

Janusz Bialik, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

POLE ORAZ MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO DUŻEJ MOCY O PRZEŁĄCZALNYCH UZWOJENIACH

ELECTROMAGNETIC FIELD AND TORQUE OF THE SYNCHRONOUS, LARGE POWER, MOTOR WITH THE SWITCHABLE WINDINGS

Abstract: This article deals with calculation results of a two-speed synchronous, silent-pole, high power motor. Two-speed synchronous motors were built by replacing the stator winding with a switchable winding and connecting the rotor winding to two pairs of slip-rings located on the opposite sides of the machine. By switching the windings, two different but close in value, numbers of pairs of poles are obtained. Thus, two rotating speeds, differing in values by from 10 to 20 percent are obtained. The calculations based on the examined two dimensional, field-circuit model for the large power motor, type GAe 1510/12p were done. This motor is unique in that its field winding may be connected for 8 or 10 poles. Using the prepared model, calculations of static (load) characteristic were compiled. The following physical quantities were calculated: the magnetic field (normal component of the flux density) of the armature and field winding and the resultant magnetic field and the electromagnetic torque, for both rotating speed and two different configuration of field winding (work with 10 and 8 poles).

1. Wstęp

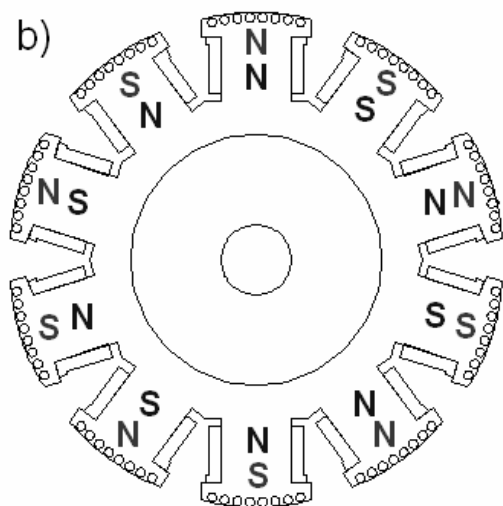
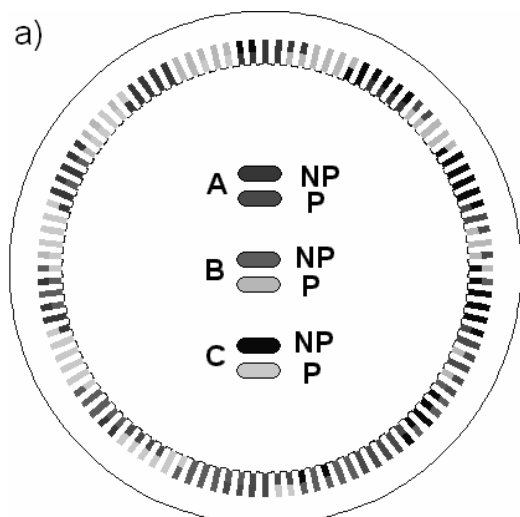
W dwubiegowych silnikach synchronicznych dużej mocy, w zakresie od 600 do 3150 kW, możliwe jest uzyskanie dwóch różnych liczby par biegunów magnetycznych a przez to i dwie różne, różniące się w granicach 10-20 %, prędkości obrotowe. Jest to możliwe poprzez zastosowanie przełączalnych uzwojeń zarówno obwodu twornika, jak i obwodu magneśnicy silnika [1]. Maszyny tego typu od kilku lat z powodzeniem pracują w układach stacji wentylatorów głównego przewietrzania kopalń podziemnych na terenie Polski. W maszynach tego typu dla jednej prędkości obrotowej liczba biegunów fizycznych (np. równa 10) jest inna niż liczba biegunów magnetycznych (która równa jest np. 12). Niesymetria spowodowana wprowadzeniem specjalnych uzwojeń sprawia, że celowe jest zastosowanie analizy polowo-obwodowej do analizy zjawisk w tego typu maszynach. Interesującym przypadkiem jest silnik typu GAe 1510/12p, w którym możliwa jest praca, gdy wzbudzone są tylko dziesięć albo osiem biegunów magneśnicy.

