

Grzegorz Kłapyta
Politechnika Śląska, Gliwice

KONCEPCJA REDUKCJI PRZEMIENNYCH MOMENTÓW PASOŻYTNICZYCH W SILNIKU INDUKCYJNYM KLATKOWYM POPRZEZ PODZIAŁ WIRNIKA NA WZAJEMNIE SKRĘCONE PODPAKIETY

CONCEPTION OF DECREASING OF PARASITIC SYNCHRONOUS TORQUES IN SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR BY DIVIDING THE ROTOR INTO MUTUALLY BRAIDED SUBROTORS

Abstract: This article presents a new conception for decreasing of parasitic synchronous torques in squirrel-cage induction motor. It is based on well-known method of dividing the rotor into two equal subrotors, mutually braded for specially chosen angle. This method allows for reducing amplitudes of synchronous torques for one chosen synchronic speed. Author suggest to divide the rotor into 2^n equal subrotors also mutually braded. In this way it is possible to reduce parasitic synchronous torques connected with n synchronic speeds. Paper presents principles of operation of rotor divided into subrotors and basics of poliharmonic mathematical model (containing simplifying assumptions). Some simulation results are shown to prove the correctness of the model and the method of reducing the synchronous parasitic torques. Also some measuring results, taken in the laboratory for motor with rotor divided into two braded subrotors are presented.

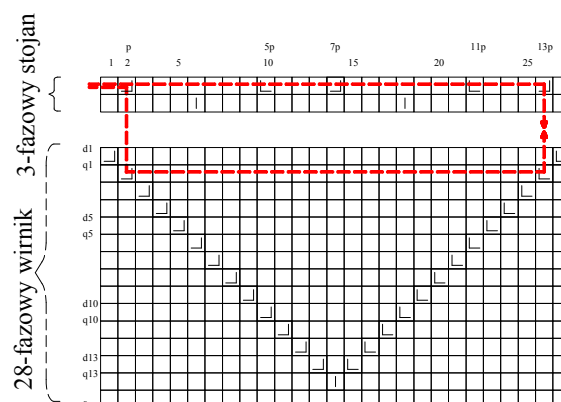
1. Wstęp

Teoria maszyn indukcyjnych i technologia ich wytwarzania zostały już dawno opanowane w stopniu pozwalającym na wykonywanie dobrej jakości silników. Wciąż jednak maszyny takie posiadają pewne wady spowodowane tzw. momentami pasożytniczymi. Objawiają się one wzmożonym hałasem i wibracjami, a także występującymi czasem problemami podczas rozruchu silnika. Od dawna znane są metody ograniczania wpływu momentów pasożytniczych na własności ruchowe maszyn, polegające na odpowiednim doborze wzajemnego stosunku liczby żłobków stojana i wirnika oraz na stosowaniu skośnych żłobków wirnika. Znana jest również metoda podziału wirnika na dwa wzajemnie skręcone względem siebie podpakiety. Praca niniejsza przedstawia rozszerzenie ostatniej z metod przez podział wirnika nie na 2, ale ogólnie na 2^n wzajemnie odpowiednio skręconych podpakietów. Taka konstrukcja wirnika pozwala na zwiększenie możliwości tłumienia pasożytniczych momentów przemiennych (synchronicznych).

2. Zasada tłumienia momentów przez podział wirnika na podpakiety

Momenty pasożytnicze w silniku indukcyjnym powstają wskutek współdziałania wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu po-

wstających w stojanie z podobnymi wyższymi harmonicznymi, powstającymi w wirniku. Momenty przemiennne (synchroniczne) powstają, gdy współtworzące harmoniczne stojana ν i wirnika ρ mają różne rzędy ($\nu \neq \rho$). Graficznie, na schemacie rozkładu maszyny indukcyjnej na maszyny elementarne, obrazuje to prostokąt (rys.1), utworzony przez dwa elementarne stojany i dwa elementarne wirniki leżące w dwóch różnych kolumnach schematu rozkładu: ν -tej i ρ -tej ($\nu \neq \rho$). Mechanizmy generowania pasożytniczych momentów przemiennych przedstawione zostały szczegółowo w pracy [1].



