

Maciej Gwoździewicz, Mariusz Mikołajczak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ZASTOSOWANIE SKOSU STOJANA W JEDNOFAZOWYM SILNIKU SYNCHRONICZNYM Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

APPLICATION OF STATOR SKEW IN SINGLE-PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi ze stojanem prostym oraz ze stojanem skośnym. Porównano właściwości eksploatacyjne silnika dla obydwu rozwiązań konstrukcyjnych.

Abstract: The paper deals with results of experimental investigation of single-phase permanent magnet synchronous motor with skewed stator. Influence of the running capacitor capacitance on the motor running properties was investigated.

Słowa kluczowe: skos, silnik synchroniczny, silnik jednofazowy, magnesy trwałe

Keywords: skew, single-phase motor, synchronous motor, permanent magnet

1. Wstęp

Rosnące zainteresowanie jednofazowymi maszynami synchronicznymi małej mocy z magnesami trwałymi skłania do poszukiwania optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego maszyny, które zagwarantuje uzyskanie najlepszych parametrów pracy. Skos żłobków wirnika w maszynach indukcyjnych małej mocy jest rozwiązaniem stosowanym powszechnie [1]. Dzięki temu, zmniejszeniu ulegają drgania oraz poziom emitowanego hałasu. Zmniejszają się również pulsacje momentu [2]. Ograniczenie drgań oraz emisji hałasu jest istotne ze względu na komfort użytkowania silników. Występujące w stanie jałowym drgania są tym większe, im większa jest wartość pojemności kondensatora pracy. Zjawisko to spowodowane jest przez składową przeciwną wirującego pola magnetycznego [4]. Norma PN-ISO 10816-1:1998 [3] określa sposób wykonania pomiarów średniokwadratowej wartości prędkości drgań, która to jest ściśle związana z energią drgań. W PN-ISO 10816 wyróżnione zostają cztery strefy drgań, których granice określone są przez konkretne wartości liczbowe, zależne od mocy znamionowej maszyny. Wielkości te nie stanowią kryterium, które obowiązuje podczas prób odbiorczych. Szczegółowe wymagania powinny być ustalone w porozumieniu między producentem maszyny a nabywcą. W silnikach PMSM zastosowanie skosu wirnika wiąże się z licznymi problemami natury technologicznej. Nieekonomiczne jest wytwarzanie magnesów trwałych

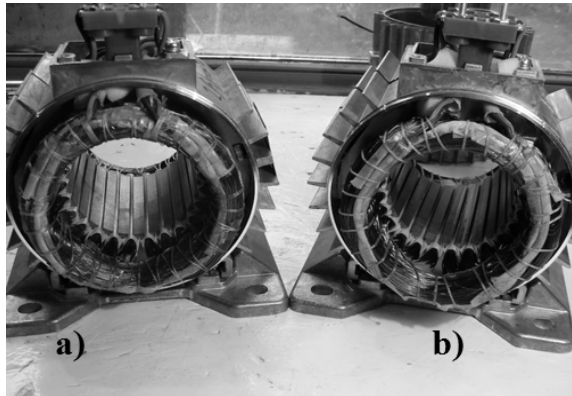
o skomplikowanych kształtach, dlatego polepszenie parametrów pracy uzyskuje się poprzez zastosowanie skosu stojana. Dzięki temu rozwiązaniu ograniczone zostają harmoniczne żłobkowe, które są źródłem wyższych harmonicznych momentu. Przekłada się to na zmniejszenie niekorzystnego zjawiska pulsacji momentu [5]. Celem pracy jest porównanie właściwości eksploatacyjnych jednofazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi ze stojanem prostym oraz ze skośnym stojanem.

