ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: ELEKTRYKA z. 177 Nr kol. 1501

Komunikat

Jan RUSEK [1)]

PRĄDY I NAPIĘCIA NIEAKTYWNEGO UZWOJENIA SILNIKA INDUKCYJNEGO DWUBIEGOWEGO

Streszczenie. Analizie poddano dwie maszyny indukcyjne dwubiegowe, różniące się jedynie ilością żłobków wirnika: NR = 56 i 60. Każda z maszyn posiada po dwa niezależne uzwojenia stojana. Pierwsze z nich generuje 12 biegunów, co odpowiada prędkości synchronicznej 500 obr/min, a drugie cztery bieguny, co odpowiada prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Obliczenia dla rozruchu z niepełnego rewersu wykonano dla przypadku zasilania uzwojenia dwunastobiegunowego. Na podstawie poliharmonicznego modelu maszyny, uwzględniającego niestałość szczeliny powietrznej (oraz ewentualne pęknięcia prętów klatki), obliczono napięcia na zaciskach uzwojenia nieaktywnego oraz prądy płynące w jego gałęziach równoległych. Nasycenie obwodu magnetycznego uwzględniono jedynie poprzez obliczeniowe powiększenie grubości szczeliny powietrznej oraz pomniejszenie indukcyjności rozproszeń, zwłaszcza w czasie rozruchu.

CURRENTS AND VOLTAGES OF DOUBLE–SPEED INDUCTION MOTOR INACTIVE WINDING

Summary. Two double–speed induction machines differing from each other by the number of rotor teeth: NR = 56 and 60 have been analysed. Either machine has two independent stator windings. The first one generates 12 poles, which secures the synchronous speed of 500 r.p.m., and the other four poles, which secures the synchronous speed of 1500 r.p.m.. Calculations for startup from partial reverse have been performed for the case of supplying the 12–pole winding. Making use of the polyharmonic model of the machine taking into account non uniformity of the air gap (as well as possibly broken bars of the cage), voltages across inactive–winding terminals and currents flowing in its parallel branches have been calculated. Saturation of the magnetic circuit has been taken into account only via fictive magnification of the air-gap thickness and via decrease of leakage inductances, especially during starting.

Key words: double – speed induction motor, currents and voltages in inactive winding.

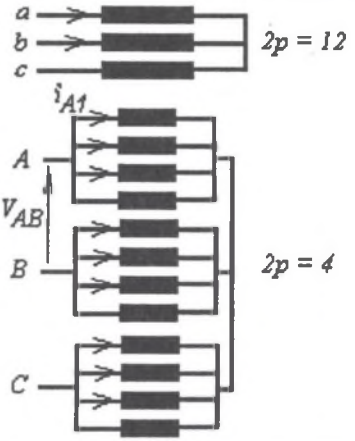
1. WPROWADZENIE

Maszyny indukcyjne dwubiegowe umożliwiają zredukowanie prędkości w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na moc mechaniczną. Dalsze rozważania dotyczą dwóch dwubiegowych maszyn indukcyjnych różniących się ilością żłobków wirnika: NR = 56 i NR = 60. Każda z nich posiada dwa niezależne uzwojenia stojana. Pierwsze z nich generuje pole o dwunastu biegunach, co odpowiada prędkości synchronicznej 500 obr/min, a drugie o czterech biegunach, co odpowiada prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Obliczenia dla rozruchu z niepełnego rewersu wykonano dla przypadku zasilania uzwojenia dwunastobiegunowego. Na uzwojeniu drugim (wtedy nieaktywnym) oczekujemy zerowego napięcia i zerowych prądów w gałęziach równoległych. Zapewnić to winna odpowiednia konfiguracja uzwojenia nieaktywnego w stosunku do uzwojenia aktywnego. Tak jednak jest tylko w przypadku całkowitej symetrii ułożyskowania (braku ekscentryczności) i odpowiednio dobranych liczbach żłóbków stojana i wirnika. W praktyce napięcia fazowe mogą się nie znosić idealnie, co prowadzi do pewnego napięcia na zaciskach także uzwojenia nieaktywnego.

