statycznej



Tabela 7.7. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Rys. 7.16. Przebieg prądu obciążenia przy symetrii i ekscentryczności dynamicznej



Rys. 7.17. Widmo prądu obciążenia przy symetrii oraz ekscentryczności dynamicznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
$I_{25}(\mathrm{mA})$	< 0.1	4.8	> 4 700
<i>I</i> <sub>75</sub> (mA)	< 0.1	76.2	> 76 100
$I_{100}({ m mA})$	< 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>I</i> <sub>225</sub> (mA)	< 0.1	4.4	> 4 300
$I_{275}(mA)$	< 0.1	5.1	> 5 000
$I_{300}({ m mA})$	< 0.1	0.4	> 300
$I_{325}(mA)$	< 0.1	3.7	> 3 600
$I_{375}(mA)$	< 0.1	5.3	> 5 200
$I_{400}({ m mA})$	< 0.1	0.3	> 200
$I_{425}(mA)$	< 0.1	0.5	> 400
<i>I</i> <sub>475</sub> (mA)	< 0.1	0.2	> 100
$I_{500}$ (mA)	< 0.1	0.6	> 500

Tabela 7.8. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.8 zauważyć można, że przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości niektórych składowych prądu. W przypadku ekscentryczności dynamicznej następuje wzrost wartości większości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz. W przypadku ekscentryczności statycznej również odnotowano wzrost wartości, lecz tylko w kilku częstotliwościach stanowiących krotność 25 Hz (75 Hz oraz 150 Hz).

# 7.1.5. Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 7.18 oraz 7.20 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.19 oraz 7.21.

W tabelach 7.9 oraz 7.10 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego generatora PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano znaczący wzrost wartości.



Rys. 7.18. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i ekscentryczności statycznej



Rys. 7.19. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii oraz ekscentryczności statycznej

Tabela 7.9. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrycznej szczeliny powietrznej maszyny PM

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost %
<i>U</i> <sub>UV 75</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm UV150}({\rm mV})$	0.9	20.0	212
U <sub>UV 450</sub> (mV)	1.0	25.0	2 400



Rys. 7.20. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i ekscentryczności dynamicznej



Rys. 7.21. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii oraz ekscentryczności dynamicznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm UV25}({\rm mV})$	< 0.1	9.4	> 9 300
<i>U</i> <sub>UV 75</sub> (mV)	< 0.1	157.2	> 157 100
$U_{\rm UV100}({ m mV})$	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm UV125}({\rm mV})$	< 0.1	1.8	> 1 700
$U_{\rm UV150}({\rm mV})$	0.9	20.0	212
U <sub>UV 175</sub> (mV)	< 0.1	2.1	> 2 000
$U_{\rm UV200}({ m mV})$	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm UV225}({\rm mV})$	< 0.1	9.3	> 9 200
$U_{\rm UV275}({\rm mV})$	< 0.1	11.8	> 11 700
$U_{\rm UV300}({ m mV})$	< 0.1	0.8	> 700
$U_{\rm UV325}({\rm mV})$	< 0.1	7.5	> 7 400
$U_{\rm UV375}({\rm mV})$	< 0.1	11.0	> 10 900
U <sub>UV 400</sub> (mV)	< 0.1	2.0	> 1 900
$U_{\rm UV425}({\rm mV})$	< 0.1	0.9	> 800
$U_{\rm UV475}({ m mV})$	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm UV500}({ m mV})$	< 0.1	1.5	> 1 400

Tabela 7.10. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrycznej szczeliny powietrznej maszyny PM

Wyniki w tabeli 7.10 pokazują, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w napięciu międzyfazowym generatora pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości większości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz (ekscentryczność dynamiczna). W przypadku ekscentryczności statycznej również odnotowano wzrost wartości, lecz tylko w kilku częstotliwościach stanowiących krotność 25 Hz.

# 7.1.6. Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 7.22 oraz 7.24 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.23 oraz 7.25.

W tabelach 7.11 oraz 7.12 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego generatora PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.22. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i ekscentryczności statycznej



Rys. 7.23. Widmo napięcia fazowego przy symetrii oraz ekscentryczności statycznej

Tabela 7.11. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej - wyniki symulacji

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost %
<i>U</i> <sub>U 75</sub> (mV)	< 0.1	0.2	> 100
U <sub>U 150</sub> (mV)	0.5	10.1	1 920
U <sub>U 500</sub> (mV)	0.3	1.1	267



Rys. 7.24. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i ekscentryczności dynamicznej



Rys. 7.25. Widmo napięcia fazowego przy symetrii oraz ekscentryczności dynamicznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm U25}({\rm mV})$	< 0.1	4.9	> 4 800
$U_{\rm U75}({\rm mV})$	< 0.1	90.2	> 90 100
$U_{\rm U100}({ m mV})$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U125}({\rm mV})$	< 0.1	1.0	> 900
$U_{\rm U150}({\rm mV})$	0.5	10.1	1 920
<i>U</i> <sub>U 175</sub> (mV)	< 0.1	1.3	> 1 200
$U_{\rm U200}({ m mV})$	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U225}({ m mV})$	< 0.1	5.3	> 5 200
$U_{\rm U275}({\rm mV})$	< 0.1	6.4	> 6 300
$U_{\rm U300}({ m mV})$	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U325}({\rm mV})$	< 0.1	3.6	> 3 500
$U_{\rm U375}({\rm mV})$	< 0.1	6.2	> 6 100
<i>U</i> <sub>U 400</sub> (mV)	< 0.1	0.9	> 800
$U_{\rm U425}({\rm mV})$	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm U475}({\rm mV})$	< 0.1	0.3	> 200
$\overline{U_{\rm U500}({ m mV})}$	< 0.1	0.5	> 400

Tabela 7.12. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji

Na podstawie wyników w tabeli 7.12 zauważyć można, że przy asymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze w stanie obciążenia następuje zwiększenie wartości składowych napięcia fazowego – podobnie jak w przypadku prądu oraz napięcia międzyfazowego.

### 7.2. Badania laboratoryjne generatora PM

Badania laboratoryjne przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 7.26.



Rys. 7.26. Układ pomiarowy do badań generatora PM z asymetrią szczeliny powietrznej

# 7.2.1. Asymetria szczeliny powietrznej generatora PM na biegu jałowym a drgania

Na rysunkach 7.27 oraz 7.28 umieszczono czasowe przebiegi prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym na biegu jałowym. Porównanie wartości prędkości drgań umieszczono w tabeli 7.13.



Rys. 7.27. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznej szczelinie powietrznej



Rys. 7.28. Przebieg prędkości drgań przy asymetrycznej szczelinie powietrznej

	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	1.26	2.84	125
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	2.17	6.72	210

Tabela 7.13. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej

Analizując rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 7.13 można zauważyć, że asymetria szczeliny powietrznej generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego na biegu jałowym przekłada się na zwiększenie wibracji maszyny.

# 7.2.2. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunku 7.29 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.30 oraz 7.31.



Rys. 7.29. Przebieg napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.30. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.31. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Tabela 7.14. V	Wartości skuteczr	ne napięcia	ı międzyfazow	ego biegu	jałowego	poszczególnych	składowych
		1 1		<u> </u>	<i>v v</i>		-

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm UV0_{25}}(\rm mV)$	12.1	22.3	84
$U_{\rm UV0-75}({\rm mV})$	32.6	74.3	128
$U_{\rm UV0-100}({\rm mV})$	1.9	4.6	142
$U_{\rm UV0_{225}}(\rm mV)$	3.1	11.0	255
$U_{\rm UV0_{275}}(\rm mV)$	3.9	7.3	87
$U_{\rm UV0_{325}}(\rm mV)$	1.7	6.6	288
$U_{\rm UV0-375}({\rm mV})$	3.0	5.9	97
$U_{\rm UV0-475}(\rm mV)$	< 1.0	1.2	> 11

Wyniki w tabeli 7.14 pokazują, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w napięciu międzyfazowym generatora pracującego na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz.

#### 7.2.3. Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunku 7.32 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.33 oraz 7.34.



Rys. 7.32. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej







Rys. 7.34. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej
W tabeli 7.15 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego generatora PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm U0\ 25}(\rm mV)$	12.3	17.5	42
U <sub>U0 75</sub> (mV)	36.1	58.7	63
U <sub>U0 125</sub> (mV)	< 1.0	7.6	> 7 500
$U_{\rm U0225}(\rm mV)$	3.9	9.3	138
UU0 275 (mV)	4.3	6.2	44
$U_{\rm U0325}({\rm mV})$	2.0	6.7	235
U <sub>U0 375</sub> (mV)	4.1	5.4	32
$U_{\rm U0\ 475}({\rm mV})$	2.2	2.6	18

Tabela 7.15. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.15 można zauważyć, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w napięciu międzyfazowym generatora pracującego na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz.

### 7.2.4. Asymetria szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia a poziom wibracji

Na rysunkach 7.35 – 7.37 umieszczono czasowe przebiegi momentu oraz prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań umieszczono w tabeli 7.16.



Rys. 7.35. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.36. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznej szczelinie powietrznej



Rys. 7.37. Przebieg prędkości drgań przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej

	Symetria szczeliny powietrznej Ekscentryczność		Wzrost %
$T_{\rm max}$ (N·m)	48.45	48.89	0.9
$T_{\min}$ (N·m)	46.93	46.99	0.1
$T_{\rm pp}$ (N·m)	1.52	1.90	25.0
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	47.59	47.77	0.4
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.9	0.99	10
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	2.01	2.44	21

Tabela 7.16. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań

Analizując rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 7.16 można zauważyć, że asymetria szczeliny powietrznej generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu elektromagnetycznego (25 %), co powoduje wzrost poziomu wibracji maszyny (10%).

#### 7.2.5. Prąd obciążenia generatora PM przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunku 7.38 przedstawiono przebiegi czasowe 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 7.39 oraz 7.40.



Rys. 7.38. Przebieg prądu obciążenia przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej





Rys. 7.40. Widmo prądu obciążenia przy asymetrii szczeliny powietrznej

Tabela 7.17. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Składowa prądu	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
<i>I</i> <sub>75</sub> (mA)	< 1.0	6.0	> 590
$I_{125}(mA)$	< 1.0	6.8	> 580
$I_{200}(mA)$	4.0	7.0	75
<i>I</i> <sub>225</sub> (mA)	< 1.0	8.0	> 700
$I_{300}(mA)$	< 1.0	24.0	> 2 300
<i>I</i> <sub>375</sub> (mA)	< 1.0	7.0	> 600

Na podstawie wyników w tabeli 7.17 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej generatora PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz.

### 7.2.6. Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia

Na rysunku 7.41 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.42 oraz 7.43.



