

Piotr Błaszczyk, Dominik Wojtaszczyk  
Politechnika Łódzka, Łódź

## ELIMINACJA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH Z SYGNAŁU NAPIĘCIOWEGO W GENERATORACH WOLNOOBROTOWYCH

### ELIMINATION THE HIGHER HARMONICS WITH VOLTAGE SIGNAL OF THE LOW-SPEED GENERATOR

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono sposoby eliminacji wyższych harmoniczných z sygnału napięciowego generatora wolnoobrotowego przeznaczonego do stosowania w elektrowniach wiatrowych. Pokazano wyniki obliczeń poszczególnych składowych harmoniczných w modelu polowym generatora wzbudzanego magnesami trwałymi przy połączeniu uzwojenia trójwarstwowego w gwiazdę i w trójkąt. Zaprezentowano także, w jaki sposób stosowanie skosu żłobkowego wpływa na ograniczenie współczynnika zawartości harmoniczných w sygnale napięciowym prądnicy.

**Abstract:** The article presents ways to avoid the higher harmonics with voltage signal of the low-speed generator for use in wind turbines. Showing the results of calculation of individual harmonic components in the model field permanent magnet generator induced the combined three-layer windings in star and delta. It also presents how to use slots skew also affects the ratio of harmonic content in the voltage signal generator.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, wyższe harmoniczne, generator wolnoobrotowy

**Keywords:** electrical machines, higher harmonics, low-speed generator

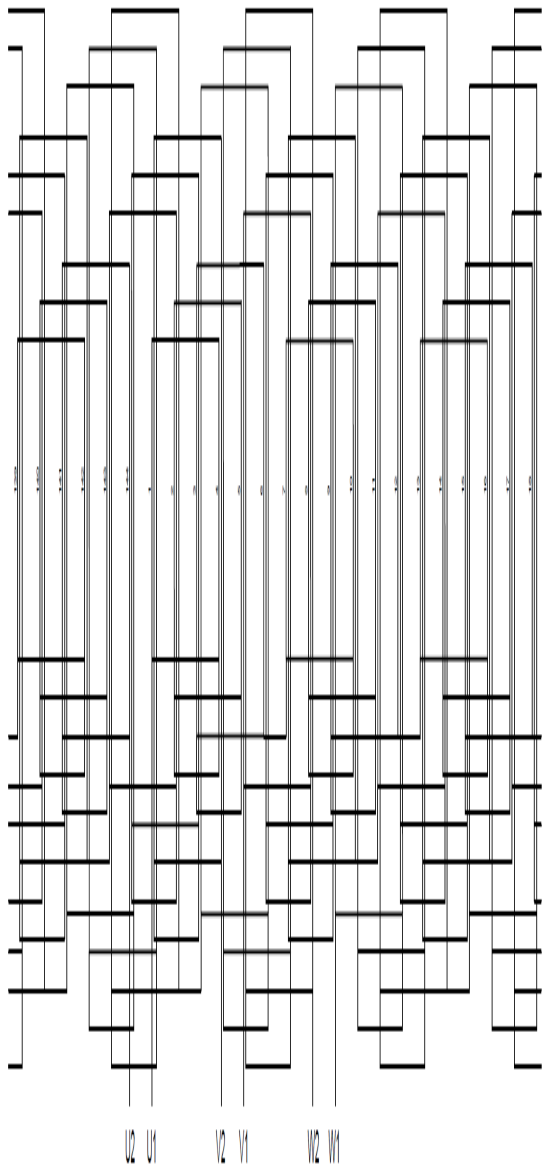
#### 1. Wstęp

Jednym z najczęściej występujących zaburzeń w systemie elektroenergetycznym są wyższe harmoniczne napięć i prądów. Przyczyn powstawania tych zaburzeń można doszukiwać się we wszystkich urządzeniach o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej, wśród których wymienić można wszystkie maszyny elektryczne z rdzeniami magnetycznymi [1]. Zarówno silniki elektryczne, jak i generatory powodują powstawanie wyższych harmoniczných, głównie ze względu na nieliniową charakterystykę magnesowania rdzenia. Inną przyczyną może być również poskok uzwojeń, a także skos żłobkowy, stosowany przede wszystkim w celu eliminacji momentu zaczepowego [4]. W ostatnich latach w miejsce dużych urządzeń przemysłowych o nieliniowej charakterystyce pojawiło się wiele nieliniowych odbiorników komunalnych, których moc jednostkowa jest niewielka, lecz ich duża liczba sprawia, że sumaryczny udział harmoniczných w systemie energetycznym jest znaczący. Z tego powodu koniecznym jest ograniczanie tych zaburzeń w urządzeniach o niewielkiej mocy znamionowej. W niniejszej pracy przedstawione zostały sposoby eliminacji wyższych harmoniczných z sygnału napięciowego w generatorach wolnoobrotowych.