Rys. 1. Przykład generowania momentu $T_{e(2,26)}$ w silniku o $Q_r=28$, $p=2$

Powstały w ten sposób moment elektromagnetyczny ma charakter momentu przemiennego o pulsacji zależnej od prędkości wirowania wirnika Ω_m . Dla jednej, charakterystycznej dla danego momentu, prędkości (zwanej jego prędkością synchroniczną momentu przemiennego Ω_{ms}) moment ten przybiera wartość stałą i staje się momentem synchronicznym. Wartość momentu synchronicznego zależy od kąta ϑ_0 położenia wirnika w chwili wejścia w stan ustalony. Kąt ϑ_0 - poprzez analogię do teorii maszyn synchronicznych - zwany jest też często kątem mocy. Zależność wartości momentu synchronicznego od kąta mocy ϑ_0 jest funkcją sinusoidalną o okresie T_s i nazywa się charakterystyką kątową momentu synchronicznego. Okres T_s tej charakterystyki jest zawsze dzielnikiem podziałki zębkowej α_r , może więc przybierać wartości:

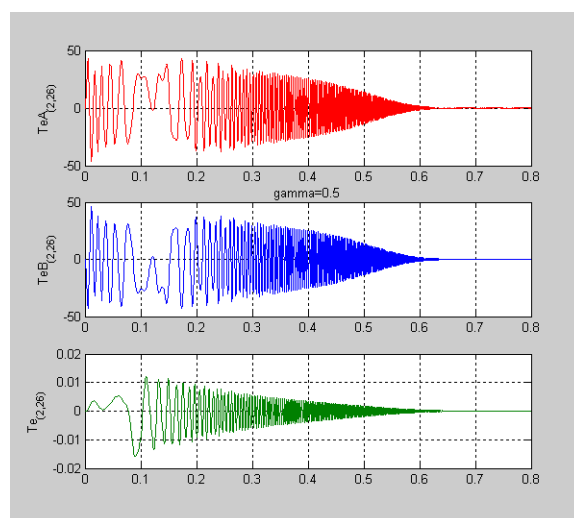
$$T_s = \frac{\alpha_r}{c}, \quad c = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Pierścień zwierający w środku pakietu wirnika dzieli ten wirnik na dwa podpakiety umieszczone na wspólnym wale. Dodatkowo jeśli wprowadzi się wzajemne skręcenie powstałych w ten sposób podpakietów względem siebie o pewien kąt γ_1 , to momenty przemiennie generowane w każdej z połówek wirnika przesunięte będą względem siebie w fazie właśnie o wybrany kąt γ_1 .

Jeśli dobierze się kąt γ_1 równy połowie okresu charakterystyki kątowej T_s wybranego momentu synchronicznego, to powstające w obu podpakietach wirnika momenty będą mieć, w każdej chwili, przeciwne wartości i skompensują się wzajemnie. Dzięki temu wybrany moment synchroniczny zostanie wyłumiony, podobnie jak wszystkie pozostałe o takim samym okresie charakterystyki kątowej, a także wszystkie inne które w obu połówkach wirnika mają przeciwne wartości momentów. Przykładem może być dobór kąta $\gamma_1 = \alpha_r/2$, który powoduje tłumienie momentu o okresie charakterystyki kątowej $T_s = \alpha_r$, ale również $T_s = \alpha_r/3$, $T_s = \alpha_r/9$, $T_s = \alpha_r/27$, itd. Ogólnie wprowadzenie skręcenia $\gamma = \alpha_r/a$ powoduje redukcję momentów o okresie charakterystyki kątowej określonym wzorem:

$$T_s = \frac{\alpha_r}{\frac{a}{2} \cdot c}, \quad c = 3^0, 3^1, 3^2 \dots \quad (2)$$