Rys. 7.41. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.42. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.43. Widmo napięcia międzyfazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %		
$U_{\rm UV25}({\rm mV})$	< 1.0	3.0	> 290		
$U_{\rm UV75}({\rm mV})$	16.0	19.0	19		
$U_{\rm UV100}({\rm mV})$	6.0	11.0	83		
$U_{\rm UV225}({\rm mV})$	< 1.0	3.0	> 290		

Tabela 7.18. Składowe napięcia międzyfazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej

Na podstawie wyników w tabeli 7.18 można zauważyć, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz.

## 7.2.7. Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia

Na rysunku 7.44 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w generatorze z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.45 oraz 7.46.



Rys. 7.44. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.45. Widmo napięcia fazowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.46. Widmo napięcia fazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm U75}({\rm mV})$	4.0	9.0	125
$U_{\rm U100}({ m mV})$	8.0	10.0	25
$U_{\rm U125}({\rm mV})$	< 1.0	7.0	> 600
<i>U</i> <sub>U 175</sub> (mV)	< 1.0	21.0	> 2 000
$U_{\rm U425}({\rm mV})$	< 1.0	3.4	> 240

Tabela 7.19. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej

Na podstawie wyników w tabeli 7.19 można zauważyć, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w generatorze pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości, które stanowią krotność 25 Hz.

#### 7.3. Symulacje komputerowe silnika PM

Analizę wpływu niesymetrii szczeliny powietrznej na pracę silnika PM przedstawiono wykorzystując wyniki badań oraz symulacji komputerowych maszyny typu: SMzsg132M–4 ze stojanem 48 żłobkowym i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny:  $P_{\rm N} = 6.5$  kW,  $U_{\rm N} = 82$  V,  $I_{\rm N} = 55.9$  A,  $n_{\rm N} = 1500$  1/min,  $\eta_{\rm N} = 91.0\%$ . Maszyna została zaprojektowana ze szczeliną powietrzną  $\delta = 1.5$  mm – celem ułatwienia modelowania asymetrii rozkładu pola. Symulacje oraz badania wykonano dla asymetrii  $\delta_{\rm min} = 0.5$  mm,  $\delta_{\rm max} = 2.5$  mm.

Do symulacji wykorzystano model polowo – obwodowy maszyny z magnesami trwałymi typu: SMzsg132M–4 (Rys. 7.697.47). Jest to model silnika, na którym przeprowadzono badania laboratoryjne.



Rys. 7.47. Widok modelu polowo - obwodowego poddanego symulacjom komputerowym

### 7.3.1. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM

Na rysunkach 7.48 oraz 7.50 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.49 oraz 7.51. W tabelach 7.20 oraz 7.21 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego silnika PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano zwiększenie wartości.



Rys. 7.48. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.49. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Wzrost %	
$U_{\rm UV0_{75}}(\rm mV)$	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm UV0_{-100}}({\rm mV})$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm UV0_{125}}(\rm mV)$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm UV0_{150}}({\rm mV})$	< 0.1	20.1	> 20 000
$U_{\rm UV0_{275}}(\rm mV)$	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm UV0_{300}}({\rm mV})$	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm UV0_{325}}(\rm mV)$	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm UV0_{375}}(\rm mV)$	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm UV0_{425}}(\rm mV)$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm UV0_{450}}(\rm mV)$	< 0.1	3.2	> 3 100
$U_{\rm UV0_{475}}$ (mV)	< 0.1	0.7	> 600
$U_{\rm UV0_{500}}({\rm mV})$	< 0.1	0.8	> 700

Tabela 7.20. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych



Rys. 7.50. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.51. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm UV0~25}({\rm mV})$	< 0.1	10.0	> 9 900
$U_{\rm UV0~75}({\rm mV})$	< 0.1	164.0	> 163 900
U <sub>UV0 100</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm UV0\ 125}({\rm mV})$	< 0.1	1.7	> 1 600
$U_{\rm UV0\ 150}({\rm mV})$	< 0.1	20.1	> 20 000
$U_{\rm UV0\ 175}({\rm mV})$	< 0.1	1.0	> 900
U <sub>UV0 200</sub> (mV)	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm UV0225}({\rm mV})$	< 0.1	14.2	> 14 100
U <sub>UV0 275</sub> (mV)	< 0.1	20.9	> 20 800
U <sub>UV0 300</sub> (mV)	< 0.1	1.1	> 1 000
U <sub>UV0 325</sub> (mV)	< 0.1	15.2	> 15 100
U <sub>UV0 375</sub> (mV)	< 0.1	20.2	> 20 100
<i>U</i> <sub>UV0 400</sub> (mV)	< 0.1	1.0	> 900
U <sub>UV0 425</sub> (mV)	< 0.1	1.3	> 1 200
$U_{\rm UV0\ 450}({\rm mV})$	< 0.1	3.2	> 3 100
$U_{\rm UV0\ 475}({\rm mV})$	< 0.1	0.5	> 400
$\overline{U_{\rm UV0\_500}(\rm mV)}$	< 0.1	0.7	> 600

Tabela 7.21. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych

Na podstawie wyników zebranych w tabelach: 7.20 oraz 7.21 można zauważyć, że przy asymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku pracującym na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia międzyfazowego, które stanowią krotność 25 Hz.

### 7.3.2. Napięcia fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM

Na rysunkach 7.52 oraz 7.54 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.53 oraz 7.55. W tabelach 7.22 oraz 7.23 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego silnika PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.52. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.53. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa napiecia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost %
$\frac{U_{\rm U0.75}(\rm mV)}{U_{\rm U0.75}(\rm mV)}$	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0\ 150}({\rm mV})$	<0.1	10.1	> 10 000
U <sub>U0 275</sub> (mV)	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0_{-}300}({\rm mV})$	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0_{325}}(\rm mV)$	<0.1	0.3	> 200
<i>U</i> <sub>U0_375</sub> (mV)	<0.1	0.2	> 100
<i>U</i> <sub>U0 400</sub> (mV)	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0_{425}}(\rm mV)$	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0_{450}}(\rm mV)$	<0.1	30.2	> 30 100
$U_{\rm U0_{475}}(\rm mV)$	<0.1	0.4	> 300
U <sub>U0 500</sub> (mV)	<0.1	0.5	> 400

Tabela 7.22. Wartości skuteczne napiecia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych



Rys. 7.54. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.55. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm U0_{25}}({\rm mV})$	<0.1	6.2	> 6 100
$U_{\rm U0_{75}}({\rm mV})$	<0.1	94.9	> 94 800
$U_{\rm U0_{125}}(\rm mV)$	<0.1	1.1	> 1 000
$U_{\rm U0_{150}}({\rm mV})$	<0.1	10.1	> 10 000
$U_{\rm U0_{175}}(\rm mV)$	<0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U0_{200}}({\rm mV})$	<0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U0_{225}}(\rm mV)$	<0.1	8.0	> 7 900
<i>U</i> <sub>U0_275</sub> (mV)	<0.1	12.5	> 12 400
$U_{\rm U0_{300}}({\rm mV})$	<0.1	0.4	> 300
U <sub>U0 325</sub> (mV)	<0.1	8.7	> 8 600
<i>U</i> <sub>U0_375</sub> (mV)	<0.1	12.0	> 11 900
$U_{\rm U0_{400}}(\rm mV)$	<0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U0_{425}}(\rm mV)$	<0.1	0.5	> 400
U <sub>U0 450</sub> (mV)	<0.1	15.5	> 15 400
$U_{\rm U0_{475}}(\rm mV)$	<0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U0_{500}}({\rm mV})$	<0.1	0.3	> 200

Tabela 7	.23.	Wartości	skuteczne	napiecia	fazowego	biegu	iałowego	dla	poszczególny	ch składowy	vch
									· · · - · - · / · · · · /		/

Analizując wyniki z tabelach 7.22 oraz 7.23 zaobserwować można, że przy asymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia fazowego, które stanowią krotność 25 Hz.

# 7.3.3. Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom momentu w silniku PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 7.56 – 7.58 umieszczono czasowe przebiegi momentu przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w silniku wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu umieszczono w tabelach 7.24 oraz 7.25.



Rys. 7.56. Przebieg momentu przy symetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej



Rys. 7.57. Przebieg momentu przy ekscentryczności statycznej

	7 0 4	D / ·					· ·			•	1	• ,	•
Labela	124	Porownanie	wartosci	momentu	nrzv	svme	frvcznei	oraz as	vmetrvczn	e1 sz(	zelinie	nowiefr	znei
racera	/ · · · · · ·	1 of o maine	martoser	momenta	P12J	5,110	er y ezneg	oraz ab	<i>y</i> meer <i>y</i> ezn	. CJ 52.	220111110	pomen	Litej

	Symetria Szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost/Spadek %
$T_{\rm max}$ (N·m)	29.00	29.11	0.4
$T_{\min}$ (N·m)	19.46	19.31	-0.8
$T_{\rm pp}$ (N·m)	9.54	9.80	2.7
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	24.23	24.21	-0.1



Tabela 7.25. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej

	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność dynamiczna	Wzrost/Spadek %
$T_{\rm max}$ (N·m)	29.00	30.74	6.0
$T_{\min}$ (N·m)	19.46	17.11	-12.1
$T_{\rm pp}$ (N·m)	9.54	13.63	42.9
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	24.23	23.93	-1.2

Analizując powyższe rysunki oraz wartości zebrane w tabelach można zauważyć, że asymetria szczeliny powietrznej silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu elektromagnetycznego (przy ekscentryczności statycznej 2,7 %, a przy dynamicznej 42,9 %.).

#### 7.3.4. Prąd obciążenia silnika PM przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunkach 7.59 oraz 7.61 przedstawiono przebiegi czasowe prądu obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 7.60 oraz 7.62. W tabeli 7.26 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.59. Przebieg prądu obciążenia przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.60. Widmo prądu obciążenia przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.61. Przebieg prądu obciążenia przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.62. Widmo prądu obciążenia przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
prądu	powietrznej	dynamiczna	%
$I_{25}(mA)$	< 0.1	53.7	> 53 600
<i>I</i> <sub>75</sub> (mA)	< 0.1	523.5	> 523 400
$I_{100}(mA)$	< 0.1	1.3	> 1 200
$I_{125}(mA)$	< 0.1	46.1	> 46 000
$I_{175}(mA)$	< 0.1	51.9	> 51 800
$I_{200}(mA)$	< 0.1	0.6	> 500
<i>I</i> <sub>225</sub> (mA)	< 0.1	16.9	> 16 800
$I_{275}(mA)$	< 0.1	16.5	> 16 400
$I_{300}(mA)$	< 0.1	0.7	> 600
I <sub>325</sub> (mA)	< 0.1	8.1	> 8 000
I <sub>375</sub> (mA)	< 0.1	7.9	> 7 800
$I_{400}(mA)$	< 0.1	0.8	> 700
$I_{425}(mA)$	< 0.1	22.6	> 22 500
<i>I</i> <sub>475</sub> (mA)	< 0.1	30.1	> 30 000
<i>I</i> <sub>500</sub> (mA)	< 0.1	0.8	> 700

Tabela 7.26. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.26 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej silnika PM (ekscentryczność dynamiczna) pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości prądu, które stanowią krotność 25 Hz.