2. Konstrukcja badanych maszyn

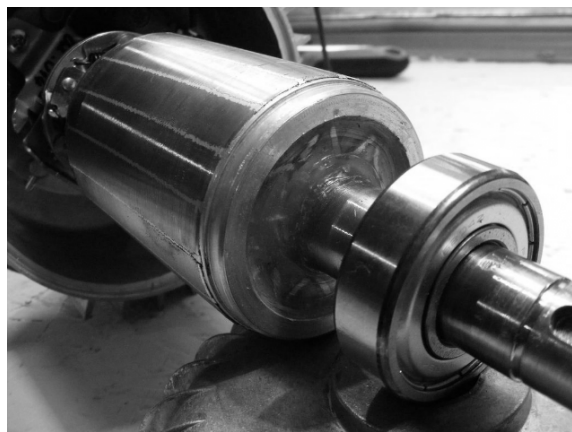
Silniki, które zostały poddane badaniom posiadały identyczny wirnik o jednej parze biegunów ($2p=2$). Magnesy trwałe wykonane zostały z materiału N38SH o indukcji remanencji $B_r=1,24 T$ oraz natężeniu koercji magnetycznej $H_{cb}=990 kA/m$. Uzwojenia pomocnicze badanych maszyn posiadały mniejszą liczbę zwojów oraz zostały wykonane z drutu nawojowego o większym przekroju niż odpowiadające im uzwojenia pomocnicze jednofazowych maszyn indukcyjnych. Zastosowanie większego przekroju miało na celu zachowanie identycznego współczynnika wypełnienia żłobków. Faza główna silników PMSM, które zostały poddane badaniom, wykonana została analogicznie jak faza główna jednofazowych silników indukcyjnych. Skos stojana wynosił jedną podziałkę żłobkową.

Stojany obu silników pokazano na rysunku 1.

Wspólny wirnik obu silników pokazano na rysunku 2.



Rys. 1. Jednofazowy silnik z magnesami trwałymi: a) ze stojanem prostym, b) ze stojanem skośnym



Rys. 2. Wspólny wirnik jednofazowych silników z magnesami trwałymi

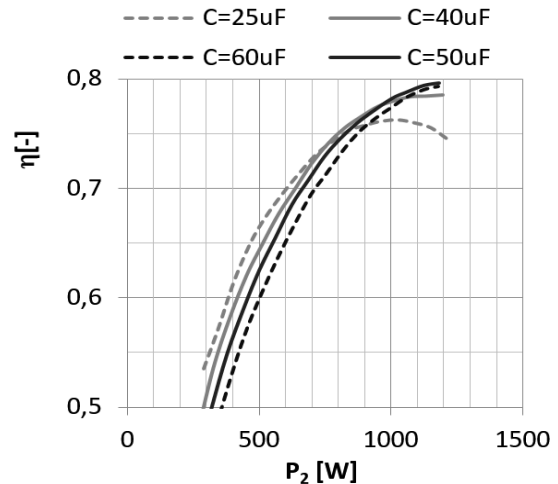
3. Wyniki badań

Zbadano wpływ pojemności kondensatora pracy na przebieg krzywej sprawności silnika. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 3. Dla obciążenia $P_2=1100$ W największa sprawność występuje przy zastosowaniu kondensatora pracy $C_{run}=50 \mu\text{F}$. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg krzywej sprawności dla stojana ze skosem oraz stojana prostego dla optymalnej wartości pojemności $C_{run}=50 \mu\text{F}$.

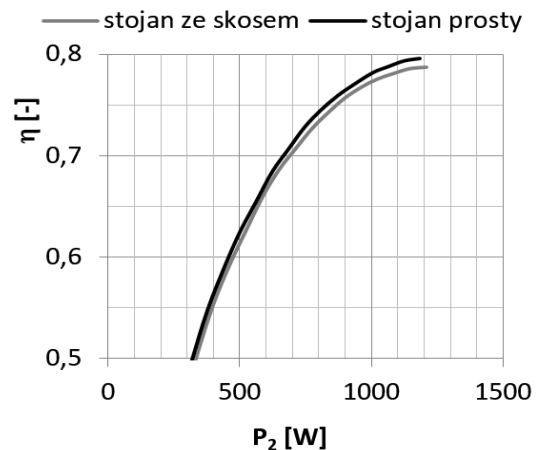
Z otrzymanych wyników 4 badań wynika, że zastosowanie skosu stojana powoduje obniżenie sprawności silnika o wartość ok. (0,5-0,7)%.

W dalszych badaniach przyjęto znamionową moc silnika $P_n=1100$ W oraz zastosowano kondensator pracy $C_{run}=50 \mu\text{F}$.