Celem pracy jest określenie pola magnetycznego oraz momentu elektromagnetycznego w różnych stanach pracy na podstawie opracowanego modelu polowo-obwodowego wspomnianej maszyny. W pracy zaprezentowano rezultaty dwubiegowego silnika synchronicznego o

prędkościach obrotowych $n=600$ ($2p=10$) i 500 ($2p=12$) obr/min i odpowiadających im mocach znamionowych $P=1050$ i 600 kW. Obliczenia pól i momentów przeprowadzono dla stanu obciążenia maszyny dla dwóch różnych konfiguracji obwodu wzbudzenia silnika: praca z osmioma oraz dziesięcioma wzbudzonymi biegunami.

2. Model obliczeniowy

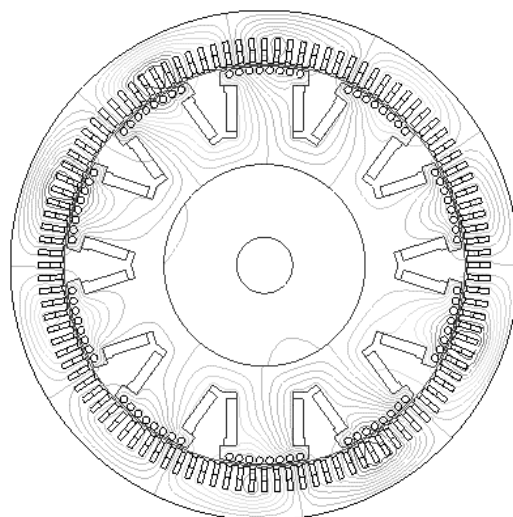
Do analizy zjawisk wybrano dwubiegowy silnik synchroniczny dużej mocy typu GAe 1510-12p, który powstał poprzez modernizację silnika jednobiegowego. Obliczenia przeprowadzono przy pomocy opracowanego dwuwymiarowego, polowo-obwodowego modelu [2]. Silnik ten posiada niekonwencjonalny obwodowy rozkład grup fazowych (rys. 1a) uzwojenia twornika, a zmianę liczby par biegunów magnetycznych uzyskuje się przez zmianę kierunku przepływów P odpowiednich grup w każdym paśmie fazowym A, B, C. W grupach oznaczonych NP przepływy pozostają niezmienione. Odpowiadającą konfigurację uzwojenia magneśnicy przedstawiono na rys. 1b, gdzie kolorem czarnym oznaczono bieguny podczas pracy silnika z większą prędkością (rozkład tradycyjny), a kolorem szarym – z prędkością mniejszą (rozkład niekonwencjonalny).



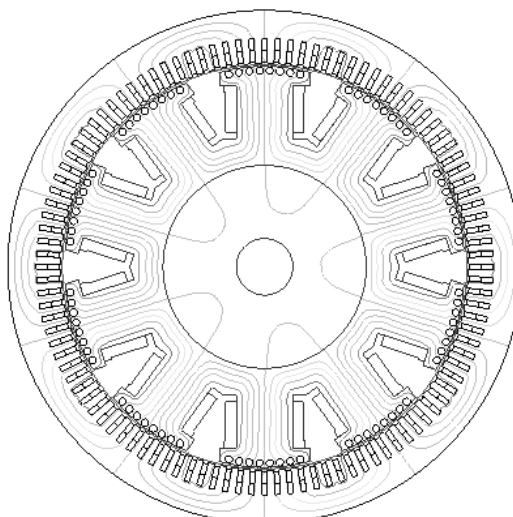
Rys. 1. Schemat obwodowego rozkładu grup fazowych uzwojenia twornika a) oraz biegunowości wirnika b) dla obu prędkości silnika