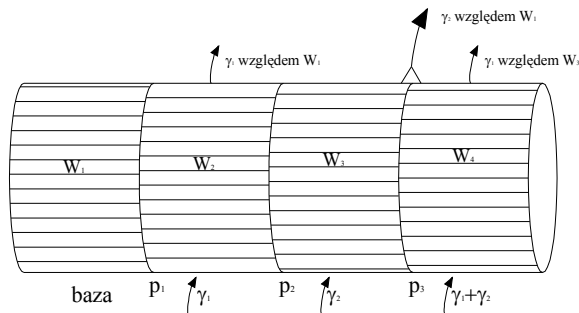
Działanie takie teoretycznie pozwala całkowicie wyeliminować momenty przemiennie o wybranym okresie charakterystyki kątowej (wybranej prędkości synchronicznej), w praktyce zaś umożliwia na znaczne ich ograniczenie. Wyniki badań symulacyjnych, potwierdzających to zjawisko przedstawia rysunek 2 [2]. Wyłumiono moment przemienny $Te_{(2,26)}$ pochodzący od harmonicznych $\nu=2$ i $\rho=26$. $TeA_{(2,26)}$ to moment powstający w pierwszej połowce wirnika, $TeB_{(2,26)}$ odpowiednio – moment powstający w połowce drugiej. Moment wypadkowy $Te_{(2,26)}$ będący sumą geometryczną dwóch powyższych momentów osiąga wartości o kilka rzędów mniejsze.



Rys. 2. Przebiegi czasowe momentów składowych oraz ich sumy

3. Wirnik z 2ⁿ podpakietami

Rozwinięciem idei wirnika podzielonego na dwa wzajemnie skręcone podpakiety jest umieszczenie na wspólnym wale dwóch takich samych (skompensowanych dla wybranej klasy momentów przemiennych) wirników, obróconych względem siebie o kąt γ_2 . Odpowiedni dobór kąta γ_2 umożliwia zredukowanie pasożytniczych momentów przemiennych, o innym okresie charakterystyki kątowej (innej prędkości synchronicznej). W efekcie takiego rozumowania otrzymuje się wirnik podzielony na 4 podpakiety W_1, W_2, W_3, W_4 (z trzema dodatkowymi pierścieniami zwierającymi p_1, p_2, p_3), wzajemnie względem siebie przesunięte o odpowiednio dobrane kąty γ_1, γ_2 (rys.3).



Rys. 3. Wirnik podzielony na cztery podpakiety

Kąt przesunięcia γ_1 pozwala wytlumić momenty przemienne związane z jedną prędkością synchroniczną Ω_{ms1} (jednym okresem charakterystyki kątowej $T_{s1}=2\gamma_1$) w każdej z połówek W_1W_2 i W_3W_4 wirnika. Tak skompensowane połowki skrócone są następnie o kąt γ_2 w celu wytlumienia w całym wirniku momentów przemiennej związanych z drugą (inną) prędkością synchroniczną Ω_{ms2} (okresem charakterystyki kątowej $T_{s2}=2\gamma_2$). W efekcie kolejne podpakiety W_2 , W_3 , W_4 skrócone są względem pakietu bazowego W_1 odpowiednio o kąty γ_1 , γ_2 , $\gamma_1+\gamma_2$.

4. Model matematyczny wirnika z 2^n podpakietami

Poliharmoniczny model matematyczny wirnika z 2^n podpakietami w wirniku sformułowany został przy następujących założeniach:

- żłobki wirnika są proste - bez skosu,
- wszystkie pierścienie wewnętrzne są identyczne,
- szczelina powietrzna jest równomierna i gładka,
- spadek napięcia magnetycznego w rdzeniu maszyny jest pomijalnie mały,
- uzwojenia są symetryczne i rozłożone dyskretnie,
- gęstość prądu wzdłuż wysokości żłobków jest stała (pomija się zjawisko wypierania prądów w prętach klatki wirnika),
- pomija się występowanie prądów wirowych (pakietowanie rdzeni jest idealne),
- w szczelinie występuje tylko składowa promieniowa pola magnetycznego (składowa styczna oraz osiowa są pomijane),

Model taki uwzględnia wyższe harmoniczne przestrzenne przepływu uzwojeń, a pomija wyższe harmoniczne przewodnościowe oraz nasyceniowe.

Należy również podkreślić, że w modelu wszystkie oczka wszystkich podpakietów sprzęgają się elektromagnetycznie, co istotnie wpływa na złożoność modelu.

Do wyprowadzenia równań opisujących model matematyczny posłużono się rozwiniętym schematem elektrycznym wirnika, którego fragment przedstawia rysunek 4. Równania modelu ze względu na ograniczenie objętości artykułu nie zostały tu zamieszczone.