### 7.3.5. Analiza napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 7.63 oraz 7.65 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.64 oraz 7.66. W tabelach 7.27 oraz 7.28 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.63. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.64. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Tabela 7.27. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrii szczeliny powietrznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	statyczna	%
U <sub>UV 75</sub> (mV)	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm UV150}({\rm mV})$	1.1	30.5	2 572
$U_{\rm UV200}({\rm mV})$	< 0.1	0.3	> 200
<i>U</i> <sub>UV 225</sub> (mV)	< 0.1	0.5	> 400
<i>U</i> <sub>UV 275</sub> (mV)	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm UV300}({\rm mV})$	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm UV325}({\rm mV})$	< 0.1	0.6	> 500
U <sub>UV 375</sub> (mV)	< 0.1	0.6	> 500
<i>U</i> <sub>UV 400</sub> (mV)	< 0.1	0.4	> 300
U <sub>UV 425</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
U <sub>UV 475</sub> (mV)	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm HV500}({\rm mV})$	< 0.1	0.5	> 400



Rys. 7.65. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.66. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Tabela 7.28. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrii szczeliny powietrznej maszyny PM

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm UV25}({\rm mV})$	< 0.1	10.3	> 10 200
<i>U</i> <sub>UV 75</sub> (mV)	< 0.1	159.6	> 159 500
$U_{\rm UV125}({\rm mV})$	< 0.1	2.5	> 2 400
$U_{\rm UV150}({\rm mV})$	1.1	30.5	2 572
$U_{\rm UV175}({\rm mV})$	< 0.1	2.2	> 2 100
$U_{\rm UV200}({\rm mV})$	< 0.1	0.6	> 500
$U_{\rm UV225}({\rm mV})$	< 0.1	13.5	> 13 400
$U_{\rm UV275}({\rm mV})$	< 0.1	18.5	> 18 400
$U_{\rm UV300}({\rm mV})$	< 0.1	0.7	> 600
$U_{\rm UV325}({\rm mV})$	< 0.1	13.8	> 13 700
$U_{\rm UV375}({\rm mV})$	< 0.1	22.4	> 22 300
U <sub>UV 400</sub> (mV)	< 0.1	0.8	> 700
$U_{\rm UV425}({\rm mV})$	< 0.1	0.9	> 800
$U_{\rm UV475}({\rm mV})$	< 0.1	2.7	> 2 600
U <sub>UV 500</sub> (mV)	< 0.1	2.3	> 2 200

Na podstawie wyników w tabeli 7.27 oraz 7.28 można zauważyć, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w silniku pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia międzyfazowego, które stanowią krotność 25 Hz.

### 7.3.6. Analiza napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 7.67 oraz 7.69 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.68 oraz 7.70. W tabelach 7.29 oraz 7.30 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.



Rys. 7.67. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.68. Widmo napięcia fazowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność statyczna	Wzrost %
<i>U</i> <sub>U 75</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U150}({\rm mV})$	0.8	10.5	1 213
$U_{\rm U200}({ m mV})$	< 0.1	0.2	> 100
<i>U</i> <sub>U 225</sub> (mV)	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U275}({\rm mV})$	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U300}({ m mV})$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U325}({ m mV})$	< 0.1	0.4	> 300
$U_{\rm U375}({ m mV})$	< 0.1	0.4	> 300
<i>U</i> <sub>U 400</sub> (mV)	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U425}({\rm mV})$	< 0.1	0.3	> 200
$U_{\rm U475}({\rm mV})$	< 0.1	0.2	> 100
$U_{\rm U500}({\rm mV})$	< 0.1	0.7	> 600

Tabela 7.29. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji



Rys. 7.69. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.70. Widmo napięcia fazowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej

Składowa	Symetria szczeliny	Ekscentryczność	Wzrost
napięcia	powietrznej	dynamiczna	%
$U_{\rm U25}({\rm mV})$	< 0.1	6.5	> 6 400
U <sub>U 75</sub> (mV)	< 0.1	92.1	> 92 000
$U_{\rm U125}({\rm mV})$	< 0.1	1.3	> 1 200
$U_{\rm U150}({ m mV})$	0.8	10.5	1 213
$U_{\rm U175}({ m mV})$	< 0.1	0.9	> 800
$U_{\rm U200}({ m mV})$	< 0.1	0.4	> 300
<i>U</i> <sub>U 225</sub> (mV)	< 0.1	7.7	> 7 600
$U_{\rm U275}({\rm mV})$	< 0.1	10.7	> 10 600
$U_{\rm U300}({ m mV})$	< 0.1	0.5	> 400
$U_{\rm U325}({ m mV})$	< 0.1	8.4	> 8 300
$U_{\rm U375}({\rm mV})$	< 0.1	12.7	> 12 600
$U_{\rm U425}({ m mV})$	< 0.1	1.1	> 1 000
$U_{\rm U475}({ m mV})$	< 0.1	1.1	> 1 000
$U_{\rm U500}({ m mV})$	< 0.1	1.5	> 1 400

Tabela 7.30. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji

Wyniki w tabeli 7.29 oraz 7.30 pokazują, że przy niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w silniku pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia fazowego, które stanowią krotność 25 Hz.

#### 7.4. Badania laboratoryjne silnika PM

Do badań laboratoryjnych wykorzystano maszynę z magnesami trwałymi typu: SMzsg132M–4 ze stojanem  $Q_{\rm S} = 48$  i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny:  $P_{\rm N} = 6.5$  kW,  $U_{\rm N} = 82$  V,  $I_{\rm N} = 55.9$  A,  $n_{\rm N} = 1500$  1/min,  $\eta_{\rm N} = 91.0\%$ . Maszyna została zaprojektowana ze szczeliną powietrzną  $\delta = 1.5$  mm – celem ułatwienia modelowania asymetrii rozkładu pola.

Badania przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 7.71 Aby uzyskać asymetrię szczeliny powietrznej zastosowano te same tarcze łożyskowe, jak w generatorze.



Rys. 7.71. Układ pomiarowy do badań silnika PM z asymetrią szczeliny powietrznej

### 7.4.1. Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom wibracji w silniku PM na biegu jałowym

Na rysunkach 7.72 oraz 7.73 umieszczono czasowe przebiegi prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w silniku wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym na biegu jałowym. Porównanie wartości prędkości drgań umieszczono w tabeli 7.31.



Rys. 7.72. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznej szczelinie powietrznej



Tabela 7.31. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej

	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.85	1.48	74
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.81	3.44	90

Analizując rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 7.31, można zauważyć, że asymetria szczeliny powietrznej silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego na biegu jałowym przekłada się na zwiększenie wibracji maszyny o 74%.

#### 7.4.2. Prąd biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej silnika PM

Na rysunku 7.74 przedstawiono przebiegi czasowe prądów biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 7.75 oraz 7.76.



Rys. 7.74. Przebieg prądu biegu jałowego przy asymetrycznej i asymetrycznej szczelinie powietrznej



Rys. 7.75. Widmo prądu biegu jałowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.76. Widmo prądu biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

W tabeli 7.32 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu silnika PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano znaczący wzrost wartości.

Składowa prądu	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$I_{0 25}(mA)$	< 10.0	67.6	> 576
$I_{0.75}(mA)$	< 10.0	63.2	> 532
$I_{0_{100}}(mA)$	332.0	468.8	41
$I_{0_{125}}(mA)$	16.6	20.1	21
$I_{0\ 200}({\rm mA})$	20.3	22.3	10
$I_{0 375}$ (mA)	10.0	14.2	42
$I_{0_{400}}(mA)$	30.9	32.3	5
$I_{0_{475}}$ (mA)	< 10.0	13.2	> 32

Tabela 7.32. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.32 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej silnika PM pracującego na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości prądu, które stanowią krotność 25 Hz.

## 7.4.3. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunku 7.77 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.78 oraz 7.79.



Rys. 7.77. Przebieg napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.78. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.79. Widmo napięcia międzyfazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

W tabeli 7.33 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm UV0\ 25}({\rm mV})$	< 10.0	19.0	> 90
U <sub>UV0 75</sub> (mV)	< 10.0	33.0	> 230
U <sub>UV0 200</sub> (mV)	< 10.0	13.0	> 30
U <sub>UV0 300</sub> (mV)	20.5	58.0	183
$U_{\rm UV0\ 375}({\rm mV})$	12.0	18.5	54
$U_{\rm UV0_{475}}(\rm mV)$	11.0	17.0	55

powietrznej zaobserwowano znaczący wzrost wartości. Tabela 7.33. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.33 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku pracującym na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia międzyfazowego, które stanowią krotność 25 Hz – podobnie jak w prądzie.

### 7.4.4. Napięcie fazowe biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

Na rysunku 7.80 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych biegu jałowego dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.81 oraz 7.82.







Rys. 7.81. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.82. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

W tabeli 7.34 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego PM pracującego na biegu jałowym, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm U0_{25}}(\rm mV)$	11.8	14.0	19
$U_{\rm U0_{-100}}({\rm mV})$	95.3	99.0	4
$U_{\rm U0_{-300}}({\rm mV})$	23.7	28.7	21
$U_{\rm U0_{325}}(\rm mV)$	13.2	15.3	16
$U_{\rm U0_{400}}({ m mV})$	22.6	25.6	13

Tabela 7.34. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.34 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku pracującym na biegu jałowym następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia fazowego, które stanowią krotność 25 Hz, jednak nie są już to tak jednoznaczne wyniki jak przy prądzie i napięciu międzyfazowym.

## 7.4.5. Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na poziom wibracji w silniku PM w stanie obciążenia

Na rysunkach7.83 – 7.85 umieszczono czasowe przebiegi momentu oraz prędkości drgań przy symetrycznym i niesymetrycznym rozkładzie szczeliny powietrznej w silniku wzbudzanym magnesami trwałymi pracującym w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań umieszczono w tabeli 7.35.



Rys. 7.83. Przebieg momentu przy symetrycznej i asymetrycznej szczelinie powietrznej





Rys. 7.85. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznej szczelinie powietrznej

	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$T_{\rm max}$ (N·m)	41.00	45.31	11
$T_{\min}$ (N·m)	36.49	40.19	10
$T_{\rm pp}$ (N·m)	4.51	5.12	14
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	38.75	42.75	10
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	1.08	1.51	40
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	2.44	3.64	49

Tabela 7.35. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań

Analizując rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 7.35, można zauważyć, że asymetria szczeliny powietrznej silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu elektromagnetycznego o 14 %, co powoduje 40 % wzrost wibracji maszyny.