3. Analiza pola magnetycznego

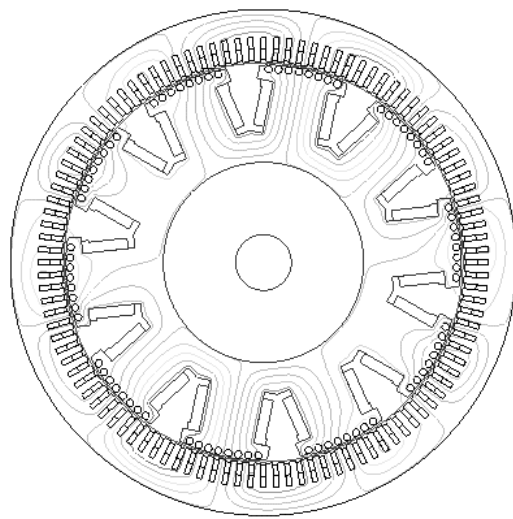
Posługując się pakietem Maxwell 2D, metodą elementów skończonych, wyznaczono rozkłady pól magnetycznych. Przykładowe wyniki obliczeń w postaci rozkładu linii sił pola magnetycznego dla prędkości większej ($2p=10$) pokazano na rys. 2, 3 i dla mniejszej prędkości ($2p=12$) na rys. 4, 5. Na podstawie opracowanego modelu wyznaczono obwodowe rozkłady składowej normalnej indukcji w szczelinie maszyny. Na rys. 6 i 7 przedstawiono obwodowe rozkłady, wraz z harmonicznymi, składowej normalnej indukcji pola twornika w szczelinie. Rozkłady dotyczą obu prędkości obrotowych silnika. Na rys. 6 można zauważyć znaczne odkształcenie obwodowego rozkładu indukcji od sinusoidy dla obu prędkości obrotowej. Odkształcenia indukcji uzasadniają przebiegi prą-



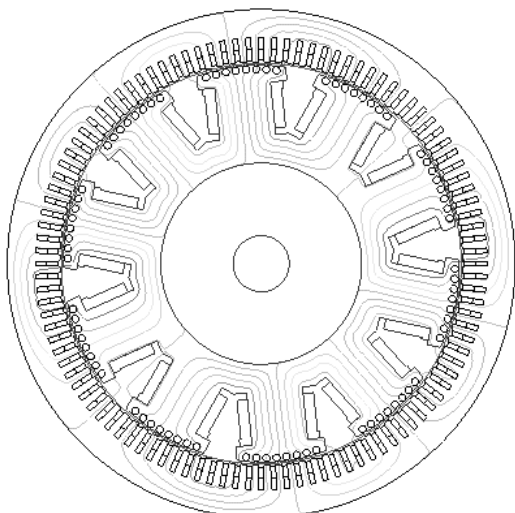
Rys. 2. Linie pola magnetycznego dla większej prędkości obrotowej (pole od twornika)



Rys. 3. Linie pola magnetycznego dla większej prędkości obrotowej (pole od magnetycy) - praca z 10 biegunami

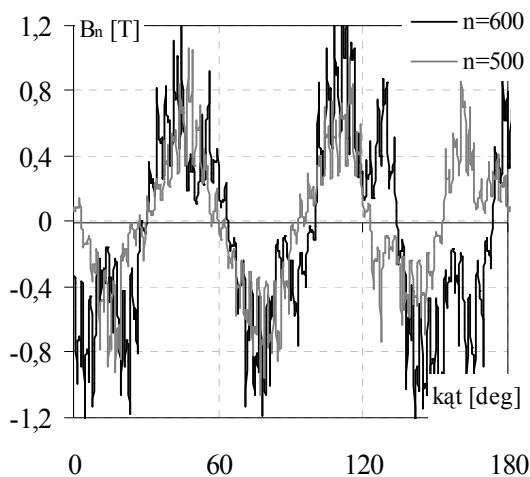


Rys. 4. Linie pola magnetycznego dla mniejszej prędkości obrotowej (pole od twornika)

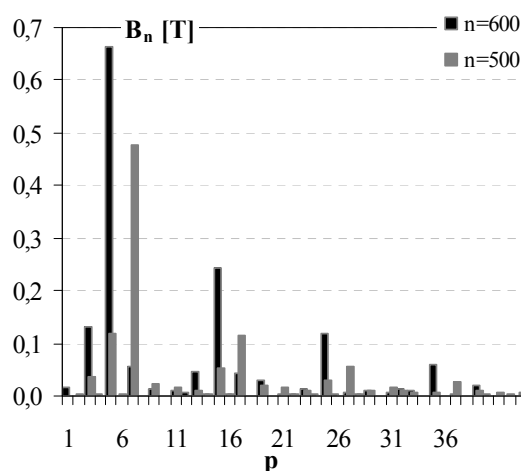


Rys. 5. Linie pola magnetycznego dla mniejszej prędkości obrotowej (pole od magneśnicy) - praca z 10 biegunami