Wszystkie badania symulacyjne i pomiarowe przeprowadzone zostały dla seryjnego silnika typu Sg132S4 produkcji Fabryki Maszyn Elektrycznych S.A. „Indukta” w Bielsku Białej. Silnik ten o mocy $P=5,5$ kW posiada $Q_s=36$ żłobków w stojanie i $Q_r=28$ żłobków w wirniku, oraz $p=2$ pary biegunów. Dominujące momenty pasożytnicze przemienne związane są z pierwszym wierszem schematu rozkładu silnika na maszyny elementarne i występują dla harmonicznych 2, 26, 58, 82, 86, i 110. W związku z tym w modelu symulacyjnym uwzględniono oprócz momentu głównego T_{e2} momenty pasożytnicze zebrane w tabeli 1.

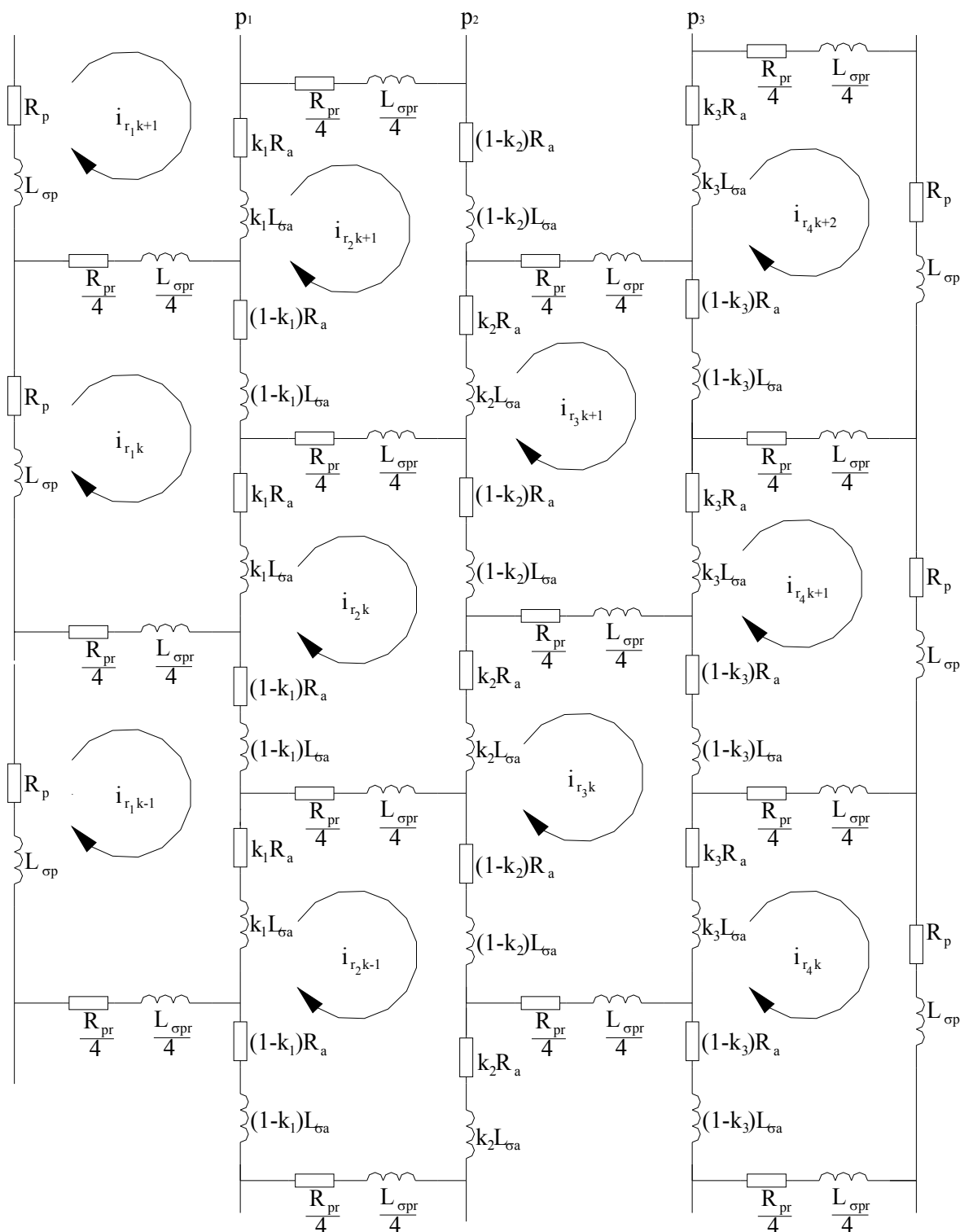
Tab.1.