#### 7.4.6. Prąd przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia

Na rysunku 7.86 przedstawiono przebiegi czasowe prądów obciążenia dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi. oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 7.87 oraz 7.88.



Rys. 7.86. Przebieg prądu obciążenia przy symetrycznej i asymetrycznej szczelinie powietrznej



Rys. 7.88. Widmo prądu obciążenia przy asymetrii szczeliny powietrznej

W tabeli 7.36 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa prądu	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$I_{25}(mA)$	< 1.0	15.0	> 1 400
<i>I</i> <sub>75</sub> (mA)	8.8	21.0	139
$I_{100}({ m mA})$	296.5	310.6	5
$I_{125}(mA)$	16.4	21.9	34
$I_{200}(mA)$	12.1	28.5	136
$I_{225}(mA)$	7.1	8.9	25
$I_{300}(mA)$	49.3	65.5	33
$I_{375}(mA)$	9.6	14.7	53
$I_{400}(mA)$	< 1.0	41.0	> 4 000
$I_{425}(mA)$	< 1.0	5.7	> 560
<i>I</i> <sub>475</sub> (mA)	6.8	12.3	81

Tabela 7.36. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 7.36można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej silnika PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości prądu, które stanowią krotność 25 Hz.

## 7.4.7. Napięcie międzyfazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia

Na rysunku 7.89 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.90 oraz 7.91.







Rys. 7.90. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii szczeliny powietrznej



Rys. 7.91. Widmo napięcia międzyfazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

W tabeli 7.37 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano wzrost wartości.

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
<i>U</i> <sub>UV 75</sub> (mV)	< 1.0	9.8	> 880
$U_{\rm UV100}({ m mV})$	224.4	228.5	2
$U_{\rm UV125}({\rm mV})$	8.6	10.6	23
U <sub>UV 175</sub> (mV)	5.0	6.4	28
$U_{\rm UV375}({\rm mV})$	11.9	19.4	63
$U_{\rm UV400}({ m mV})$	40.6	46.8	15
$U_{\rm UV425}({\rm mV})$	6.4	8.6	34
$U_{\rm UV475}({\rm mV})$	11.8	20.6	75

Tabela 7.37. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników tabeli 7.37 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia międzyfazowego, które stanowią krotność 25 Hz – podobnie jak w prądzie.

### 7.4.8. Napięcie fazowe przy asymetrii szczeliny powietrznej w stanie obciążenia

Na rysunku 7.92 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla symetrycznego oraz niesymetrycznego rozkładu szczeliny powietrznej w silniku z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 7.93 oraz 7.94.





125

Rys. 7.94. Widmo napięcia fazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej

150

100

0.1

0.01

. 25

0

75

50

W tabeli 7.38 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego silnika PM pracującego w stanie obciążenia, dla których przy asymetrii szczeliny powietrznej zaobserwowano znaczący wzrost wartości.

. 225

200

250

Częstotliwość, f(Hz)

. 275

325

300

. 375

350

. 425

400

475

500

450

175

Składowa napięcia	Symetria szczeliny powietrznej	Ekscentryczność	Wzrost %
$U_{\rm U75}({\rm mV})$	< 1.0	5.4	> 440
$U_{\rm U100}({ m mV})$	136.1	138.0	1
$U_{\rm U125}({\rm mV})$	< 1.0	9.1	> 810
<i>U</i> <sub>U 375</sub> (mV)	14.6	16.6	14
$U_{\rm U425}({\rm mV})$	< 1.0	7.7	> 670
<i>U</i> <sub>U 475</sub> (mV)	12.0	14.2	18

Tabela 7.38. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników tabeli 7.38 można zauważyć, że przy niesymetrycznej szczelinie powietrznej w silniku pracującym w stanie obciążenia następuje wzrost wartości częstotliwości napięcia fazowego, które stanowią krotność 25 Hz.

#### 7.5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły autorowi na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi (15), (16) poszczególnych częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska.

$$f_{k1} = \mathbf{k} \cdot f - \frac{(p-1)f}{p} \tag{15}$$

$$f_{k2} = 2k \cdot f \tag{16}$$

gdzie:

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

Porównując wyniki symulacji z wynikami badań laboratoryjnych przedstawione w tabelach 7.39 – 7.42 można zauważyć dużą zbieżność uzyskanych charakterystycznych częstotliwości. Zarówno badania laboratoryjne, jak również symulacje komputerowe mają poparcie w wynikach otrzymanych przy pomocy opracowanych wcześniej równań matematycznych, co potwierdza, iż można przy ich pomocy selekcjonować tzw. markery dla asymetrii rozkładu szczeliny powietrznej generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi.

Tabela 7.39. Asymetryczny rozkład szczeliny powietrznej generatora PM na biegu jałowym

Częstotliwość,	Badania	Obliczenia	Symulacje
f(Hz)	laboratoryjne	analityczne	komputerowe
50	50.15	50.15	50.15
25	25.08	25.08	25.15
75	75.22	75.23	75.15
100	100.10	100.30	100.15
125	124.97	125.38	125.15
175	-	175.53	175.15
200	200.00	200.60	200.15
225	225.07	225.68	225.15
275	275.02	275.83	275.15
300	299.29	300.90	300.15
325	324.97	325.98	325.15
375	374.92	376.13	375.15
400	400.00	401.20	400.15
425	-	426.28	425.15
475	475.02	476.43	475.15
500	499.89	501.50	500.15

Częstotliwość,	Badania	Obliczenia	Symulacje
f(Hz)	laboratoryjne	analityczne	komputerowe
50	50.37	50.37	50.10
25	25.34	25.19	25.10
75	75.61	75.56	75.10
100	100.25	100.74	100.10
125	126.42	125.93	125.10
175	-	176.30	175.10
200	200.20	201.48	200.10
225	227.03	226.67	225.10
275	-	202.04	275.10
300	302.74	302.22	300.10
325	328.54	327.41	325.10
375	378.45	377.78	375.10
400	-	402.96	400.10
425	429.60	403.15	425.10
475	-	403.52	475.10
500	-	503.70	500.10

Tabela 7.40. Asymetryczny rozkład szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia

Tabela 7.41. Niesymetryczny rozkład szczeliny powietrznej silnika PM pracującego na biegu jałowym

Częstotliwość,	Badania	Obliczenia
f(Hz)	laboratoryjne	analityczne
50	50.16	50.16
25	25.28	25.08
75	75.03	75.24
100	100.11	100.32
125	124.79	125.40
175	-	150.48
200	200.02	200.64
225	-	225.72
275	-	275.88
300	299.93	300.96
325	325.01	326.04
375	374.96	376.20
400	401.04	401.28
425	-	426.36
475	474.87	476.52
500	-	501.60

Tabela 7.42. Niesymetryczny rozkład szczeliny powietrznej silnika PM pracującego w stanie obciążenia

Częstotliwość,	Badania	Obliczenia	Symulacje
<i>f</i> (Hz)	laboratoryjne	analityczne	komputerowe
50	50.17	50.17	50.10
25	25.29	25.09	25.10
75	75.26	75.26	75.10
100	100.15	100.34	100.10
125	127.44	125.43	125.10
175	175.80	175.60	175.10
200	200.09	200.68	200.10
225	227.39	225.77	225.10
275	-	275.94	275.10
300	300.04	301.02	300.10
325	-	326.11	325.10
375	375.69	376.28	375.10
400	399.99	401.36	400.10
425	427.28	426.45	425.10
475	475.64	476.62	475.10
500	-	501.70	500.10

# 8. Niewyważenie maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych

### 8.1. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w generatorze PM

Do badań laboratoryjnych wykorzystano maszynę z magnesami trwałymi typu: PMzsg132M–4 ze stojanem  $Q_{\rm S}$  = 36 i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni (Rys. 8.1. Widok maszyny PM z zamontowaną masą niewyważoną). Parametry maszyny:  $P_{\rm N}$  = 6.0 kW,  $U_{\rm N}$  = 60 V,  $I_{\rm N}$  = 57.7 A,  $n_{\rm N}$  = 1500 1/min,  $\eta_{\rm N}$  = 85.0%.

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 8.1.

Parametry niewywagi:  $m_{\text{niew}} = \text{ok. 50g na ramieniu } l = 70 \text{ mm.}$ 



Rys. 8.1. Widok maszyny PM z zamontowaną masą niewyważoną



Rys. 8.2. Układ pomiarowy do badań niewyważenia generatora PM

#### 8.1.1. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji pracującego na biegu jałowym

Na rysunkach 8.3 oraz 8.4 umieszczono czasowe przebiegi prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM pracującego na biegu jałowym. Porównanie wartości prędkości drgań umieszczono w tabeli 8.1.



Rys. 8.3. Przebieg prędkości drgań wyważonego generatora PM



Rys. 8.4. Przebieg prędkości drgań niewyważonego generatora PM

Tabela 8.1. Porównanie wartości prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM

Ī		Maszyna wyważona		Wzrost (%)
	$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.53	3.35	532
	$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.41	7.43	427

Analizując rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 8.1 można zauważyć, że niewyważenie generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego na biegu jałowym przekłada się na zwiększenie wibracji maszyny o 532 %.

#### 8.1.2. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego przy niewyważeniu

Na rysunku 8.5 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla wyważonego oraz niewyważonego generatora z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.6 oraz 8.7.



Rys. 8.5. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu







W tabeli 8.2 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego na biegu jałowym, dla których przy niewyważeniu generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości.

Tabela 8.2. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm UV0\ 25}({\rm mV})$	4.0	13.3	233
$U_{\rm UV0~75}({\rm mV})$	13.0	42.5	227

Na podstawie wyników w tabeli 8.2 można zauważyć:, że przy niewyważeniu generatora PM pracującego na biegu jałowym następuje wzrost składowych napięcia międzyfazowego – częstotliwość 25 Hz o 233 %, a 75 Hz o 227 %.

#### 8.1.3. Napięcie fazowe biegu jałowego przy niewyważeniu

Na rysunku 8.8 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych biegu jałowego dla wyważonego oraz niewyważonego generatora z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.9 oraz 8.10.



Rys. 8.8. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.9. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.10. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.3 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego na biegu jałowym, dla których przy niewyważeniu generatora PM zaobserwowano wzrost ich wartości.

Tabela 8.3. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm U0\ 25}({\rm mV})$	4.0	10.6	165
U <sub>U0 75</sub> (mV)	10.7	25.8	141

Na podstawie wyników w tabeli 8.3 można zauważyć, że przy niewyważeniu generatora PM pracującego na biegu jałowym następuje znaczący wzrost składowych napięcia fazowego – częstotliwość 25 Hz o 165 %, a 75 Hz o 141 %.