Na podstawie poliharmonicznego modelu maszyny [1,2,3], uwzględniającego niestałość szczeliny powietrznej (oraz ewentualne pęknięcia prętów klatki), obliczono napięcia na zaciskach uzwojenia nieaktywnego (czterobiegunowego) oraz prądy płynące w jego gałęziach równoległych.

[1)] Dr hab. inż., Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Maszyn Elektrycznych, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. (0-12) 6172897, fax (0-12) 6341096, gerusek@cyf-kr.edu.pl

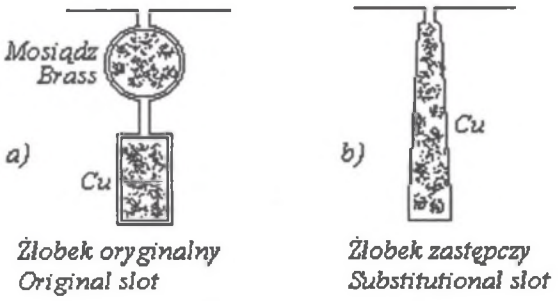
Zasilane jest wtedy uzwojenie dwunastobiegunowe, a silnik wykonuje rozruch z częściowego nawrotu. Nasycenie obwodu magnetycznego uwzględniono poprzez obliczeniowe powiększenie grubości szczeliny powietrznej oraz pomniejszenie indukcyjności rozproszeń, aby prąd rozruchu odpowiadał wartości katalogowej. Na rys. 1. podano schemat połączeń uzwojeń stojana.



Rys. 1. Schemat uzwojeń stojana: zasilane (aktywne) jest uzwojenie 2p = 12, nieaktywne jest uzwojenie 2p = 4
Fig. 1. Schematic diagram of the stator winding: winding 2p = 12 is active (fed), winding 2p = 4 is inactive

Widać z niego, że uzwojenie aktywne nie posiada gałęzi równoległych, natomiast uzwojenie nieaktywne posiada po cztery gałęzie równoległe w każdej fazie. Biorąc pod uwagę połączenie obu uzwojeń w gwiazdę, uzwojenia stojana (nawet w przypadku hipotetycznego zasilania obu uzwojeń) opisywane są poprzez 13 prądów gałęziowych, z których dwa pierwsze są tożsame z prądami fazowymi uzwojenia 2p = 12. Z racji otwartości zacisków uzwojenia 2p = 4 liczba (liniowo niezależnych) prądów opisujących uzwojenia stojana wynosi 11. Przyjęte do obliczeń prądy zaznaczono strzałkami na rys. 1.

Rzeczywiste wirniki obu silników są wyposażone w klatki podwójne. Jednak do celów obliczeniowych klatki te zastąpiono klatkami pojedynczymi z prętami trapezowymi jak na rys. 2.