Momenty pasożytnicze uwzględniane w badanym modelu.

| Moment | $k_{(v,p)}$ | Ω_{ms} [rad/s] | T_s | γ |
|----------------|-------------|-----------------------|--------------|--------------|
| $Te_{(2,110)}$ | 10,37 | 5,61 | $\alpha_r/4$ | $\alpha_r/8$ |
| $Te_{(2,26)}$ | 9,94 | 22,44 | α_r | $\alpha_r/2$ |
| $Te_{(2,58)}$ | 3,63 | -11,22 | $\alpha_r/2$ | $\alpha_r/4$ |
| $Te_{(2,82)}$ | 3,15 | 0 | $\alpha_r/3$ | $\alpha_r/6$ |
| $Te_{(2,86)}$ | 2,45 | 0 | $\alpha_r/3$ | $\alpha_r/6$ |

W tabeli tej dla każdego z momentów określono współczynnik udziału $k_{(v,p)}$ [4] określający znaczenie tego momentu składowego w momencie wypadkowym, prędkość synchroniczną Ω_{ms} , okres charakterystyki kątowej T_s oraz kąt γ skrócenia podpakietów konieczny dla wytlumienia danego momentu.

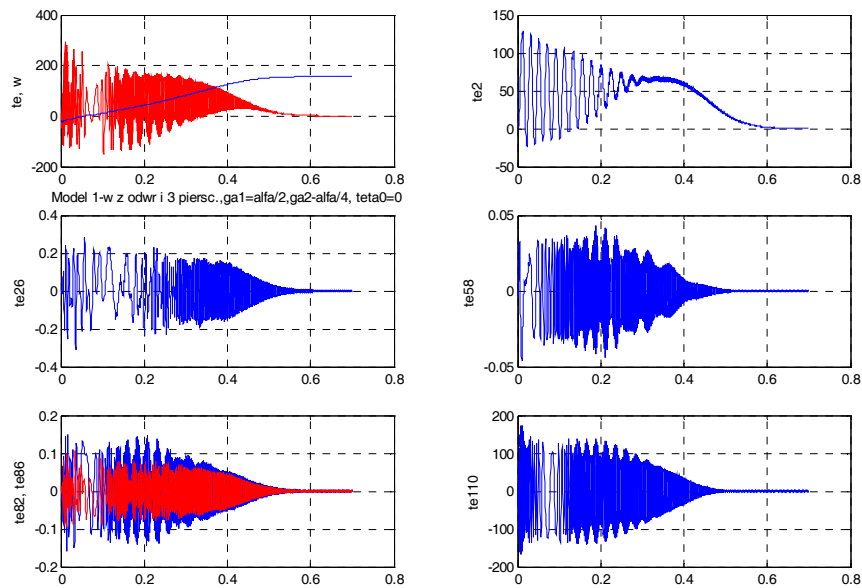
Analizując tabelę, oraz mając na względzie (2) można wykazać, że aby wytlumić wszystkie wybrane momenty należałoby skonstruować wirnik z $2^3=8$ podpakietami. Jednakże dzieląc wirnik już na $2^2=4$ podpakiety można uzyskać wytlumienie czterech z wybranych pięciu dominujących momentów przemiennej.



Rys. 4. Fragment rozwiniętego schematu elektrycznego wirnika

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych modelu z czterema podpakietami (dla różnych kątów wzajemnego skręcenia podpakietów γ_1 i γ_2) zgodne są z opisaną wcześniej zasadą tłumienia momentów przemiennej i potwierdzają symulacyjnie