#### 8.1.4. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w stanie obciążenia

Na rysunkach 8.11 – 8.13 umieszczono czasowe przebiegi momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM pracującego w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań umieszczono w tabeli 8.4.



Rys. 8.11. Przebieg momentu wyważonego i niewyważonego generatora PM



Rys. 8.12. Przebieg prędkości drgań wyważonego generatora PM


Rys. 8.13. Przebieg prędkości drgań niewyważonego generatora PM

	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost/Spadek (%)
$T_{\rm max}$ (N·m)	44.11	43.91	-0.4
$T_{\min}$ (N·m)	42.73	41.86	-2.0
$T_{\rm pp}$ (N·m)	1.38	2.05	48.6
$T(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m})$	43.38	42.97	-0.9
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	0.71	2.15	202
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.64	4.37	166

Tabela 8.4. Wartości momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM

Analizując powyższe rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 8.4 można zauważyć, że niewyważenie generatora ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia powoduje 48,6 % wzrost pulsacji momentu elektromagnetycznego, co przekłada się na zwiększenie wibracji maszyny o 202 %.

#### 8.1.5. Prąd obciążenia przy niewyważeniu

Na rysunku 8.14 przedstawiono przebiegi czasowe prądów obciążenia dla wyważonego oraz niewyważonego generatora z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 8.15 oraz 8.16.



Rys. 8.14. Przebieg prądu obciążenia przy wyważeniu oraz niewyważeniu





Rys. 8.16. Widmo prądu obciążenia maszyny niewyważonej

W tabeli 8.5 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu, dla których przy niewyważeniu generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości.

Składowa prądu	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$I_{25}(mA)$	2.9	12.0	314
$I_{75}(\mathbf{mA})$	4.6	15.6	239

Tabela 8.5. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 8.5 można zauważyć, że przy niewyważeniu generatora PM pracującego w stanie obciążenia następuje znaczący wzrost składowych prądu – częstotliwość 25 Hz o 314 %, a 75 Hz o 239 %.

#### 8.1.6. Napięcie międzyfazowe przy niewyważeniu w stanie obciążenia

Na rysunku 8.17 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla wyważonego oraz niewyważonego generatora z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.18 oraz 8.19.



Rys. 8.17. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu







W tabeli 8.6 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego, dla których przy niewyważeniu generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości.

Tabela 8.6. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm UV25}(\rm mV)$	2.9	33.0	1 038
$U_{\rm UV75}({\rm mV})$	5.6	12.7	127

Na podstawie wyników w tabeli 8.6 można zauważyć, że przy niewyważeniu generatora PM pracującego w stanie obciążenia następuje znaczący wzrost składowych napięcia międzyfazowego – częstotliwość 25 Hz o 1038 %, a 75 Hz o 127 %.

#### 8.1.7. Napięcie fazowe generatora PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia

Na rysunku 8.20 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla wyważonego oraz niewyważonego generatora z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.21 oraz 8.22.



Rys. 8.20. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.21. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.22. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.7 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego, dla których przy niewyważeniu generatora PM zaobserwowano znaczący wzrost ich wartości.

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm U25}({\rm mV})$	< 0.1	36.9	> 36 800
U <sub>U 75</sub> (mV)	< 0.1	11.3	> 11 200

Tabela 8.7. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 8.7 można zauważyć, że przy niewyważeniu generatora PM pracującego w stanie obciążenia następuje znaczący wzrost składowych napięcia fazowego – częstotliwość 25 Hz o ponad 36800 %, a 75 Hz o ponad 11200 %.

#### 8.2. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w silniku PM

Do badań laboratoryjnych wykorzystano maszynę z magnesami trwałymi typu: SMzsg132M–4 ze stojanem  $Q_{\rm S}$  = 36 i wirnikiem SPM posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni. Parametry maszyny:  $P_{\rm N}$  = 6.5 kW,  $U_{\rm N}$  = 65 V,  $I_{\rm N}$  = 72.1 A,  $n_{\rm N}$  = 1500 1/min,  $\eta_{\rm N}$  = 87.0%.

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla parametrów znamionowych w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 8.23.

Parametry niewywagi: m = ok. 50g na ramieniu l = 70 mm.



Rys. 8.23. Układ pomiarowy do badań niewyważenia silnika PM

# 8.2.1. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji silnika pracującego na biegu jałowym

Na rysunkach 8.24 oraz 8.25 umieszczono czasowe przebiegi prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM pracującego na biegu jałowym. Porównanie wartości prędkości drgań umieszczono w tabeli 8.8.



Rys. 8.24. Przebieg prędkości drgań wyważonego silnika PM



Rys. 8.25. Przebieg prędkości drgań niewyważonego silnika PM

Tabela 8.8. Porównanie wartości prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM

	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost (%)
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	1.16	2.29	97
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	1.88	3.67	95

Analizując powyższe rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 8.8 można zauważyć, że niewyważenie silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego na biegu jałowym przekłada się na 97 % zwiększenie wibracji maszyny.

#### 8.2.2. Prąd biegu jałowego przy niewyważeniu

Na rysunku 8.26 przedstawiono przebiegi czasowe prądów biegu jałowego dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 8.27 oraz 8.28.



Rys. 8.26. Przebieg prądu biegu jałowego przy wyważeniu oraz niewyważeniu





Rys. 8.28. Widmo prądu biegu jałowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.9 umieszczono wartości skuteczne składowych prądu biegu jałowego, dla których przy niewyważeniu silnika PM zaobserwowano wzrost wartości.

Tabela 8.9. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Składowa prądu	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$I_{0 25}(mA)$	< 1.0	20.2	> 1 920
I <sub>0 75</sub> (mA)	15.0	35.6	137

Na podstawie wyników w tabeli 8.9 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego na biegu jałowym następuje znaczący wzrost składowych prądu – częstotliwość 25 Hz o ponad 1920 %, a 75 Hz o 137 %.

#### 8.2.3. Napięcie międzyfazowe biegu jałowego silnika PM przy niewyważeniu

Na rysunku 8.29 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.30 oraz 8.31.



Rys. 8.29. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.30. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.31. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny niewyważonej.

W tabeli 8.10 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego na biegu jałowym, dla których przy niewyważeniu silnika PM zaobserwowano wzrost wartości.

Tabela 8.10. Składowe napięcia międzyfazowego charakterystyczne dla niewyważenia maszyny PM

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm UV0\ 25}({\rm mV})$	< 1.0	15.2	> 1 420
$U_{\rm UV0~75}({\rm mV})$	< 1.0	17.0	> 1 600

Na podstawie wyników w tabeli 8.10 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego na biegu jałowym następuje znaczący wzrost składowych napięcia międzyfazowego – częstotliwość 25 Hz o ponad 1420 %, a 75 Hz o ponad 1600 %, podobnie jak w przypadku napięcia prądu.

#### 8.2.4. Napięcie fazowe biegu jałowego silnika PM przy niewyważeniu

Na rysunku 8.32 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych napięć fazowych biegu jałowego dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi pracującego na biegu jałowym oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.33 oraz 8.34.



Rys. 8.32. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.33. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.34. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.11 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego na biegu jałowym, dla których przy niewyważeniu silnika PM zaobserwowano wzrost ich wartości.

Tabela 8.11. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm U0\ 25}({\rm mV})$	< 1.0	12.2	> 1 120
U <sub>U0 75</sub> (mV)	< 1.0	15.8	> 1 480

Na podstawie wyników w tabeli 8.11 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego na biegu jałowym następuje znaczący wzrost składowych napięcia fazowego – częstotliwość 25 Hz o ponad 1120 %, a 75 Hz o ponad 1480 %, podobnie jak w przypadku prądu oraz napięcia międzyfazowego.

# 8.2.5. Wpływ niewyważenia na poziom wibracji w silniku PM w stanie obciążenia

Na rysunkach 8.35 – 8.37 umieszczono czasowe przebiegi momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM pracującego w stanie obciążenia. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań umieszczono w tabeli 8.12.



Rys. 8.35. Przebieg momentu wyważonego i niewyważonego silnika PM



Rys. 8.36. Przebieg prędkości drgań wyważonego silnika PM



Rys. 8.37. Przebieg prędkości drgań niewyważonego silnika PM

	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost/Spadek (%)
$T_{\rm max}$ (N·m)	31.57	31.86	0.9
$T_{\min}$ (N·m)	28.10	27.15	-3.4
$T_{\rm pp}$ (N·m)	3.47	4.71	35.7
$T(\mathbf{N} \cdot \mathbf{m})$	29.69	29.48	-0.7
$v (\mathbf{mm} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	2.90	3.53	22
$v_{\rm max} ({\rm mm}\cdot{\rm s}^{-1})$	5.08	6.42	26

Tabela 8.12. Wartości momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM

Analizując powyższe rysunki oraz wartości zebrane w tabeli 8.12 można zauważyć, że niewyważenie silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych pracującego w stanie obciążenia powoduje wzrost pulsacji momentu elektromagnetycznego (35.7 %), co przekłada się na zwiększenie wibracji maszyny o 26 %.

#### 8.2.6. Prąd obciążenia silnika PM przy niewyważeniu

Na rysunku 8.38 przedstawiono przebiegi czasowe prądów obciążenia dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych tych prądów – rysunek 8.39 oraz 8.40.



Rys. 8.38. Przebieg prądu obciążenia przy wyważeniu oraz niewyważeniu







W tabeli 8.13 umieszczono natomiast porównanie wartości skutecznych pradu obciążenia silnika dla uzyskanych składowych maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu maszyny.

Tabela 8.13. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych

Składowa prądu	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$I_{25}(\mathrm{mA})$	< 1.0	15.8	> 1 480
$I_{75}(mA)$	< 1.0	33.0	> 3 200

Na podstawie wyników w tabeli 8.13 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost składowych prądu – częstotliwość 25 Hz o ponad 1480 %, a 75 Hz o ponad 3200 %.

# 8.2.7. Napięcie międzyfazowe silnika PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia

Na rysunku 8.41 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.42 oraz 8.43.



Rys. 8.41. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.42. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.43. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.14 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia międzyfazowego, dla których przy niewyważeniu silnika PM zaobserwowano wzrost ich wartości.

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm UV25}({\rm mV})$	< 1.0	2.1	> 110
$U_{\rm UV75}({ m mV})$	< 1.0	3.0	> 200

Tabela 8.14. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 8.14 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost składowych napięcia międzyfazowego – częstotliwość 25 Hz o ponad 110 %, a 75 Hz o ponad 200 %.