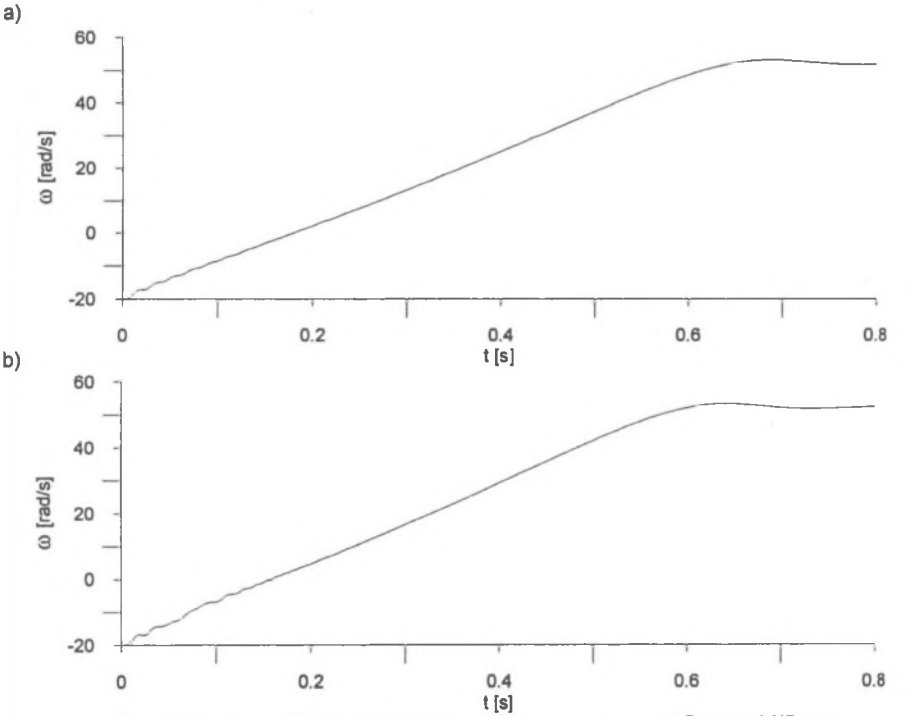


Rys. 2. a) Przekrój żłobka oryginalnego, b) przekrój żłobka zastępczego
Fig. 2. a) Cross-section of the original slot, b) cross-section of the substitutional slot

Przekrój żłobka zastępczego dobrano tak, aby jego rezystancja pokrywała się z rezystancją wypadkową obu prętów leżących w tym samym żłobku, uwzględniając, że pręty klatki rozruchowej są z mosiądzu. Również przekrój zastępczego pierścienia zwierającego miedzianego zapewnia rezystancję taką jak wypadkowa rezystancja pierścieni klatki górnej i dolnej.