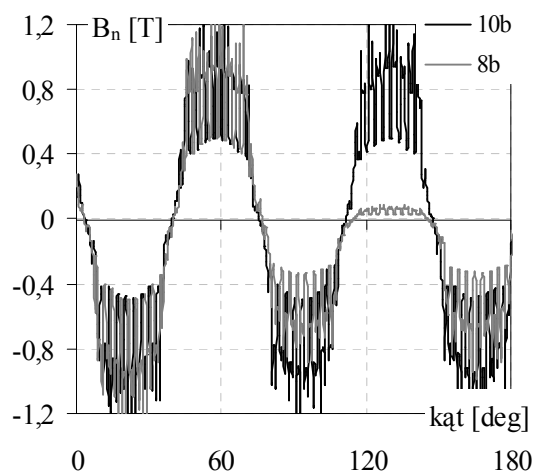
dów stojana [2, 3]. Na rys. 8, 9, 10 oraz 11 przedstawiono rozkłady pola oraz jego analizę harmoniczną dla pola magneśnicy. Wyniki ważne są dla obu prędkości obrotowych wirnika oraz obu konfiguracji magneśnicy: praca z 8-ma oraz 10-cioma biegunami. W przypadku prędkości 500 obr/min wyłączenie dwóch biegunów wirnika powoduje zmniejszenie amplitud harmonicznych pola magnetycznego magneśnicy, pola wypadkowego, prądów oraz sił pochodzenia elektromagnetycznego [3].



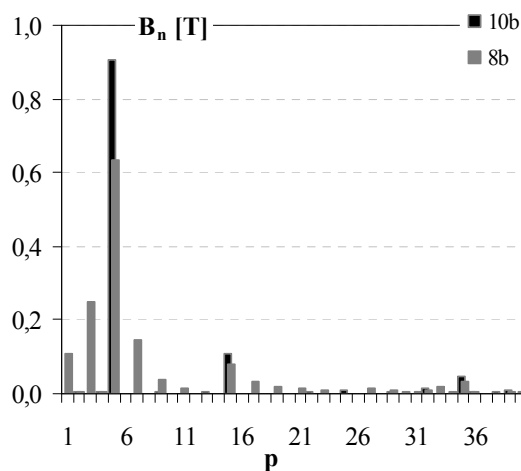
Rys. 6. Składowa normalna indukcji w szczeliny powietrznej dla obu prędkości obrotowych silnika (pole od twornika)



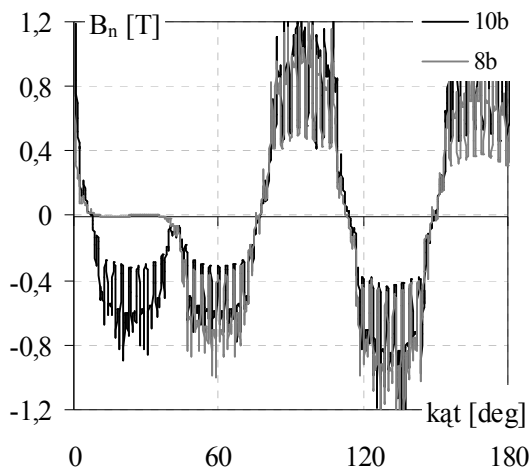
Rys. 7. Widmo składowej normalnej indukcji w szczeliny powietrznej dla obu prędkości obrotowych silnika (pole od twornika)



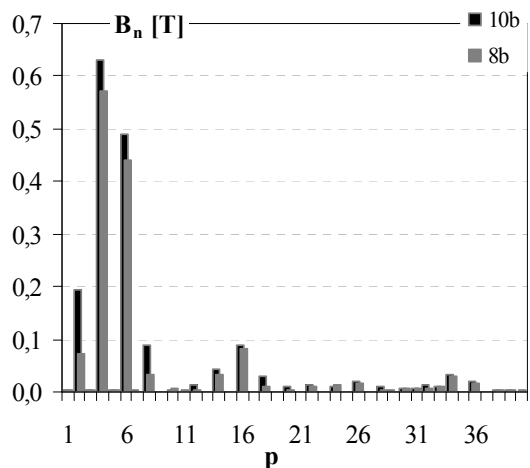
Rys. 8. Składowa normalna indukcji w szczeliny powietrznej dla większej prędkości obrotowej silnika (pole od magneśnicy)