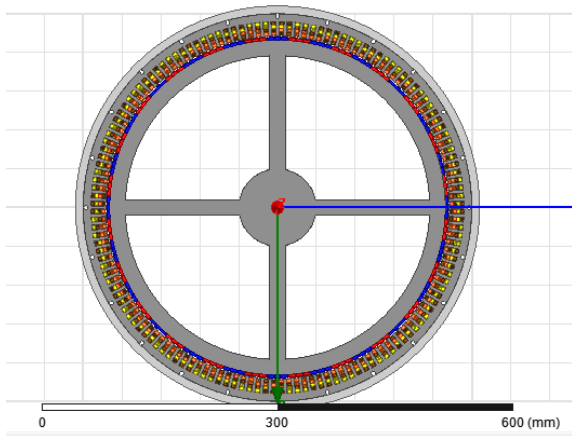
#### 2. Model nołowy generatora

Model polowo-obwodowy generatora wolnoobrotowego zbudowano w programie Maxwell 3D. Wzbudzenie maszyny stanowią magnesy neodymowe typu NdFe35 o indukcji remanencji  $B_r = 1,23$  T i natężeniu koercji magnetycznej  $H_c = 890$  kA/m, umieszczone na powierzchni wirnika. Stojan generatora zbudowano z rdzenia o 144 żłobkach, w których umieszczono uzwojenie trójwarstwowe symetryczne. Schemat zastosowanego uzwojenia przedstawiono na rysunku 1. Podczas badań modelu założono, że generator będzie napędzany z prędkością 50 obr/min, a obciążenie o charakterze rezystancyjnym będzie wymuszało każdorazowo prąd znamionowy dla określonej średnicy drutu nawojowego uzwojenia.

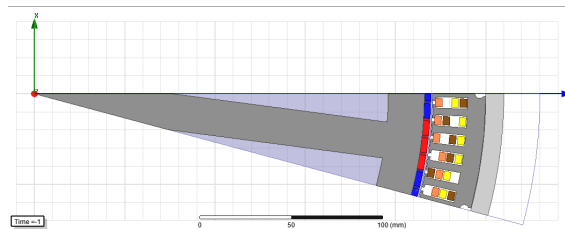
Z powodu znacznej wielkości generatora prowadzenie obliczeń całego modelu jest bardzo czasochłonne, dlatego zdecydowano się na analizę jedynie wycinka stanowiącego 1/48 generatora. Zmniejszenie badanego obiektu jest możliwe ze względu na symetrię, zarówno konstrukcyjną, jak i pod względem występujących zjawisk elektromagnetycznych.



Rys. 1. Schemat uzwojenia generatora wolnoobrotowego



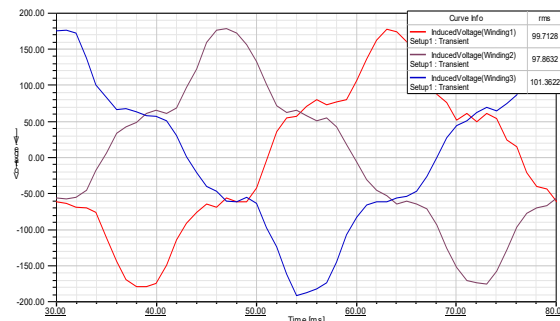
Rys. 2. Model połowy generatora wolnoobrotowego



Rys. 3. Wycinek modelu generatora

### 3. Obliczenia

Punktem wyjścia do rozważań na temat generowania i eliminacji wyższych harmonicznych z sygnału napięciowego generatora jest model prądnicy, której wzbudzenie wykonano w postaci 144 magnesów trwałych rozmieszczonych równomiernie na wirniku, w taki sposób, że trzy sąsiednie magnesy o takiej samej polaryzacji tworzą jeden biegun magnetyczny. Magnesy rozmieszczono tak, żeby nie tworzyły skosu żłobkowego. Uzwojenie generatora o 60 zwojach w każdej cewce wykonano drutem nawojowym o średnicy 1 mm. Uzwojenie tak zbudowanego modelu połączono w gwiazdę. Na rysunku 3 przedstawiono jeden okres przebiegu siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach generatora.