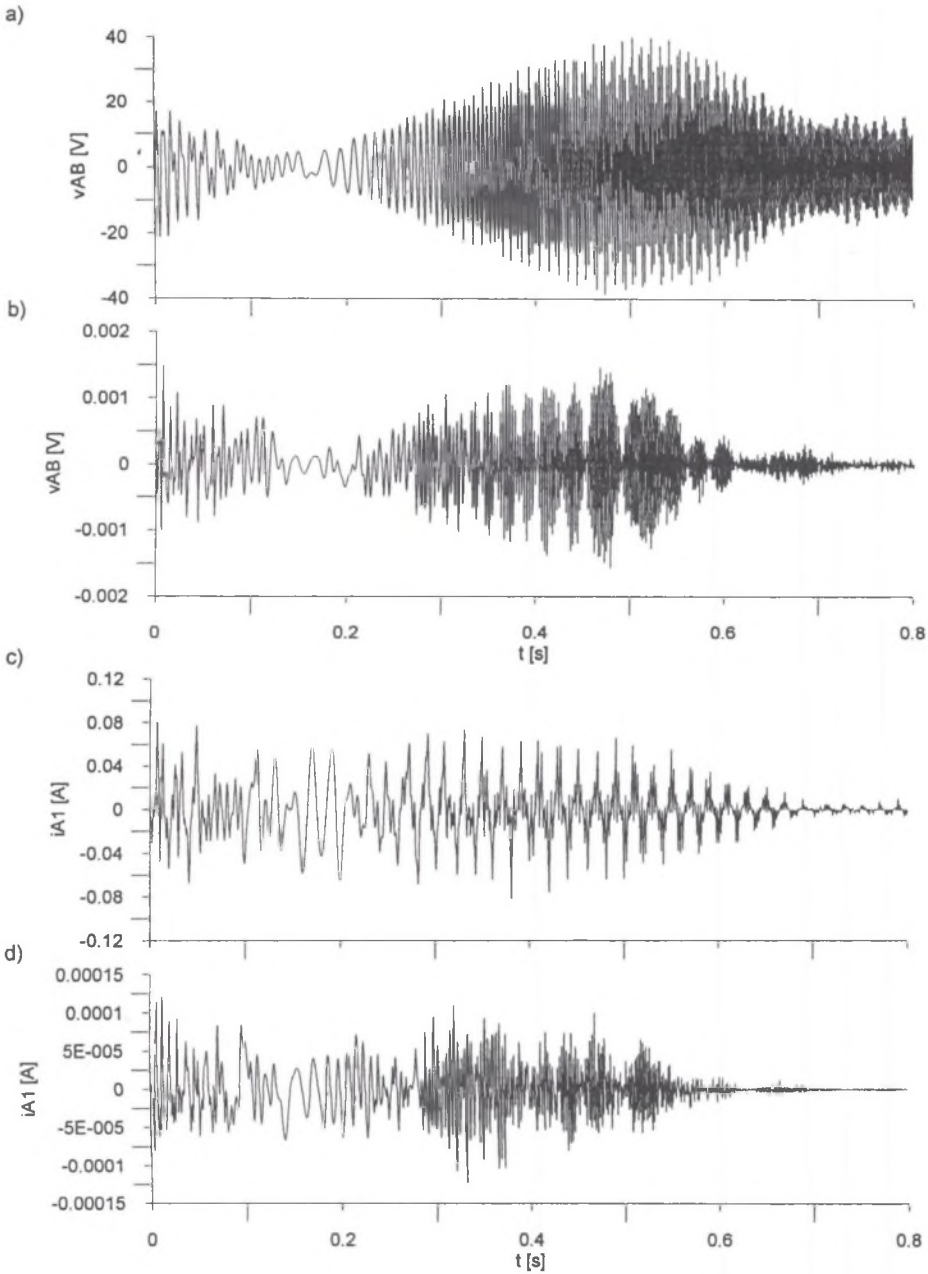
2. PRZYPADEK UŁOŻYSKOWANIA CENTRYCZNEGO I KLATKI SYMETRYCZNEJ

Na rys. 3 podano przebiegi prędkości przy rozruchu obu nieobciążonych silników z niepełnego rewersu. Moce znamionowe obu silników (przy 2p = 12) wynoszą 65 kW. Momenty bezwładności wirników wynoszą 5 kg·m^2. Przyjęto, że obciążenie, dołączone poprzez sprzęgło sztywne, wnosi dodatkowy moment bezwładność równy 20 kg·m^2. Różnice w zafalowaniach obu przebiegów przy niskich prędkościach wynikają przede wszystkim z odmiennych momentów pasożytniczych synchronicznych, generowanych w obu przypadkach.



Rys. 3. Przebieg prędkości przy rozruchu z niepełnego rewersu. a) NR = 56. b) NR = 60
Fig. 3. Speed versus time during startup from partial reverse. a) NR = 56. b) NR = 60

