

*maszyny elektryczne, silniki indukcyjne pierścieniowe,
synchronizacja, obliczenia polowo-obwodowe*

Stanisław AZAREWICZ,
Adam ZALAS, Paweł ZALAS*

BADANIA SYMULACYJNE PROCESU SYNCHRONIZACJI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PIERŚCIENIOWYCH

Przedstawiono problemy związane z procesem synchronizacji, utraty synchronizacji oraz resynchronizacji typowych silników indukcyjnych pierścieniowych pracujących w napędach różnego typu. W artykule przedstawiono propozycję rozwiązania problemu łagodnej synchronizacji tych silników po dokonaniu rozruchu asynchronicznego oraz wyniki badań symulacyjnych wskazujących na celowość stosowania tego rozwiązania w wielu napędach przemysłowych. Zaproponowano również metodę pozwalającą łagodzić niekorzystne stany dynamiczne podczas utraty synchronizacji wywołanej przez chwilowe przeciążenie maszyny. Obliczenia wykonano wykorzystując opracowany polowo-obwodowy model obliczeniowy dla wybranego typu silnika pierścieniowego dużej mocy.

1. WSTĘP

Zmniejszenie energochłonności urządzeń elektrycznych jest obecnie jednym z najistotniejszych zagadnień, któremu poświęca się coraz większą uwagę. Spośród wielu możliwości poprawy bilansu energetycznego urządzeń jest poprawa współczynnika mocy silników elektrycznych stosowanych powszechnie w przemyśle (wśród wielu, jedną z wielu). Poprawiając współczynnik mocy odbiorników zmniejszamy straty energii elektrycznej w wyniku obniżenia prądu pobieranego z sieci, a pozytywny efekt będzie tym większy, im większej mocy jest silnik oraz im mniej jest obciążony. Coraz powszechniejsze stosowanie przemienników częstotliwości do zasilania silników indukcyjnych klatkowych wyposażonych dodatkowo w filtry w znacznym stopniu poprawiło sprawność energetyczną tych napędów. Oprócz nich w przemyśle nadal stosowane są dość licznie silniki indukcyjne pierścieniowe, zazwyczaj znacznej mocy,

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl, adam.zalas@pwr.wroc.pl, pawel.zalas@pwr.wroc.pl

pracujące w napędach o rozruchu ciężkim, zasilane bezpośrednio z sieci. Napędy te zazwyczaj nie potrzebują regulacji prędkości obrotowej. Bardzo często silniki te w układach napędowych po dokonaniu rozruchu pracują w znacznym niedociążeniu, co skutkuje niskim współczynnikiem mocy, a tym samym gorszą sprawnością energetyczną napędu. Celowym zatem jest poszukiwanie możliwości poprawy tego stanu.

Jednym z rozwiązań może być wprowadzanie tych silników w stan pracy synchronicznej po dokonaniu pełnego rozruchu [1, 2, 10]. Realizacja synchronizacji wymaga jednakże rozwiązania pewnych problemów technicznych, z których najistotniejsze to wybór optymalnej chwili załączenia prądu wzbudzenia do uzwojenia wirnika [5–7, 12] oraz dobranie jego minimalnej wartości tak, aby ograniczyć siły dynamiczne występujące w procesie synchronizacji [10]. W tym celu bardzo istotnym jest właściwy wybór układu sterowania rozruchem i zasilania napięciem stałym [11] uzwojeń wirnika.

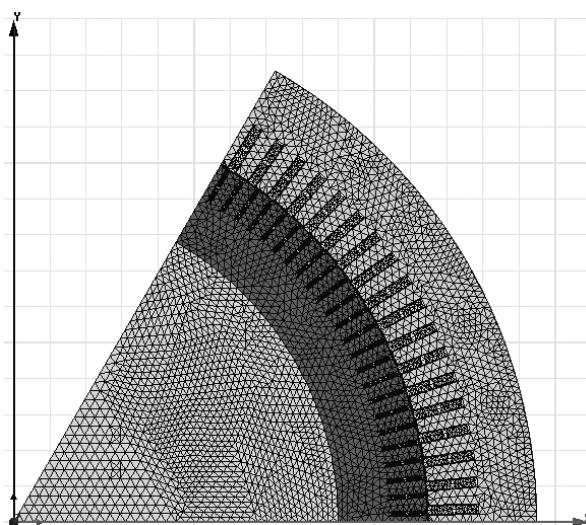
W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych napędu z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym podczas realizacji procesu synchronizacji, a także przebiegi dynamiczne jakie występują podczas utraty synchronizmu i ponownej resynchronizacji silnika. Poznanie powyższych problemów jest bardzo istotne ze względu na niewielką przeciążalność silników asynchronicznych pierścieniowych podczas pracy synchronicznej. W wyniku przeprowadzonej analizy i badań symulacyjnych zaproponowano układ sterowania rozruchem i zasilania napięciem stałym uzwojeń wirnika silnika. Przedstawiono układ realizacji synchronizacji wraz ze sposobem jego sterowania oraz wyniki badań symulacyjnych różnych stanów pracy wybranego napędu dużej mocy z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym. Na podstawie uzyskanych wyników badań określono warunki jakie powinien spełniać silnik pierścieniowy przeznaczony do pracy synchronicznej. Wykazano również, że w stanie pracy synchronicznej silniki indukcyjne pierścieniowe posiadają korzystniejszy współczynnik mocy niż podczas pracy asynchronicznej przy identycznym obciążeniu, a także w określonych przypadkach przy znacznym niedociążeniu mogą pracować w stanie pracy kompensatorowej.