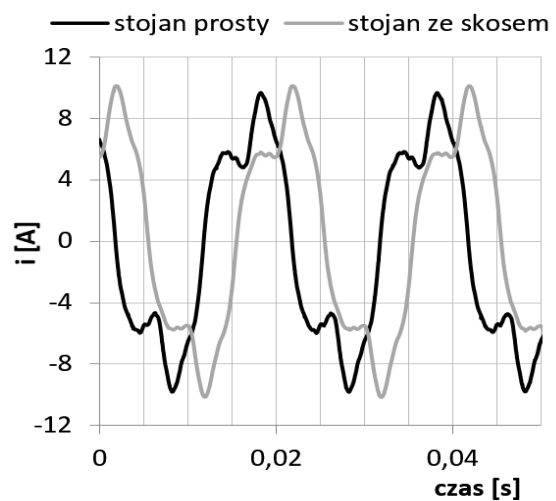
Na rys. 5 przedstawiono przebiegi czasowe prądu pobieranego przez silnik przy obciążeniu znamionowym dla stojana prostego i dla stojana ze skosem.



Rys. 3. Przebieg krzywej sprawności silnika jednofazowego PMSM z stojanem prostym dla różnych pojemności kondensatora pracy



Rys. 4. Przebieg krzywej sprawności silnika jednofazowego PMSM dla stojana prostego oraz stojana ze skosem dla $C_{run}=50 \mu\text{F}$



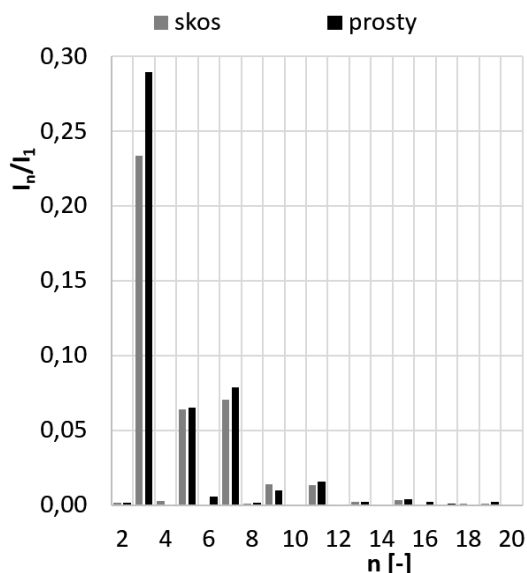
Rys. 5. Przebieg prądu silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym dla obciążenia znamionowego $P_n=1100$ W

Do przedstawionych na rysunku 5 przebiegów zastosowano metodę FFT (*Fast Fourier Transform*) wykorzystując program Matlab. Uzyskane wyniki, liczone w jednostkach względnych (względem pierwszej harmonicznej prądu), przedstawiono na rysunku 6.

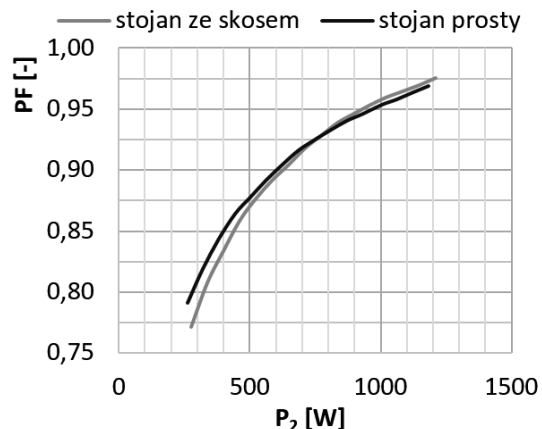
Na rysunku 7 zaprezentowano przebieg współczynnika mocy *PF* (*Power Factor*) dla optymalnej pojemności kondensatora pracy $C_{run}=50 \mu F$.