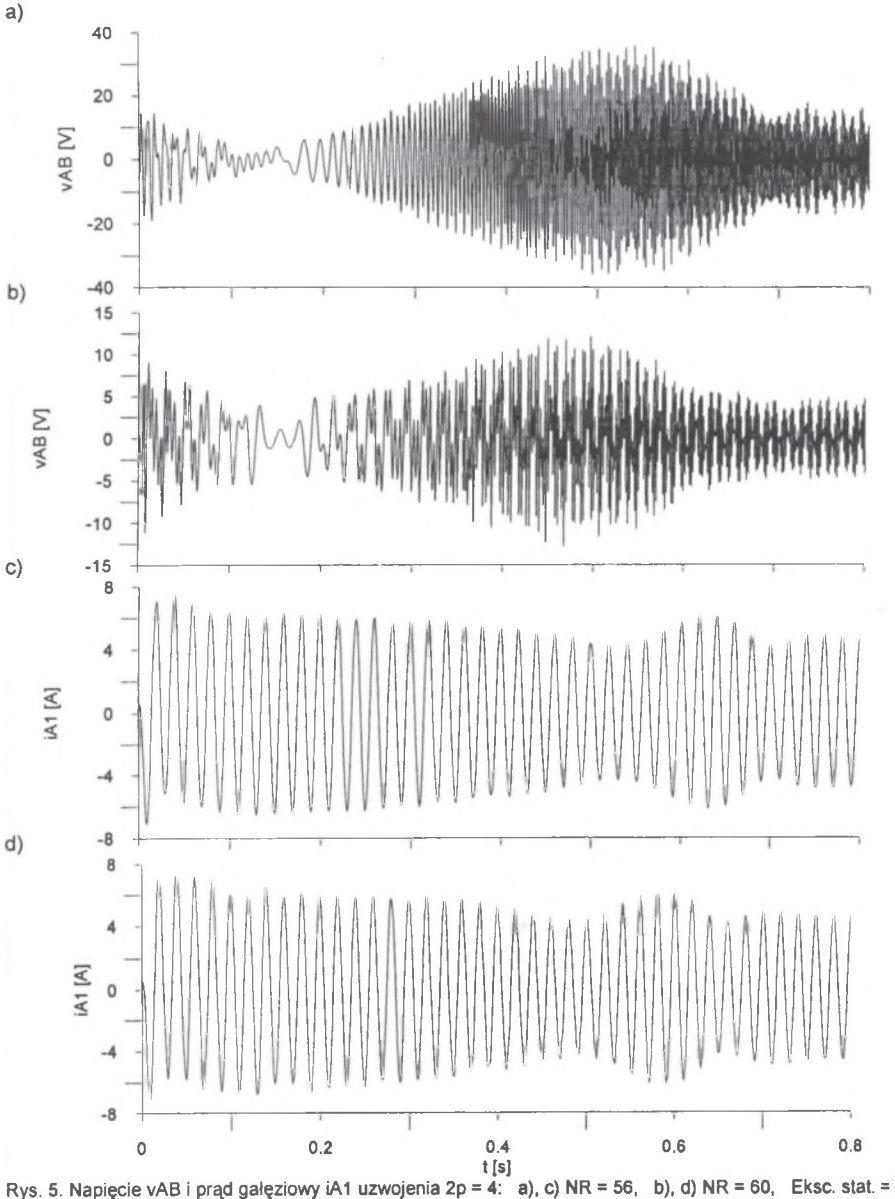
Na rys. 4a i 4b podano przebiegi napięć indukowanych na zaciskach AB uzwojenia nieaktywnego (2p = 4), przy czym zasilane jest uzwojenie 2p = 12 napięciem międzyfazowym 1000 V_{rms}. W przypadku silnika z klatką NR = 56, w wyniku niezupełnego znoszenia się napięć fazowych, napięcie resztkowe osiąga wartości 40 V_{mx} (nawet przy pomijanej tu fali nasyceniowej). Na rys. 4c i 4d podano przebiegi prądu w pierwszej gałęzi równoległej fazy A uzwojenia nieaktywnego 2p = 4. W obu przypadkach wykonania klatki są to prądy znikomo małe.
W przypadku analizowanej w rozdz. 3. ekscentryczności statycznej amplituda napięcia dla silnika z klatką NR = 60 osiągnie wartość 12 V, a w przypadku ekscentryczności dynamicznej (rozdz. 4.) 15 V. W przypadku ułożyskowania centrycznego, ale z pękniętym prętem klatki (rozdz. 5.), amplituda napięcia vAB dla silnika z klatką NR = 60 osiągnie wartość 20 V.



Rys.4. Napięcie vAB i prąd gałęziowy iA1 uzwojenia 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60
Fig.4. Voltage vAB and branch current iA1 of winding 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60