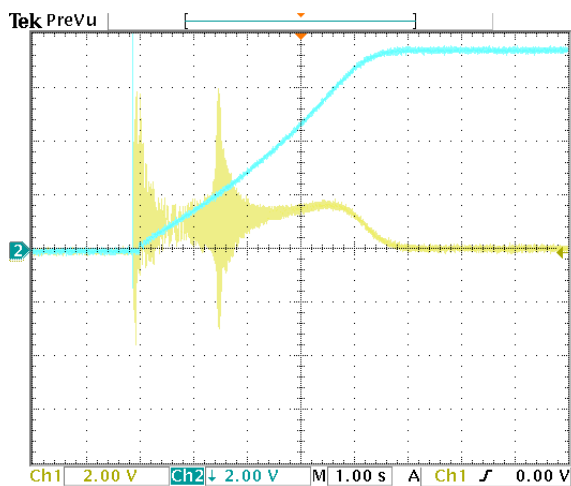
skuteczność proponowanej metody. Przykładowe wyniki symulacji dla kątów $\gamma_1 = \alpha_r/2$, $\gamma_2 = \alpha_r/4$ przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Model czteropakietowy - przebiegi prędkości, momentu wypadkowego i momentów składowych dla $\gamma_1 = \alpha_r/2$, $\gamma_2 = \alpha_r/4$

5. Weryfikacja pomiarowa

Badania pomiarowe potwierdzające skuteczność proponowanej metody zostały przeprowadzone na stanowisku do pomiaru momentów opisanym w [3] umożliwiającym pomiary w stanach statycznych i dynamicznych. Wyniki pomiarów momentu w stanach dynamicznych (Rys.6.) są trudne do zinterpretowania i porównania.

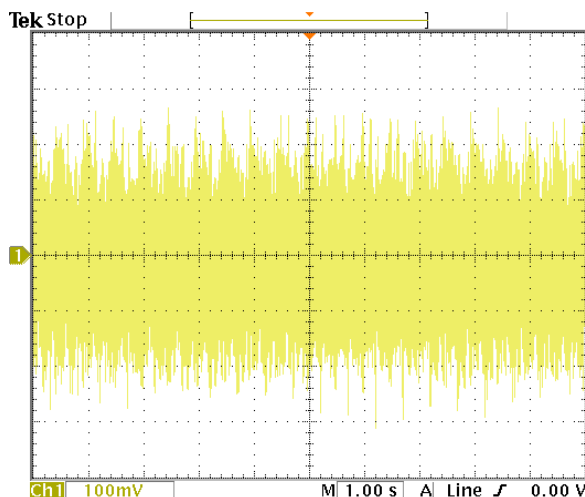


Rys.6. Przykładowy zarejestrowany przebieg momentu i prędkości podczas rozruchu silnika.

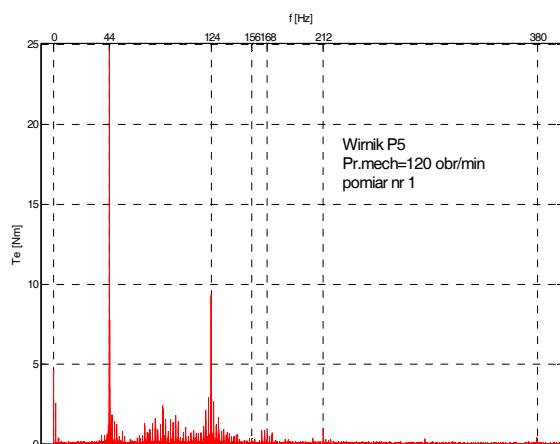
Stąd opracowano metodę umożliwiającą porównanie zawartości poszczególnych składowych momentów synchronicznych w przebiegu wypadkowym momentu dla różnych wersji wirnika. Metoda opiera się na analizie harmonicznej przebiegów momentu (zarejestrowanych w stanach quasi ustalonych) za pomocą

Dyskretnej Transformaty Fouriera (DFT). Tak opracowane wyniki pomiarów pozwalają łatwo wyłuskać z przebiegu momentu informację o zawartości momentów składowych związanych z poszczególnymi prędkościami synchronicznymi.