Z analizy wyników przedstawionych na rysunkach 5, 6 i 7 wynika, że prąd pobierany przez badany silnik ze skosem w stojanie przy obciążeniu znamionowym jest mniej odkształcony (ma większy współczynnik mocy) dla konstrukcji stojana ze skosem. Szczególnie widoczne jest ograniczenie wartości amplitudy trzeciej i siódmej harmonicznej dla stojana skośnego. Dokładność analizy harmonicznego jest zdeterminowana częstotliwością próbkowania sygnału prądu, która wynosiła $f=40 \text{ kHz}$. Z wyników przedstawionych na rysunku 6 wynika, że począwszy od 17 harmonicznej włącznie, wyższe harmoniczne prądu dla obu konstrukcji stojana praktycznie nie występują.

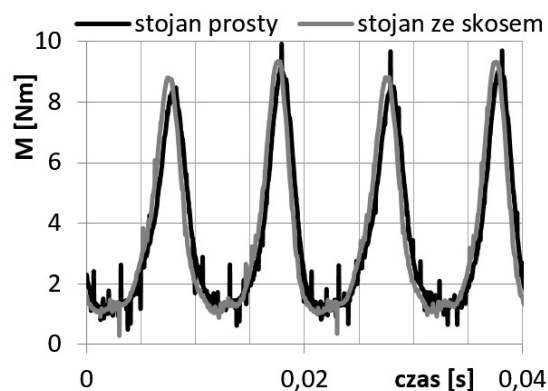
Na rysunkach 8, 9 przedstawiono przebieg momentu oraz składowe harmoniczne momentu dla stojana prostego oraz dla stojana ze skosem.



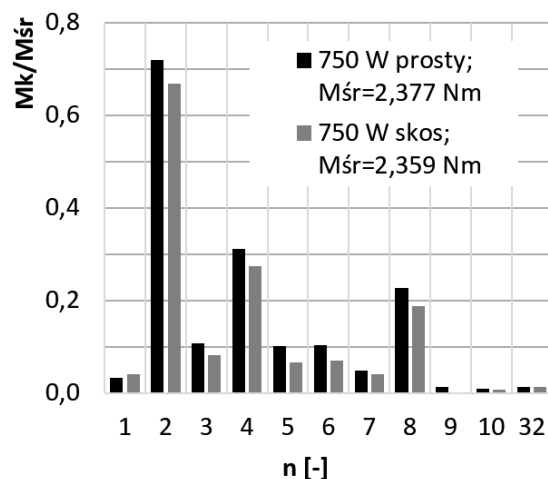
Rys. 6. Widmo harmonicznego prądu pobieranego przez silnik jednofazowy PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym dla obciążenia $P_n=1100W$



Rys. 7. Przebieg współczynnika mocy silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym



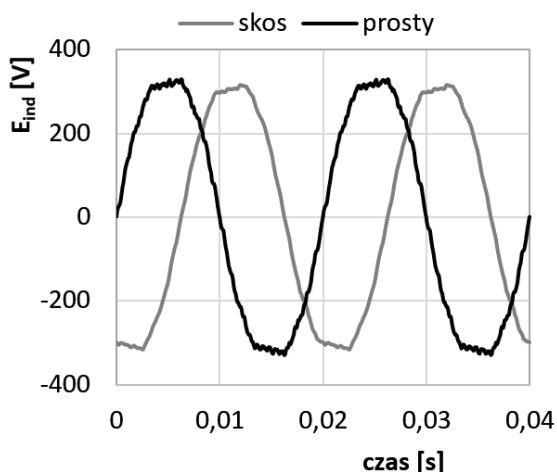
Rys. 8. Przebieg momentu silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym



Rys. 9. Widmo harmonicznego momentu silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym

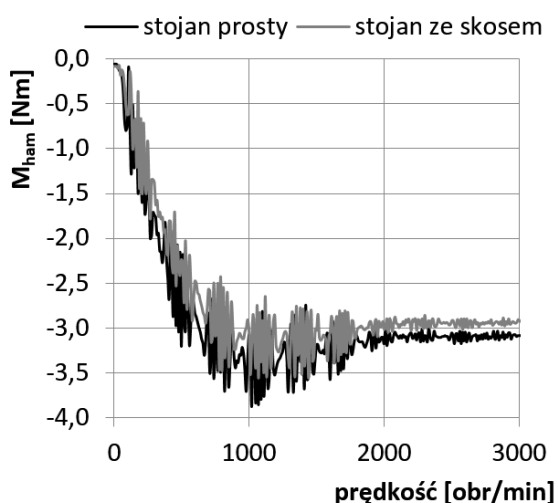
Z otrzymanych wyników przedstawionych na rysunkach 8 i 9 wynika, że zastosowanie skosu stojana powoduje zmniejszenie wyższych harmonicznych momentu, w szczególności harmo-

nicznych parzystych. Podstawowa harmoniczna momentu dla silnika ze stojanem skośnym jest większa w porównaniu do konstrukcji silnika ze stojanem prostym.