3. PRZYPADEK EKSCENTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ (30%) I KLATKI SYMETRYCZNEJ

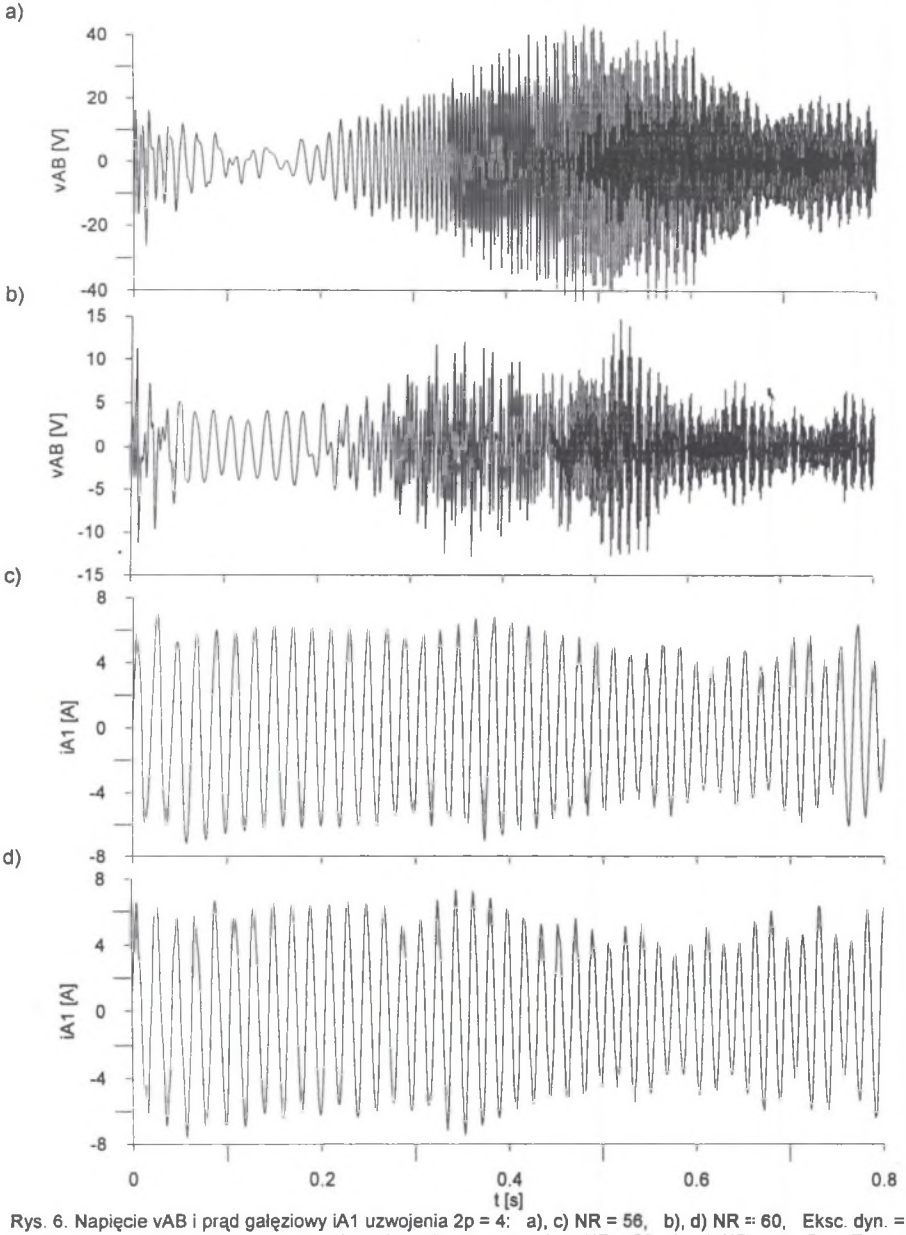
Rysunek 5 podaje napięcia i prądy dla ekscentryczności statycznej wynoszącej 30% grubości szczeliny powietrznej. Rosną prądy gałęziowe w stosunku do rys.4 i napięcia dla silnika z klatką NR = 60.