#### 8.2.8. Napięcie fazowe silnika PM przy niewyważeniu w stanie obciążenia

Na rysunku 8.44 przedstawiono przebiegi czasowe napięć fazowych dla wyważonego oraz niewyważonego silnika z magnesami trwałymi pracującego w stanie obciążenia oraz porównanie widm częstotliwościowych tych napięć – rysunek 8.45 oraz 8.46.



Rys. 8.44. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu



Rys. 8.45. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej



Rys. 8.46. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej

W tabeli 8.15 umieszczono wartości skuteczne składowych napięcia fazowego, dla których przy niewyważeniu silnika PM zaobserwowano wzrost ich wartości.

Składowa napięcia	Maszyna wyważona	Niewyważenie	Wzrost %
$U_{\rm U25}({\rm mV})$	< 1.0	1.7	> 70
$U_{\rm U75}({ m mV})$	< 1.0	1.4	>40

Tabela 8.15. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych

Na podstawie wyników w tabeli 8.15 można zauważyć, że przy niewyważeniu silnika PM pracującego w stanie obciążenia następuje wzrost składowych napięcia fazowego – częstotliwość 25 Hz o ponad 70 %, a 75 Hz o ponad 40 %., podobnie jak w przypadku napięcia międzyfazowego oraz prądu.

#### 8.3. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi (20), (21) poszczególnych częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla opisanego zjawiska. Sposób diagnostyki bazujący na przedstawionym markerze został opatentowany przez autora [29], [30], [31], [32].

$$f_1 = \frac{(p-1)f_{\rm H01}}{p} \tag{20}$$

$$f_2 = \frac{(p+1)f_{\rm H01}}{p} \tag{21}$$

gdzie:

 $f_{1,2}$ – szukane częstotliwości, p – liczba par biegunów, ,  $f_{H01}$  – częstotliwość pierwszej harmonicznej badanego generatora.

Analizując wyniki badań laboratoryjnych przedstawionymi w tabelach 8.16 – 8.19 można zauważyć dużą zbieżność uzyskanych charakterystycznych częstotliwości z wynikami otrzymanymi za pomocą opracowanych wcześniej równań

matematycznych, co potwierdza, iż można przy ich pomocy selekcjonować tzw. markery dla niewyważenia maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi.

Częstotliwość, f (Hz)	Badania laboratoryjne	Obliczenia analityczne
50	50.11	50.11
25	25.26	25.06
75	75.37	75.17

Tabela 8.16. Niewyważenie generatora PM pracującego na biegu jałowym

Tabela 8.17. Niewyważenie generatora PM pracującego w stanie obciążenia

Częstotliwość, f (Hz)	Badania laboratoryjne	Obliczenia analityczne
50	50.06	50.06
25	25.23	25.03
75	75.09	75.09

Tabela 8.18. Niewyważenie silnika PM pracującego na biegu jałowym

Częstotliwość, f (Hz)	Badania laboratoryjne	Obliczenia analityczne
50	50.12	50.12
25	25.16	25.06
75	75.07	75.18

Tabela 8.19. Niewyważenie silnika PM pracującego w stanie obciążenia

Częstotliwość, f (Hz)	Badania laboratoryjne	Obliczenia analityczne
50	50.13	50.13
25	25.07	25.07
75	75.20	75.20

### 9. Podsumowanie

Zaletą proponowanego sposobu diagnozowania drgań w maszynach 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. Metoda bazuje na analizie częstotliwościowej sygnałów własnych maszyny – prąd i/lub napięcie. Pomiary mogą być wykonywane on–line w czasie normalnej eksploatacji maszyny.

Podstawowy cel pracy, którym było opracowanie metody diagnostyki drganiowej napędów z maszynami wzbudzanymi magnesami trwałymi został zrealizowany.

Badania na stole wibracyjnym ukazują możliwość wykorzystania maszyny wzbudzanej magnesami trwałymi jako czujnik drgań zarówno dla siebie jak również dla całego napędu. Uzyskane odpowiedzi na wymuszenia, zarówno ustalone jak również impulsowe pokrywają się z tymi otrzymanymi poprzez czujniki drgań.

Badania laboratoryjne oraz wyniki symulacji pozwalają na stwierdzenie, że:

- w przypadku generatora PM z asymetrycznym obciążeniem oraz silnika PM z asymetrią zasilania następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia,
- w przypadku generatora oraz silnika wzbudzanych magnesami trwałymi z asymetrycznym rozkładem szczeliny powietrznej następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia,
- w przypadku niewyważenia generatora oraz silnika wzbudzanych magnesami trwałymi następuje wzrost pulsacji momentu, co powoduje uwidocznienie się niektórych składowych prądu i/lub napięcia.

Analiza wyników badań laboratoryjnych oraz symulacji komputerowych pokazuje możliwość wykorzystania maszyny PM do detekcji drgań powyżej przyjętego poziomu dopuszczalnego. Sama analiza częstotliwościowa pozwala na określenie przyczyny zwiększonego poziomu wibracji, natomiast chcąc poznać wartość skuteczną drgań konieczne jest wcześniejsze wyskalowanie.

Porównując wyniki badań oraz symulacji można zauważyć bardzo dużą zbieżność otrzymanych poszczególnych częstotliwości charakterystycznych dla danych zaburzeń. 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 amplitudy dla rozpatrywanych częstotliwości.

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych symulacji komputerowych pozwoliły na wyselekcjonowanie i opisanie równaniami matematycznymi poszczególnych częstotliwości, których wzrost stanowi swego rodzaju marker dla określonych stanów niepożądanych w maszynach z magnesami trwałymi. Równania zostały przypisane do następujących awarii:

• asymetria obciążenia generatora PM lub zasilania silnika PM [25],

$$f_{\rm k} = (2{\rm k} - 1)\frac{n \cdot p}{20} \tag{11}$$

• asymetria rozkładu szczeliny powietrznej (ekscentryczność),

$$f_{k1} = \mathbf{k} \cdot f - \frac{(p-1)f}{p} \tag{15}$$

$$f_{k2} = 2k \cdot f \tag{16}$$

• niewyważenie [29].

$$f_1 = \frac{(p-1)f_{\rm H01}}{p} \tag{20}$$

$$f_2 = \frac{(p+1)f_{\rm H01}}{p} \tag{21}$$

gdzie:

 $f_1, f_2$ - szukane częstotliwości,  $f_{k1}, f_{k2}$ - szukane częstotliwości dla k-tej składowej,  $f_k$ - szukane k-te częstotliwości,  $f_{H01}$  - częstotliwość pierwszej harmonicznej badanej maszyny, p - liczba par biegunów, k - liczba naturalna, n - prędkość obrotowa.

Wyniki badań laboratoryjnych ukazują, że:

- proponowana metoda dobrze charakteryzuje stan techniczny maszyny,
- umożliwiają wprowadzenia kryteriów oceny stanu technicznego.

Na podstawie przedstawionych badań eksperymentalnych wykazano słuszność tezy dotyczącej drganiowej metody diagnostycznej, a mianowicie: "badania diagnostyczne drgań napędów z maszynami elektrycznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych metodą sygnałów własnych, wykorzystują ich specyficzne właściwości pozwalające użyć maszynę jako czujnik drgań".

Autor przeanalizował liczne prace z zagadnienia diagnostyki maszyn elektrycznych i nie są mu znane publikacje opisujące diagnostykę drganiową bazującą na sygnałach własnych maszyny. Świadczy to o innowacyjności i niestandardowym podejściu do zagadnienia diagnostyki maszyn z magnesami trwałymi. Potwierdza to również sprawdzona czystość patentowa udzielonych autorowi patentów.

### 9.1. Zakres dalszych prac

Tematyka jest nowa i aktualna w szczególności w odniesieniu do pojazdów elektrycznych z silnikami zabudowanymi w kołach i ich diagnostyki on-line. W silnikach tych trudno zabudowywać czujniki drgań, ponadto czujniki drgań zabudowane na stałe same ulegają awarii i nie spełniają swojej funkcji. Według autora prace z tej tematyce będą się rozwijać. Dalsze prace dotyczące drganiowej metody diagnostycznej maszyn elektrycznych ze wzbudzeniem od magnesów trwałych powinny obejmować:

- rozszerzenie przedstawionej metody na układy napędowe współpracujące z przekształtnikami energoelektronicznymi,
- opracowanie jednoznacznych kryteriów poziomu wibracji z oceną stanu technicznego,
- rozszerzenie metody na inne źródła zaburzeń poprawnej pracy napędów z maszynami PM (uszkodzenie łożysk, uszkodzenie przekładni, itp.),
- opracowanie "inteligentnego" urządzenia śledzącego i analizującego sygnały drganiowe zakodowane w napięciach i/lub prądach maszyny elektrycznej PM, które diagnozowałoby maszynę on-line w warunkach normalnej eksploatacji.