Rys. 9. Widmo składowej normalnej indukcji w szczeliny powietrznej dla większej prędkości obrotowej silnika (pole od magneśnicy)



Rys. 10. Sładowa normalna indukcji w szczelini powietrznej dla mniejszej prędkości obrotowej silnika (pole od magniesnicy)

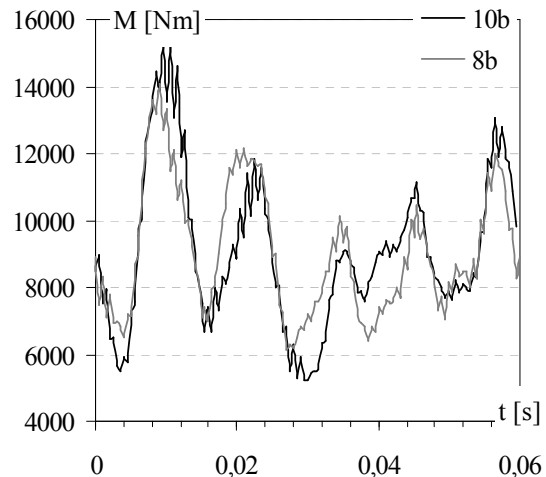


Rys. 11. Widmo składowej normalnej indukcji w szczelini powietrznej dla mniejszej prędkości obrotowej silnika (pole od magniesnicy)

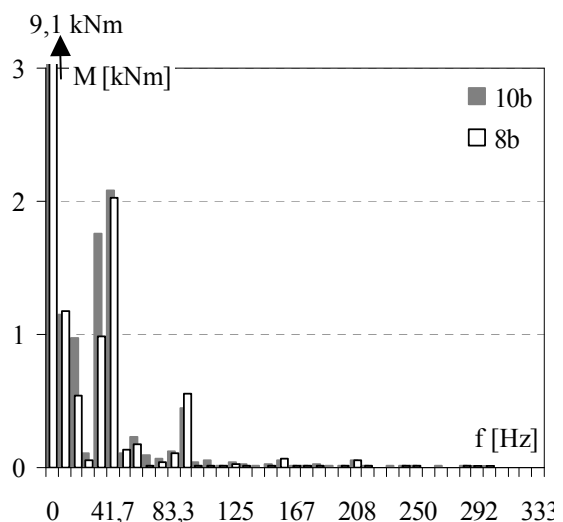
Wyłączenie dwóch biegunów magniesnicy, w przypadku prędkości 600 obr/min, nie tylko zmniejsza amplitudę podstawowej harmonicznej pola, powoduje również pojawienie się dodatkowych harmonicznych, które mają negatywny wpływ na pracę silnika (większe drgania, hałasy itp.) [3].

4. Analiza momentu elektromagnetycznego

Korzystając z tensora naprężeń Maxwell'a [4] wykonano obliczenia momentu elektromagnetycznego badanego silnika. Symulacje przeprowadzono dla stanu obciążenia, dwóch wartości prądu wzbudzenia $I_f=170$ A oraz $I_f=230$ A, oraz dwóch konfiguracji uzwojenia wirnika.