Rys. 5. Napięcie vAB i prąd gałęziowy iA1 uzwojenia 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, Eksc. stat. = 30%
Fig. 5. Voltage vAB and branch current iA1 of winding 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, Stat. Ecc.= 30 %

4. PRZYPADEK EKSCENTRYCZNOŚCI DYNAMICZNEJ (30%) I KLATKI SYMETRYCZNEJ

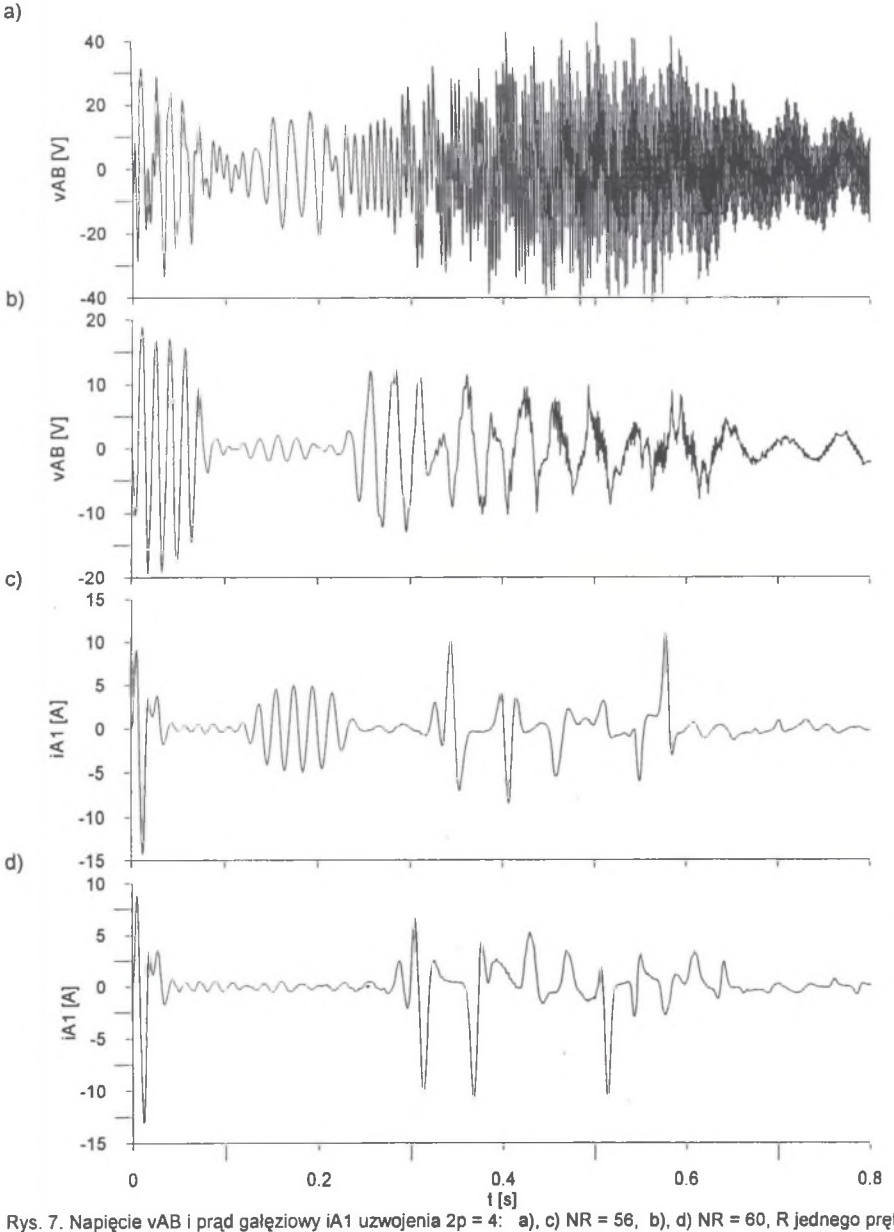
Rysunek 6 dotyczy ekscentryczności dynamicznej wynoszącej 30% grubości szczeliny powietrznej. Prądy i napięcia uzwojenia nieaktywnego osiągają wartości podobne do tych z rys. 5.