Rys. 4. Przebieg indukowanej sem przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę bez skosu żłobkowego

Przedstawiony przebieg nie jest sinusoidalny. Aby określić jak bardzo różni się od przebiegu sinusoidalnego należy posłużyć się normą PN-E-06000:1972, w której zdefiniowano „praktycznie sinusoidalne napięcie” jako przebieg, którego dowolna wartość chwilowa nie różni się więcej niż 5% od wartości pierwszej harmonicznej. O ile rozkład przebiegu na poszczególne składowe harmoniczne nie stanowi większego problemu, o tyle pomiar wspomnianych różnic w dziedzinie czasu jest praktycznie nie-

możliwy. Z tego powodu powszechnie przyjęto, aby opis odkształcenia dokonywano w dziedzinie częstotliwości posługując się przy tym różnymi współczynnikami liczbowymi. Najprostszym współczynnikiem opisującym odkształcenie przebiegu jest współczynnik udziału n-tej harmonicznej względem składowej podstawowej, definiowany jako:

$$D_{(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \quad (1)$$

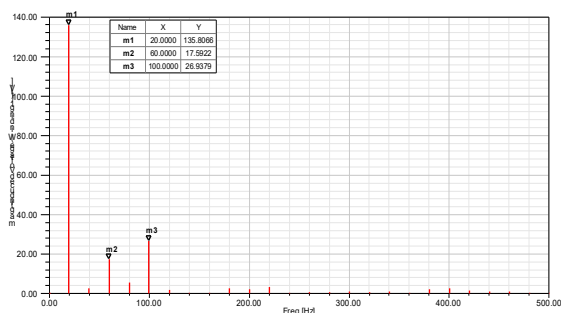
lub współczynnik udziału składowej podstawowej napięcia względem wartości skutecznej napięcia odkształconego:

$$D_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{U} \quad (2)$$

Najchętniej stosowanym i najbardziej miarodajnym współczynnikiem opisującym przebieg odkształcony jest współczynnik zawartości harmonicznych THD definiowany jako iloraz wartości skutecznej harmonicznych do wartości skutecznej składowej podstawowej:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\% \quad (3)$$

Sumuje się najczęściej do składowej 50-tej. Można ograniczyć sumowanie do 25 kolejnych składowych, jeżeli ryzyko wystąpienia rezonansu dla składowych wyższych rzędów jest małe. Przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniach analizowanego generatora przedstawiony na rysunku 4 poddano rozkładowi na wyższe harmoniczne (rys. 5). Z otrzymanego rozkładu wynika, że dominujące są trzecia i piąta harmoniczna.



Rys. 5. Rozkład harmonicznych sem przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę bez skosu żłobkowego

Pierwszym etapem badań modelu prądnicy było sprawdzenie, w jaki sposób skos żłobkowy wpływa na ograniczenie wyższych harmonicznych. Skos zrealizowano poprzez skośne ułożenie magnesów stałych na wirniku prądnicy. Kąt skosu  $\alpha_q$  zmieniano z krokiem  $1,25^\circ$ , co odpowiada połowie podziałki żłobkowej.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 1 wynika, że kąt skosu magnesów ma istotny wpływ na generację wyższych harmonicznych w sygnale napięciowym prądnicy wolnoobrotowej. Na uwagę zasługuje fakt, że stosowanie skosu żłobkowego wpływa na wielkość 5-tej harmonicznej, natomiast nie ma w zasadzie żadnego wpływu na 3-cią harmoniczną. Wraz ze wzrostem kąta skosu 5-ta harmoniczna maleje od 19,8% w stosunku do składowej podstawowej do 3,5% dla kąta  $\alpha_q = 5^\circ$ , co odpowiada podziałce żłobkowej  $\tau = 2$ . Dalsze zwiększanie kąta skosu mogłoby spowodować całkowite wyeliminowanie 5-tej harmonicznej, jednakże nie jest to możliwe, ze względów konstrukcyjnych.