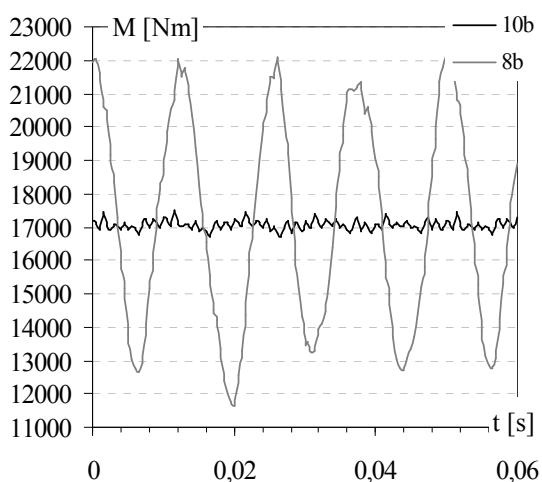
Rys. 12. Moment elektromagnetyczny dla prędkości $n=500$ obr/min oraz dwóch konfiguracji magniesnicy



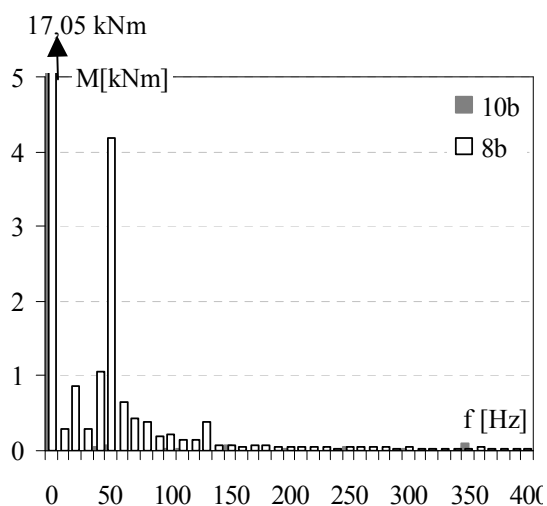
Rys. 13. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=500$ obr/min oraz dwóch konfiguracji magniesnicy

Dla mniejszej prędkości obrotowej zauważyć można w przebiegu momentu elektromagnetycznego, w zakresie do 100 Hz, występowanie harmonicznych o znacznych amplitudach - dominują harmoniczne 8.33, 16.66, 33.32, 41.7 oraz 91.63 Hz. Wyłączenie dwóch biegunów wirnika nie powoduje powstawania dodatkowych harmonicznych, zmieniają się tylko amplitudy niektórych harmonicznych (rys.13, 16 i 17). Dla prędkości 600 obr/min harmoniczne o znaczących wartościach występują w zakresie do 400 Hz. Dominującymi składowymi są: 40, 50, 100, 110, 150, 200, 250, 300, 350 oraz 400 Hz. Zmiana konfiguracji uzwojenia magniesnicy z 10 na 8 biegunów znacznie pogarsza pracę silnika.

W przebiegu momentu elektromagnetycznego silnika pojawia się szereg dodatkowych harmonicznych (rys 15).

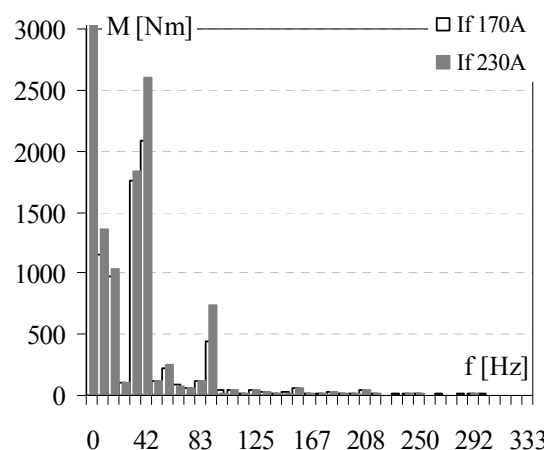


Rys. 14. Moment elektromagnetyczny dla prędkości $n=600$ obr/min oraz dwóch konfiguracji magnesu

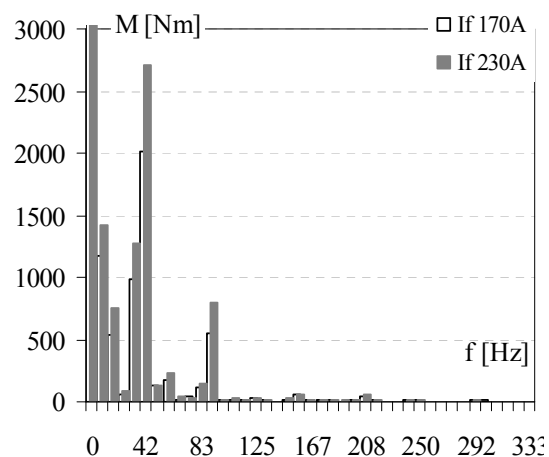


Rys. 15. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=600$ obr/min oraz dwóch konfiguracji magnesu