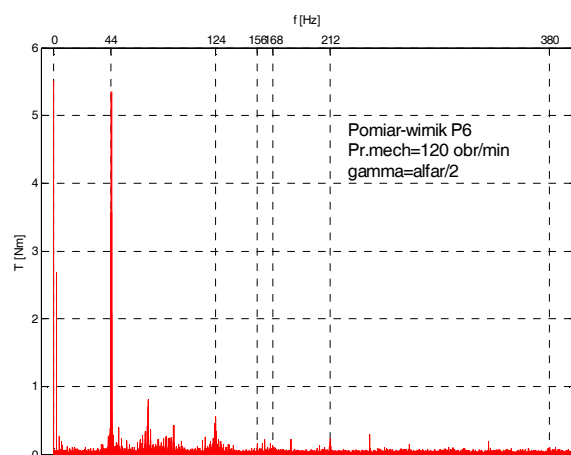
W ramach badań laboratoryjnych przebadano opisany wcześniej silnik Sg132S4 z prototypowymi wirnikami dwupakietowymi o prostych żłobkach i o różnych kątach wzajemnego skrzywienia podpakietów. Prędkość quasi ustaloną uzyskano zasilając silnik napięciem obniżonym za pomocą regulatora napięcia. Przebiegi momentu były rejestrowane przy prędkościach wirnika znacznie mniejszych od znamionowej (w zakresie 90÷300 obr/min), gdyż przy prędkości bliskiej znamionowej momenty pasożytnicze przemienne mają dużo niższe wartości przy znacznie większych pulsacjach. Rysunek 7 przedstawia przebieg momentu w silniku z wirnikiem odniesienia – nie podzielonym na podpakiety, przy prędkości 120 obr/min, zaś rysunek 8 widmo DFT dla tego przebiegu. Rysunek 9 przedstawia widmo DFT dla wirnika dwupakietowego ze skrzywieniem o kąt $\gamma = \alpha_r/2$. Zaznaczone częstotliwości 44 i 124 Hz odpowiadają pulsacjom (dla $\Omega_m = 120$ obr/min) dwóch dominujących momentów – odpowiednio $T_{e(2,26)}$ i $T_{e(2,110)}$. Na rysunku 9 widać, że odpowiedni dobór kąta $\gamma = \alpha_r/2$ spowodował około 5-ciokrotne zmniejszenie amplitudy momentu $T_{e(2,26)}$ (przy częstotliwości 44 Hz).



Rys. 7. Przebieg momentu przy quasi ustalonej prędkości 120 obr/min



Rys.8. Widmo DFT dla $n=120$ obr/min (wirnik bez podziału na podpakiety)



Rys.9. Widmo DFT dla $n=120$ obr/min (wirnik z dwoma podpakietami skreconymi o $\gamma = \alpha_r/2$)

6. Wnioski

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych i pomiarowych wskazują na skuteczność omawianej metody redukcji pasożytniczych momentów synchronicznych za pomocą podziału wirnika na wzajemnie odpowiednio skrecone podpakiety. Wyniki badań pomiarowych wykazują znacznie słabszą redukcję momentów przemiennych w rzeczywistym silniku niż w modelu symulacyjnym. Powodem tego zjawiska mogą być zarówno założenia upraszczające przy formułowaniu modelu jak i niedokładność wykonania prototypów. Niezależnie od tej różnicy i tak uzyskanie kilkukrotnego zredukowania dominujących momentów przemiennych w rzeczywistym silniku ma wpływ na polepszenie własności ruchowych maszyny. Aby w pełni potwierdzić działanie metody podziału na 2^n podpakietów należałoby jeszcze wykonać i zbadać pomiarowo wirniki z czterema podpakietami.

7. Literatura

- [1]. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: *Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach klatkowych*, Prace Sekcji Maszyn Elektrycznych i Transformatatorów Komitetu Elektrotechniki PAN, t.I, PTETiS Warszawa-Gliwice 1993.
- [2]. Kłapyta G.: *Modelowanie trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego z dodatkowym pierścieniem w wirniku przy uwzględnieniu wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu uzwojeń*. V Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie OWD'2003, Itebna-Zaolzie, 2003.
- [3]. Pilch Z., Kłapyta G.: *Stanowisko do pomiaru momentów w silnikach indukcyjnych metodą dynamiczną - zagadnienia projektowe*. Proceedings of XIII Seminar on Electrical Engineering, Itebna Pietraszonka, 28.11-01.12 1999.
- [4]. Trawiński T.: *Wpływ elektromagnetycznych momentów pasożytniczych na własności dynamiczne silników indukcyjnych zasilanych z układów przekształtnikowych*, Rozprawa doktorska, Gliwice 2000

Autor

mgr inż. Grzegorz Kłapyta
 Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,
 Zakład Mechatroniki IETiP
 tel. (032) 237-28-03
 faks (032) 237-12-58
 email: grzegorz.klapyta@polsl.pl

Praca zrealizowana w ramach Grantu KBN nr 3 T10A 010 27