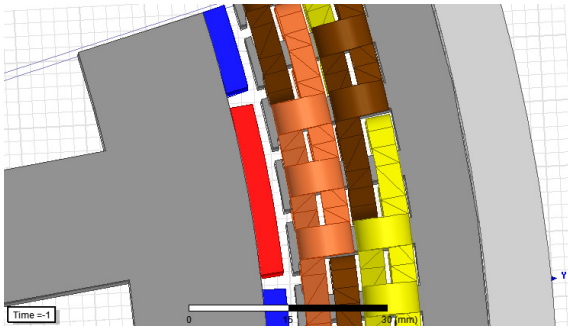
Tab. 1. Wartości współczynników zawartości harmonicznych przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę w funkcji kąta skosu żłobkowego

$\alpha_q$ [°]	$D_{(1)}$	$D_{(3)}$	$D_{(5)}$	THD [%]
0	0,963	0,130	0,198	24,75
1,25	0,965	0,130	0,176	22,89
2,50	0,970	0,134	0,099	19,01
3,75	0,974	0,130	0,035	15,74
5,00	0,968	0,105	0,035	16,50

Zwiększenie skosu powoduje odchylenie końców magnesów od powierzchni wirnika i zwiększenie promienia wirnika, a to z kolei powoduje zmniejszanie szczeliny powietrznej maszyny. Jednym ze sposobów zminimalizowania tego niekorzystnego zjawiska jest stosowanie magnesów, których co najmniej jeden bok będzie zakrzywiony, a jego krzywizna będzie dopasowana do kształtu powierzchni wirnika.

Kolejnym etapem badań było sprawdzenie, czy kształt magnesu ma wpływ na udział wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia generatora. W tej części badań trzy magnesy prostopadłościowe tworzące jeden biegun maszyny, zamieniono na jeden magnes, którego dwie

ściany boczne zakrzywiono tak, aby idealnie przylegały do wirnika (rys. 6).



Rys. 6. Wycinek modelu generatora z magnesami dopasowanymi kształtem do powierzchni wirnika

Wyniki obliczeń współczynników określających zawartość wyższych harmonicznych w sygnale napięciowym generatora z zakrzywionymi magnesami zamieszczono w tabeli 2. Zmiana kształtu magnesów spowodowała zmniejszenie zarówno 3-ciej, jak i 5-tej harmonicznej. Zmniejszenie współczynnika THD w maszynie bez skosu żłobkowego wyniosło prawie 7%. Znacznie mniejsze różnice można zaobserwować w modelu ze skosem żłobkowym.

Tab. 2. Wartości współczynników zawartości harmonicznych przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę i zakrzywionych magnesach w funkcji kąta skosu żłobkowego

$\alpha_q$ [°]	$D_{(1)}$	$D_{(3)}$	$D_{(5)}$	THD [%]
0	0,979	0,106	0,128	17,93
1,25	0,979	0,108	0,107	16,35
2,50	0,980	0,120	0,069	15,42
3,75	0,981	0,104	0,027	14,96
5,00	0,975	0,093	0,028	15,14

Dalszym etapem badań było sprawdzenie, czy układ połączeń uzwojenia trójfazowego generatora ma wpływ na generowanie wyższych harmonicznych w przebiegu indukowanego napięcia.

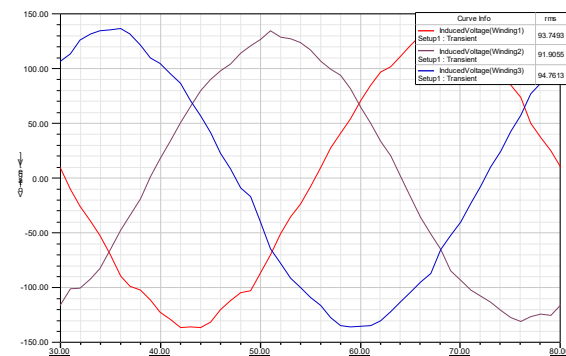
W tabeli 3 przedstawiono jak zmieniają się wartości poszczególnych harmonicznych oraz współczynnika zawartości harmonicznych w zależności od skosu żłobkowego dla połączenia uzwojeń w trójkąt. Porównując wyniki z tabel 1, 2 i 3 zauważyć można, że układ

połączeń uzwojeń wpływa znacząco na wartość 3-ciej harmonicznej. Dla połączenia w trójkąt jej wartość maleje trzykrotnie w stosunku do połączenia uzwojeń w gwiazdę.