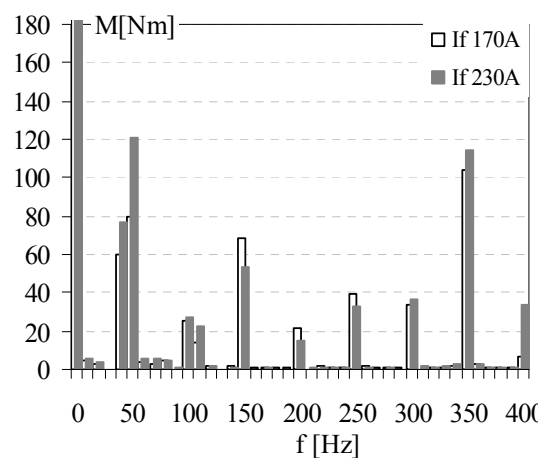
Podobnie jak w przebiegach indukcji magnetycznej amplitudy poszczególnych harmonicznych momentu (czy też składowej stycznej siły pochodzenia elektromagnetycznego) ulegają zmianom ze wzrostem wartości prądu wzbudzenia.



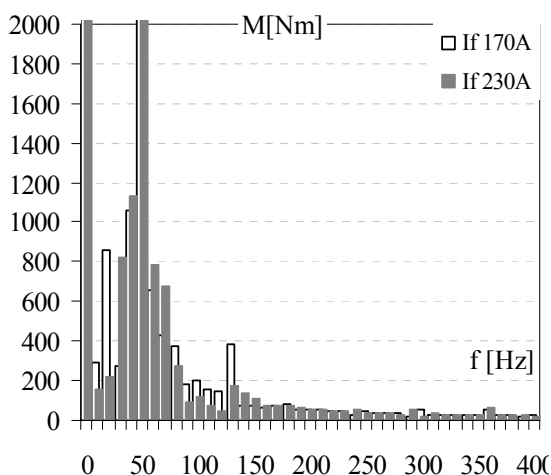
Rys. 16. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=500$ obr/min (praca z 10-ma biegunami magnesu)



Rys. 17. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=500$ obr/min (praca z 8-ma biegunami magnesu)



Rys. 18. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=600$ obr/min (praca z 0-ma biegunami magnesu)



Rys. 19. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego dla prędkości $n=600$ obr/min (praca z 8-ma biegunami magneśnicy)

W celu zwiększenia czytelności rysunków na ostatnich czterech pozycjach (rys. 16, 17, 18 i 19) oś rzędnych została ograniczona.

5. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że wyłączenie dwóch biegunów w obwodzie wirnika powoduje zmniejszenie amplitud harmonicznych pola magnetycznego w szczelinie maszyny, podczas pracy na mniejszej prędkości obrotowej. Rozwiązanie takie niestety jest niekorzystne podczas pracy z większą prędkością obrotową.

6. Literatura

- [1]. Antal L., Zawilak J.,: *Dwubiegowy silnik synchroniczny – aspekty techniczne i ekonomiczne*, Zeszyty Naukowe - Politechnika Śląska nr 1500, Elektryka; z. 176, XXXVII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych. SME 2001, Ustroń-Zawodzie, 19-22 czerwca 2001, pp. 353-360
- [2]. Bialik J., Zawilak J., Antal L.,: *Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24, Wrocław, 2004, s. 43-54
- [3]. Bialik Janusz, Zawilak Jan.,: *Drgania oraz siły pochodzenia elektromagnetycznego w dwubiegowych silnikach synchronicznych dużej mocy*, Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005, 14 - 17 June, Jarnołtówek, s. 308-315,
- [4]. Terra Analysis Company, QuickField Finite Element Analysis System v.5.1, User's Guide, 2004

Autorzy

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław
e-mail: janusz.bialik@pwr.wroc.pl
jan.zawilak@pwr.wroc.pl

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2007 jako projekt badawczy Nr N 510 006 31/034