Rys. 6. Napięcie vAB i prąd gałęziowy iA1 uzwojenia 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, Eksc. dyn. = 30%
Fig. 6. Voltage vAB and branch current iA1 of winding 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, Dyn. Ecc.= 30 %

5. PRZYPADEK UŁOŻYSKOWANIA CENTRYCZNEGO I KLATKI Z PRZERWANYM PRĘTEM

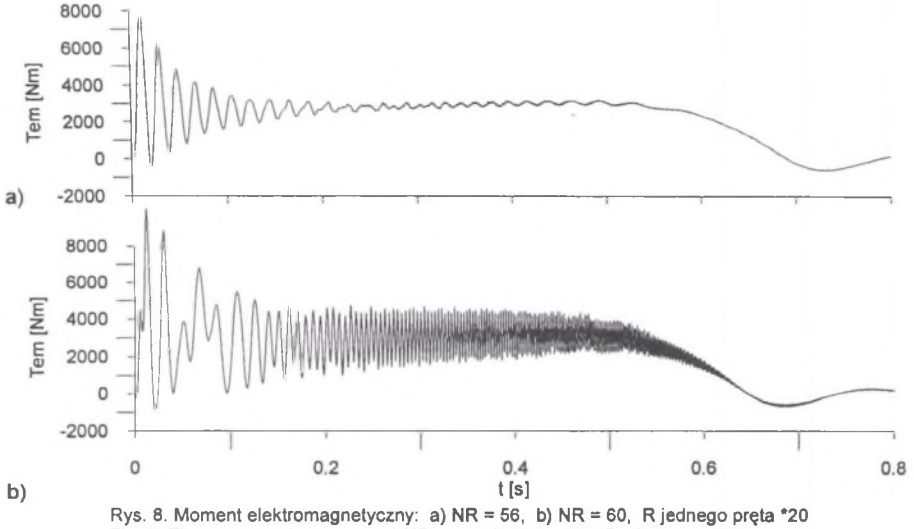
Rysunek 7 podaje napięcia i prądy dla braku ekscentryczności, przy czym rezystancję jednego pręta klatki przemnożono przez 20 (dla odwzorowania jego pęknięcia).



Rys. 7. Napięcie vAB i prąd gałęziowy iA1 uzwojenia 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, R jednego pręta *20
Fig. 7. Voltage vAB and branch current iA1 of winding 2p = 4: a), c) NR = 56, b), d) NR = 60, R of one bar *20

6. WNIOSKI

Z rys. 4 do 7 wynika, że napięcie na nieaktywnym uzwojeniu przy NR = 56 jest zawsze większe niż przy NR = 60. Jednakże (rys. 8a) maszyna ta generuje mniejsze momenty przemienne.



Rys. 8. Moment elektromagnetyczny: a) NR = 56, b) NR = 60, R jednego pręta *20
Fig. 8. Electromagnetic torque: a) NR = 56, b) NR = 60, R of one bar *20

LITERATURA

1. Rusek J.: Komputerowa analiza maszyny indukcyjnej z wykorzystaniem bilansu harmonicznych. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Kraków 2000.
2. Rusek J.: Reflection of eccentricities in spectral composition of currents of induction machines. ICEM'96 Proceedings. Vol. 2, ETSEM – Universidade de Vigo, Spain. pp. 470 – 475.
3. Rusek J.: Computer implementation of the induction machine dynamical model accunting for broken bars, eccentricities, slotting and parallel branches. ICEM'2000 Proceedings. Vol. 2, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland. pp. 868 – 872.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Zawilak
Profesor Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Abstract

Fig. 1 presents a diagram of the stator windings. Unlike the active winding, the inactive one posses parallel branches. Currents denoted with arrows were used in calculations. Double cages were mapped by deep-bar ones. Voltages and currents in Chapter 2 refer to centric suspension of the rotor within the stator bore. Chapter 3 deals with static eccentricity and Chapter 4 to the dynamic one. Chapter 5 refers to the cage with one broken bar. In each case the voltage across the inactive winding is bigger (and the torque ripples are smaller) for NR = 56 than for NR = 60.