## Spis rysunków

Rys 11 Dopuszczalne wartości predkości drogań w maszynach elektrycznych	7
Rys. 1.2. Proces degradacii kotycka	····· / 8
Rys. 1.2. Proces dogradaji ložyska	0
Rys. 1.5. Flotes degradacji ložyska – SPIVI	9
Rys. 1.4. Geoletinia tożyska tocznego	9
Kys. 1.5. Trajektoria drgan	10
Rys. 1.6. Symetria szczeliny powietrznej	11
Rys. 1.7. Ekscentryczność statyczna	11
Rys. 1.8. Ekscentryczność dynamiczna	12
Rys. 1.9. Ekscentryczność mieszana	12
Rys. 1.10. Błędny pomiar rezystancji uzwojenia	15
Rys. 1.11. Budowa czujnika elektrodynamicznego oraz maszyny PM	15
Rys. 1.12. Charakterystyka prędkości drgań w funkcji częstotliwości	15
Rys. 1.13. Charakterystyki napięć fazowych w funkcji częstotliwości	16
Rys. 2.1. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 36$	18
Rys. 2.2. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 48$	18
Rys. 2.3. Stojan o liczbie żłobków $Q_s = 60$	19
Rvs. 2.4. Wirnik SPM bez skosu, o liczbie biegunów $2p = 4$	19
Rvs. 2.5. Wirnik SPM ze skosem skokowym, o liczbie biegunów $2p = 4$	19
Rys. 2.6. Wirnik SPM bez skosu, o liczbie biegunów $2n = 12$	20
Rys. 2.7 Blacha wirnika IPM o liczbie biegunów $2n = 4$	20
Rys. 2.8. Blacha wirnika IPMV o liczbie biegunów $2p = 4$	20
Rys. 3.1. Schemat zastenczy maszyny PM	23
Rys. 3.1. Schemat zastępczy maszyny i William a powiekszeniem siętki dyskretyzacyjnej	25
Rys. 5.2. Fizykład inodelu polowo – obwodowego wiaz z powiększeniem statki dyskietyzacyjnej	20
Rys. 4.1. Stol wibildcyjny	27
Kys. 4.2. Układ pomiarowy do badan maszyny PM na stole wibracyjnym	27
Kys. 4.3. Przebiegi – czasowe prędkości drgan ( $a - v_X$ , $b - v_Y$ , $c - v_Z$ )	28
Rys. 4.4. Przebiegi czasowe napięc międzyfazowych (a – $u_{UV}$ , b – $u_{VW}$ , c – $u_{WU}$ )	28
Rys. 4.5. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a – $u_U$ , b – $u_V$ , c – $u_W$ )	28
Rys. 4.6. Przebiegi czasowe prędkości drgań (a – $v_X$ , b – $v_Y$ , c – $v_Z$ )	29
Rys 4.7 Przebiegi czasowe napieć miedzyfazowych $(a - u_{\rm DV}, b - u_{\rm DV}, c - u_{\rm DV})$	- 29
(1,1,1,1,1)	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ )	29
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ )	29 29 30
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych ( $a - u_U$ , $b - u_V$ , $c - u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów ( $a - i_U$ , $b - i_V$ , $c - i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31 31
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych ( $a - u_U$ , $b - u_V$ , $c - u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów ( $a - i_U$ , $b - i_V$ , $c - i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31 31 32
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31 31 32 32
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31 31 32 32 32 33
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 31 31 32 32 33 33
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe	29 30 30 31 31 32 32 33 33 34
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma predkości drgań przy wymuszeniu o czestotliwości drgań $f = 40$ Hz	29 30 30 31 31 32 32 32 33 33 34 34
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.8. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz	29 30 30 31 31 32 32 33 33 34 34 34
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.8. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz	29 30 30 31 32 32 32 33 34 34 35 35
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.8. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz	29 30 30 31 32 32 32 33 33 34 34 35 35
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ) Rys. 4.8. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a – $u_U$ , b – $u_V$ , c – $u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a – $i_U$ , b – $i_V$ , c – $u_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prędów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a – $u_U$ , b – $u_V$ , c – $u_W$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prędów (a – $i_U$ , b – $i_V$ , c – $i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.23. Didma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.24. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.25. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego podanego symulacjom komputerowym Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego podanego symulacjom komputerowym	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć międzyfażowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ )	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $- u_U$ , b $- u_V$ , c $- u_W$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $- i_U$ , b $- i_V$ , c $- i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądów (a $- i_U$ , b $- i_V$ , c $- i_W$ ) Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądów (a $- i_U$ , b $- i_V$ , c $- i_W$ ) Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym Rys. 5.2. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia – wynik symulacji Rys. 5.3. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia – wynik symulacji	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_{\rm U}$ , b $-u_{\rm V}$ , c $-u_{\rm W}$ ) Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.10. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań $f = 40$ Hz Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym Rys. 5.2. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia Rys. 5.4. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fiązowych (a – $u_U$ , b – $u_V$ , c – $u_W$ ), Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a – $i_U$ , b – $i_V$ , c – $u_W$ ), Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a – $i_U$ , b – $i_V$ , c – $u_W$ ), Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_{\rm U}$ , b $-u_{\rm V}$ , c $-u_{\rm W}$ )	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , c $-u_W$ )	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań przy wymuszeniu oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań $f = 40$ Hz. Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym Rys. 5.2. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia – wynik symulacji Rys. 5.3. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.4. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.6. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.7. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia – Rys. 5.8. Widmo napięcia	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ )	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_{\rm U}$ , b $-u_{\rm V}$ , c $-u_{\rm W}$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_{\rm U}$ , b $-i_{\rm V}$ , c $-i_{\rm W}$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi czasowe prądów oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.18. Widma prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym. Rys. 5.3. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii obciążenia . Rys. 5.4. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.5. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.6. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.7. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.9. Układ pomiarowy do badań generatora PM z asymetrii obciążenia . Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia R	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fizowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe prądkości drgań oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fizowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszeniu o częstotliwości drgań $f = 40$ Hz. Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fiądzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.21. Przebiegi napięć fiazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.22. Widma napięć fiazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym. Rys. 5.2. Przebieg mapiety symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.4. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.5. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.7. Przebieg napięcia fizowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.8. Widmo napięcia fizowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia . Rys. 5.9. Układ pomiarowy do badań generatora PM z	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.11. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.12. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.14. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi prędkości drgań bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f=40$ Hz. Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszenia oraz przy wymuszeniu drgań $f=40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć międzyfazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f=40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f=40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f=40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f=40$ Hz. Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym. Rys. 5.2. Przebieg mapięci międzyfazowego przy symetrii obciążenia. Rys. 5.3. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.4. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.5. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.6. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.7. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.8. Widmo napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obcią	
Rys. 4.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ). Rys. 4.9. Przebiegi czasowe prądów (a $-i_U$ , b $-i_V$ , c $-i_W$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe napięć fazowych (a $-u_U$ , b $-u_V$ , c $-u_W$ ). Rys. 4.10. Przebiegi czasowe napięć międzyfazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.13. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.15. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.16. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.17. Przebiegi czasowe napięć fazowych oraz ich widma częstotliwościowe. Rys. 4.18. Widma prędkości drgań przy wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.19. Przebiegi napięć międzyfazowych bez wymuszenia oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.20. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.21. Przebiegi napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 4.22. Widma napięć fazowych bez wymuszenia drgań oraz przy wymuszeniu $f = 40$ Hz. Rys. 5.1. Widok modelu polowo – obwodowego poddanego symulacjom komputerowym. Rys. 5.2. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.3. Przebieg napięcia międzyfazowego przy symetrii obciążenia. Rys. 5.4. Widmo prądu przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.5. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.8. Widmo napięcia międzyfazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.9. Ukłał pomiarowy do badań generatora PM z asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg prędkości drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg prędkości drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia. Rys. 5.10. Przebieg prędkości drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia. R	29

Rys. 7.32. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej ...... 72 

Rys. 7.52. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej ...... 81 Rys. 7.53. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej ... 81 Rys. 7.54. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej ....... 82 Rys. 7.55. Widmo napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii oraz asymetrii szczeliny powietrznej ... 82 Rys. 7.74. Przebieg prądu biegu jałowego przy asymetrycznej i asymetrycznej szczelinie powietrznej .......92 Rys. 7.80. Przebieg napięcia fazowego biegu jałowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej ...... 95 Rys. 7.85. Przebieg prędkości drgań przy symetrycznej szczelinie powietrznej ......97 Rvs. 7.91. Widmo napiecia międzyfazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej...... 100 Rys. 7.92. Przebieg napięcia fazowego przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej ...... 101 Rys. 7.93. Widmo napięcia fazowego przy symetrii szczeliny powietrznej ...... 101 Rys. 7.94. Widmo napięcia fazowego przy asymetrii szczeliny powietrznej ...... 101 Rys. 8.1. Widok maszyny PM z zamontowaną masą niewyważoną...... 104 Rys. 8.2. Układ pomiarowy do badań niewyważenia generatora PM...... 104 Rys. 8.3. Przebieg predkości drgań wyważonego generatora PM ...... 105 Rys. 8.4. Przebieg predkości drgań niewyważonego generatora PM ...... 105 Rys. 8.5. Przebieg napiecia miedzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu...... 106 Rys. 8.7. Widmo napiecia miedzyfazowego maszyny niewyważonej......106

Rys. 8.8. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	
Rys. 8.9. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej	107
Rys. 8.10. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej	107
Rys. 8.11. Przebieg momentu wyważonego i niewyważonego generatora PM	
Rys. 8.12. Przebieg prędkości drgań wyważonego generatora PM	108
Rys. 8.13. Przebieg predkości drgań niewyważonego generatora PM	
Rys. 8.14. Przebieg pradu obciążenia przy wyważeniu oraz niewyważeniu	109
Rys. 8.15. Widmo pradu obciążenia maszyny wyważonej	110
Rys. 8.16. Widmo pradu obciażenia maszyny niewyważonej	110
Rys. 8.17. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	111
Rys. 8.18. Widmo napiecia międzyfazowego maszyny wyważonej	111
Rys. 8.19. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny niewyważonej	
Rys. 8.20. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	
Rys. 8.21. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej	
Rys. 8.22. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej	
Rys. 8.23. Układ pomiarowy do badań niewyważenia silnika PM	
Rys. 8.24. Przebieg prędkości drgań wyważonego silnika PM	114
Rys. 8.25. Przebieg prędkości drgań niewyważonego silnika PM	114
Rys. 8.26. Przebieg pradu biegu jałowego przy wyważeniu oraz niewyważeniu	
Rys. 8.27. Widmo pradu biegu jałowego maszyny wyważonej	115
Rys. 8.28. Widmo pradu biegu jałowego maszyny niewyważonej	115
Rys. 8.29. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	116
Rys. 8.30. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej	116
Rys. 8.31. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny niewyważonej	
Rys. 8.32. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	117
Rys. 8.33. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej	117
Rys. 8.34. Widmo napiecia fazowego maszyny niewyważonej	
Rys. 8.35. Przebieg momentu wyważonego i niewyważonego silnika PM	
Rys. 8.36. Przebieg prędkości drgań wyważonego silnika PM	119
Rys. 8.37. Przebieg prędkości drgań niewyważonego silnika PM	119
Rys. 8.38. Przebieg prądu obciążenia przy wyważeniu oraz niewyważeniu	
Rys. 8.39. Widmo prądu obciążenia maszyny wyważonej	120
Rys. 8.40. Widmo prądu obciążenia maszyny niewyważonej	120
Rys. 8.41. Przebieg napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	121
Rys. 8.42. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny wyważonej	121
Rys. 8.43. Widmo napięcia międzyfazowego maszyny niewyważonej	121
Rys. 8.44. Przebieg napięcia fazowego maszyny wyważonej oraz przy niewyważeniu	
Rys. 8.45. Widmo napięcia fazowego maszyny wyważonej	
Rys. 8.46. Widmo napięcia fazowego maszyny niewyważonej	123