Rys. 10. Przebieg indukowanej SEM silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym

Z wyników badań przebiegu indukowanej SEM (rysunek 10) zmierzonej w stanie jałowym w fazie głównej silnika jednofazowego PMSM z kondensatorem pracy $C_{run}=50 \mu\text{F}$ dla stojana prostego i dla stojana ze skosem wynika, że amplituda SEM ulega zmniejszeniu o około 15 V przy zastosowaniu stojana ze skosem. Dodatkowo, przebieg krzywej dla stojana ze skosem jest gładziej. Wskazuje to na mniejszą zawartość wyższych harmonicznych w napięciu.



Rys. 11. Przebieg momentu hamującego silnika jednofazowego PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym

Na rysunku 11 przedstawiono przebieg momentu hamującego w jednofazowym silniku PMSM ze stojanem prostym oraz ze stojanem skośnym przy zwartym uzwojeniu stojana oraz prędkości obrotowej od $n=0$ do $n=n_s$. Z uzyskanych przebiegów wynika, że zastosowanie skosu stojana powoduje zmniejszenie momentu hamującego w stanie ustalonym o około 0,15 Nm. Zmniejszeniu ulega także moment zaczepowy oraz wynikające z niego pulsacje momentu.

Tab. 1. Porównanie emisji drgań silników PMSM ze stojanem prostym i ze stojanem skośnym

stojan	wartość skuteczna prędkości drgań: v [mm/s]					v_{sr} [mm/s]
skos	3,02	2,40	3,00	4,03	3,05	3,10
prosty	4,03	3,80	3,63	4,32	4,03	3,96

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów wartości skutecznej prędkości drgań silników PMSM dla obydwu badanych rozwiązań konstrukcyjnych stojana przy zastosowaniu kondensatora pracy $C_{run}=25 \mu\text{F}$. Badania wykonano przyrządem SVAN 954 zgodnie z zaleceniami normy PN-ISO 10816-1:1998, umieszczając sondę pomiarową na elementach niewirujących nieobciążonej maszyny.

Podczas pomiarów maszyny przytwierdzone zostały do niesprężystego podłoża. Z uzyskanych wyników pomiarów jednoznacznie wynika, że zastosowanie skosu stojana znacznie ogranicza drgania, a tym samym emisję hałasu maszyny. Należy mieć na uwadze, że w stanie jałowym drgania maszyn jednofazowych są większe niż dla stanu obciążenia znamionowego, ze względu na eliptyczne wirujące pole magnetyczne.

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że zastosowanie skosu stojana w jednofazowym silniku synchronicznym PMSM wpływa korzystnie na jego właściwości eksploatacyjne.

5. Literatura

- [1]. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa, Wydaw. Nauk. – Techn., 1988.
- [2]. Antal L., Antal M.: *Pulsacje momentu w silniku indukcyjnym ze skosem żłobków wirnika.*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2009.

- [3]. PN-ISO 10816-1:1998, *Drgania mechaniczne – ocean drgań maszyn na podstawie pomiarów na częściach niewirujących – Wytyczne ogólne*.
- [4]. Gwoździewicz M., Zawilak J.: *Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o liczbie par biegunów $p=3$* , Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2014.
- [5]. Zawilak T., Antal L.: *Pulsacje momentu elektromagnetycznego w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*,

Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych P. Wr. nr 29, Wrocław 2009r.

6. Autorzy

dr inż. Maciej Gwoździewicz

e-mail: maciej.gwozdziewicz@pwr.edu.pl

Mariusz Mikołajczak

e-mail: mariusz.mikolajczak@hushmail.com