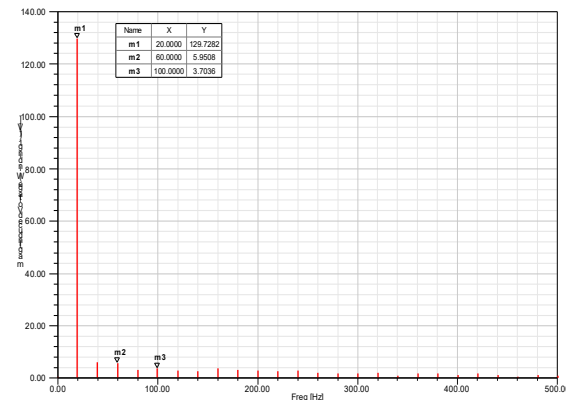
Tab. 3. Wartości współczynników zawartości harmonicznych przy połączeniu uzwojeń w trójkąt i zakrzywionych magnesach w funkcji kąta skosu żłobkowego

$\alpha_q$ [°]	$D_{(1)}$	$D_{(3)}$	$D_{(5)}$	THD [%]
0	0,976	0,004	0,114	12,97
1,25	0,976	0,015	0,082	10,58
2,50	0,978	0,049	0,053	9,35
3,75	0,978	0,046	0,027	8,92
5,00	0,969	0,051	0,026	9,14

Stosując połączenie uzwojeń w trójkąt oraz skos wielkości półtorowej podziałki żłobkowej można znacznie obniżyć zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu generowanego sygnału.



Rys. 7. Przebieg indukowanej sem przy połączeniu uzwojeń w trójkąt ze skosem wielkości półtorowej podziałki żłobkowej



Rys. 8. Rozkład harmonicznych sem przy połączeniu uzwojeń w trójkąt ze skosem wielkości półtorowej podziałki żłobkowej

#### 4. Podsumowanie

W generatorach wolnoobrotowych wzbudzanych magnesami trwałymi poprzez odpowiedni dobór skosu żłobkowego, kształtu magnesu oraz odpowiednie połączenie uzwojeń, można w znacznym stopniu obniżyć generowanie wyższych harmonicznych w przebiegu napięciowym. Skos żłobkowy pozwala ograniczyć występowanie 5-harmonicznej i tym samym w znacznym stopniu zmniejszyć współczynnik THD. Zmniejszenie generacji wyższych harmonicznych można osiągnąć także przez odpowiednie profilowanie kształtu magnesów, lecz z punktu widzenia ekonomicznego jest to nieuzasadnione. Układ połączeń uzwojeń trójfazowych również wpływa na generację wyższych harmonicznych, w szczególności połączenie uzwojeń w trójkąt powoduje znaczne zmniejszenie generacji 3-ciej harmonicznej.

#### 5. Literatura

- [1]. Z. Hanzelka: „Rozważania o jakości energii elektrycznej (IV), Wyższe harmoniczne napięć i prądów”, *Elektroinstalator*, nr 12, str. 10-17, 2001.
- [2]. J. Anuszczyk, P. Błaszczuk, B. Terlecki: „Diagnostyka parametrów elektrycznych elektrowni wiatrowej w procesie wytwarzania energii”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 2, str. 93-99, 2012.
- [3]. P. Błaszczuk, S. Barański: „Metodyka projektowania silników wykonawczych na przykładzie silnika liniowego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 197-200, 2012.
- [4]. P. Błaszczuk: „Rodzaje zakłóceń w pracy silników i urządzeń elektrycznych”, *Nowa Elektrotechnika*, nr 5(69), str. 32-35, 2010.
- [5]. D. Wojtaszczyk: „Metody ograniczania pulsacji momentu elektromagnetycznego prądnicy tarczowej wzbudzonej magnesami trwałymi”, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, nr 83, str. 47-52, 2015.
- [6]. T. Zawilak, M. Gwoździewicz: „Wpływ szerokości magnesu trwałego na właściwości prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi na powierzchni wirnika” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 131-133, 2012.