## Spis tabel

Tabela 1.1. Dopuszczalne wartości współczynnika szczytu	8
Tabela 2.1. Parametry generatorów z magnesami trwałymi	21
Tabela 2.2. Parametry silników z magnesami trwałymi	.21
Tabela 4.1. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	35
Tabela 4.2. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych	.36
Tabela 5.1. Porównanie wartości momentu przy symetrii i asymetrii obciążenia	.38
Tabela 5.2. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych	. 39
Tabela 5.3. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych dla poszczególnych składowych	. 39
Tabela 5.4. Wartości skuteczne napięć fazowych dla poszczególnych składowych	.40
Tabela 5.5. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań przy symetrii i asymetrii obciążenia	.42
Tabela 5.6. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych	43
Tabela 5.7. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych dla poszczególnych składowych	.44
Tabela 5.8. Wartości skuteczne napięć fazowych dla poszczególnych składowych	.45
Tabela 5.9. Składowe charakterystyczne dla niesymetrycznego obciążenia generatora PM	46
Tabela 5.10. Wpływ stopnia asymetrii na widmo częstotliwościowe prądu	.46
Tabela 6.1. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii zasilania	.48
Tabela 6.2. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla poszczególnych składowych	. 49
Tabela 6.3. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	50
Tabela 6.4. Wartości skuteczne napieć fazowych dla poszczególnych składowych	51
Tabela 6.5. Moment i prędkość drgań przy symetrii i asymetrii zasilania	.52
Tabela 6.6. Wartości skuteczne prądu dla poszczególnych składowych	.53
Tabela 6.7. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	. 54
Tabela 6.8. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych	. 55
Tabela 6.9. Niesymetryczne zasilanie silnika PM pracującego na biegu jałowym	. 56
Tabela 6.10. Niesymetryczne zasilanie silnika PM pracującego w stanie obciążenia	. 56
Tabela 7.1. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia międzyfazowego przy biegu jałowym	58
Tabela 7.2. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia międzyfazowego przy biegu jałowym	. 59
Tabela 7.3. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia fazowego przy biegu jałowym	.60
Tabela 7.4. Wartości skuteczne kolejnych składowych napięcia fazowego przy biegu jałowym	61
Tabela 7.5. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej	62
Tabela 7.6. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej	.63
Tabela 7.7. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	. 64
Tabela 7.8. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	.65
Tabela 7.9. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrycznej szczeliny powietrznej maszyny PM	.66
Tabela 7.10. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrycznej szczeliny powietrznej maszyny PM	67
Tabela 7.11. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji	.68
Tabela 7.12. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji	. 69
Tabela 7.13. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej	.70
Tabela 7.14. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych	.71
Tabela 7.15. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	.73
Tabela 7.16. Porównanie wartości momentu i prędkości drgań	.74
Tabela 7.17. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	.75
Tabela 7.18. Składowe napięcia międzyfazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej	.77
Tabela 7.19. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej	. 78
Tabela 7.20. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych	. 79
Tabela 7.21. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych	80
Tabela 7.22. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	81
Tabela 7.23. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	. 82
Tabela 7.24. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej.	83
Tabela 7.25. Porównanie wartości momentu przy symetrycznej oraz asymetrycznej szczelinie powietrznej.	84
Tabela 7.26. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	86
Tabela 7.27. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrii szczeliny powietrznej	87
Tabela 7.28. Składowe napięcia międzyfazowego dla niesymetrii szczeliny powietrznej maszyny PM	88
Tabela 7.29. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji	.89
Tabela 7.30. Składowe napięcia fazowego dla asymetrii szczeliny powietrznej – wyniki symulacji	.90
Tabela 7.31. Porównanie wartości prędkości drgań przy symetrii i asymetrii szczeliny powietrznej	.92
Tabala 7.22 Wartaáai skutaazna pradu biggu jalawaga dla paszazagálnyah składowych	
Tabela 7.52. Waltosci skuleczne prądu biegu jałowego dla poszczegolnych składowych	.93

Tabela 7.34. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	96
Tabela 7.35. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań	97
Tabela 7.36. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	99
Tabela 7.37. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	. 100
Tabela 7.38. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	. 102
Tabela 7.39. Asymetryczny rozkład szczeliny powietrznej generatora PM na biegu jałowym	. 102
Tabela 7.40. Asymetryczny rozkład szczeliny powietrznej generatora PM w stanie obciążenia	103
Tabela 7.41. Niesymetryczny rozkład szczeliny powietrznej silnika PM pracującego na biegu jałowym	. 103
Tabela 7.42. Niesymetryczny rozkład szczeliny powietrznej silnika PM pracującego w stanie obciążenia	. 103
Tabela 8.1. Porównanie wartości prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM	105
Tabela 8.2. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego biegu jałowego poszczególnych składowych	106
Tabela 8.3. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	, 108
Tabela 8.4. Wartości momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego generatora PM	. 109
Tabela 8.5. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	. 110
Tabela 8.6. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	. 111
Tabela 8.7. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych	. 113
Tabela 8.8. Porównanie wartości prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM	. 114
Tabela 8.9. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla poszczególnych składowych	. 115
Tabela 8.10. Składowe napięcia międzyfazowego charakterystyczne dla niewyważenia maszyny PM	. 117
Tabela 8.11. Wartości skuteczne napięcia fazowego biegu jałowego dla poszczególnych składowych	. 118
Tabela 8.12. Wartości momentu oraz prędkości drgań wyważonego i niewyważonego silnika PM	. 119
Tabela 8.13. Wartości skuteczne prądu obciążenia dla poszczególnych składowych	. 120
Tabela 8.14. Wartości skuteczne napięcia międzyfazowego dla poszczególnych składowych	. 122
Tabela 8.15. Wartości skuteczne napięcia fazowego dla poszczególnych składowych	. 123
Tabela 8.16. Niewyważenie generatora PM pracującego na biegu jałowym	. 124
Tabela 8.17. Niewyważenie generatora PM pracującego w stanie obciążenia	. 124
Tabela 8.18. Niewyważenie silnika PM pracującego na biegu jałowym	.124
Tabela 8.19. Niewyważenie silnika PM pracującego w stanie obciążenia	. 124

### Bibliografia

- [1] W. R. Finley, M. M. Hodowanec, i W. G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems", *IEEE Transaction on Industry Applications.*, t. 36, nr 5, ss. 1467–1480, 2000.
- [2] S. Szymaniec, "Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych", Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 82/2009, ss. 117–122, 2009.
- [3] PN-EN 60034-14:2004, "Maszyny elektryczne wirujące Część 14: Drgania mechaniczne określonych maszyn o wzniosach osi wału 56 mm i większych - Pomiar, ocena i wartości graniczne intensywności drgań".
- [4] ISO 10816-3:2009, "Mechanical vibration Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts -Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in Situ by British Standards Institution".
- [5] S. Szymaniec, Politechnika Opolska, i Oficyna Wydawnicza, Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2013.
- [6] L. Zhen, H. Zhengjia, Z. Yanyang, i C. Xuefeng, "Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme", *Mathematics and Computers Simulation*, t. 79, nr 3, ss. 318–338, 2008.
- [7] M. Klimowski, "Diagnostyka łożysk tocznych silników elektrycznych przy wykorzystaniu metody analizy częstotliwościowej oraz metody detekcji obwiedni", Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 2/2014, ss. 157–163, 2014.
- [8] J. Morel i P. Krzyworzeka, *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, 1992.
- [9] L. Lundström, R. Gustavsson, J.-O. Aidanpaa, N. Dahlback, i M. Leijon, "Influence on the stability of generator rotors due to radial and tangential magnetic pull force", *IET Electric Power Applications*, t. 1, nr 1, s. 1, 2007.
- [10] D. Guo, F. Chu, i D. Chen, "The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor", *Journal of Sound and Vibration*, t. 254, nr 2, ss. 297–312, 2002.
- [11] Z. Goryca, M. Ziółek, i M. Malinowski, "Moment zaczepowy wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi", Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 88/2010, ss. 53–56, 2010.
- [12] M. Damian, "Wpływ ekscentryczności wirnika oraz rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny generatora wielobiegunowego wolnoobrotowego", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 02/2014, ss. 221–224, 2014.
- [13] A. Kostowski i M. Obodziński, "Obliczanie sił naciągu magnetycznego w maszynach asynchronicznych", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1982, ss. 23–25, 1982.
- [14] M. Dąbrowski, Konstrukcja maszyn elektrycznych. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 1977.
- [15] M. Michon, R. C. Holehouse, K. Atallah, i G. Johnstone, "Effect of Rotor Eccentricity in Large Synchronous Machines", *IEEE Transaction on Magnetics*, t. 50, nr 11, ss. 1–4, 2014.
- [16] R. Łączkowski, Wibroakustyka maszyn i urządzeń. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1983.
- [17] M. Barański i T. Jarek, "Analysis of PMSM vibrations based on back-EMF measurements", Materiały konferencyjne ICEM 2014, IEEE, ss. 1492–1495, 2014.
- [18] M. Barański, "Diagnostyka drganiowa generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi nowa metoda wykrywania drgań spowodowanych niewyważeniem", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 06/2014, ss. 236–239, 2014.
- [19] O. Wallmark, "Control of permanent magnet synchronous machines in automotive applications", Chalmers University of Technology, Sweden, 2006.
- [20] J. R. B. A. Monteiro, A. A. Oliveira, M. L. Aguiar, i E. R. Sanagiotti, "Electromagnetic torque ripple and copper losses reduction in permanent magnet synchronous machines", *International Transactions* on *Electrical Energy Systems*, t. 22, nr 5, ss. 627–644, 2012.
- [21] P. Pillay i R. Krishnan, "Modeling of permanent magnet motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 35, nr 4, ss. 537–541, 1988.
- [22] Enrique L. Carrillo Arroyo, "Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system", University of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2006.
- [23] B.-G. Park, R.-Y. Kim, i D.-S. Hyun, "Open Circuit Fault Diagnosis Using Stator Resistance Variation for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", *Journal of Power Electronics.*, t. 13, nr 6, ss. 985–990, 2013.
- [24] K. H. Nam, AC motor control and electric vehicle applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [25] M. Barański i T. Glinka, "Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi", P.411942, 2017.

- [26] M. Barański, "Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem - analiza sygnałów własnych", *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 11, ss. 245–249, 2015.
- [27] M. Barański, T. Glinka, B. Będkowski, i A. Białas, "Tarcza łożyskowa maszyny elektrycznej do stanowiska badawczego", PAT.225062.
- [28] M. Barański i B. Będkowski, "Electrical machine with permanent magnets as a vibration sensor A test stand model", Materiały konferencyjne ICEM 2014, IEEE, ss. 1590–1593, 2014.
- [29] M. Barański i T. Glinka, "Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych niewywagą w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi", PAT.224901, 2016.
- [30] M. Barański, "New vibration diagnostic method of PM generators and traction motors detecting of vibrations caused by unbalance", Materiały konferencyjne Energycon 2014, IEEE, ss. 28–32, 2014.
- [31] M. Barański, A. Decner, i A. Polak, "Selected diagnostic methods of electrical machines operating in industrial conditions", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, t. 21, nr 5, ss. 2047–2054, 2014.
- [32] M. Barański, "Vibration diagnostic method of permanent magnets generators detecting of vibrations caused by unbalance", Materiały konferencyjne EVER 2014, IEEE, ss. 1–6, 2014.