2. BADANIA SYMULACYJNE PROCESU SYNCHRONIZACJI I PRACY SYNCHRONICZNEJ SILNIKA PIERŚCIENIOWEGO

Badaniom symulacyjnym poddano silnik indukcyjny pierścieniowy o parametrach zestawionych w tabeli 1. Określenie wpływu chwili załączenia napięcia stałego do uzwojenia wirnika na przebieg procesu synchronizacji wybranego silnika pierścieniowego przeprowadzono w ramach badań symulacyjnych przy różnych wartościach momentu obciążenia. Badania symulacyjne przeprowadzono metodą polowo-obwodową wykorzystując komercyjne oprogramowanie. Na rysunku 1 pokazano fragment magnetowodu badanego silnika wraz z siatką elementów skończonych, wykorzystywanego w części polowej opracowanego modelu obliczeniowego.

Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika pierścieniowego
 Table 1. The ratings of the slip-ring induction motor

moc znamionowa	kW	1000
napięcie stojana	V	6000
prąd stojana	A	124
prędkość obrotowa	obr/min	493
współczynnik mocy	–	0,82 _{ind.}
sprawność	–	94,6%
prąd wirnika	A	410

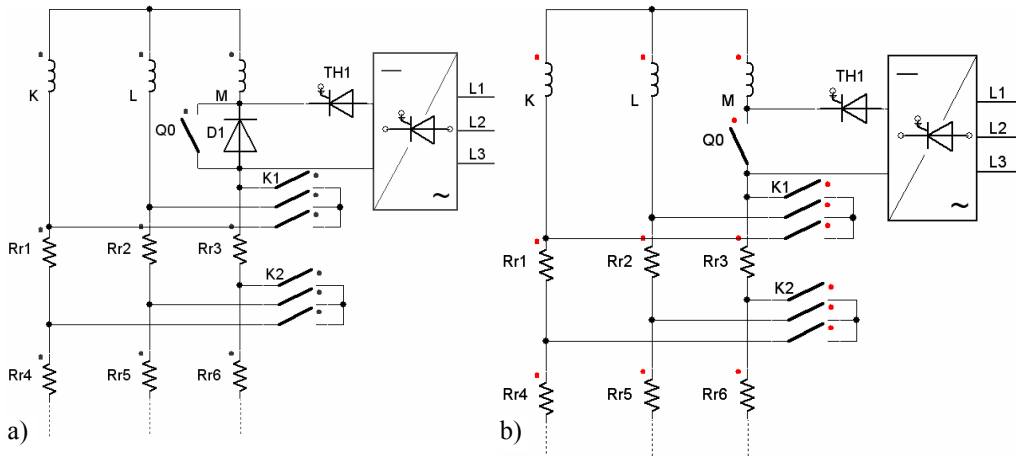


Rys. 1. Fragment magnetowodu oraz siatki dyskretyzacyjnej modelowanego silnika
 Fig. 1. The field part of the model; magnetic core and finite element mesh

Podczas obliczeń pracy silnika rozruch dokonywany był w sposób tradycyjny z wykorzystaniem rozrusznika rezystancyjnego. Po ustaleniu się prędkości podsynchronicznej do uzwojeń wirnika dołączano napięcie stałe. Schematy ideowe układów połączeń oraz zasilania uzwojeń wirnika badanego silnika pierścieniowego podczas rozruchu oraz synchronizacji, wykorzystywane w części obwodowej opracowanego modelu obliczeniowego, pokazano na rysunku 2a, b.

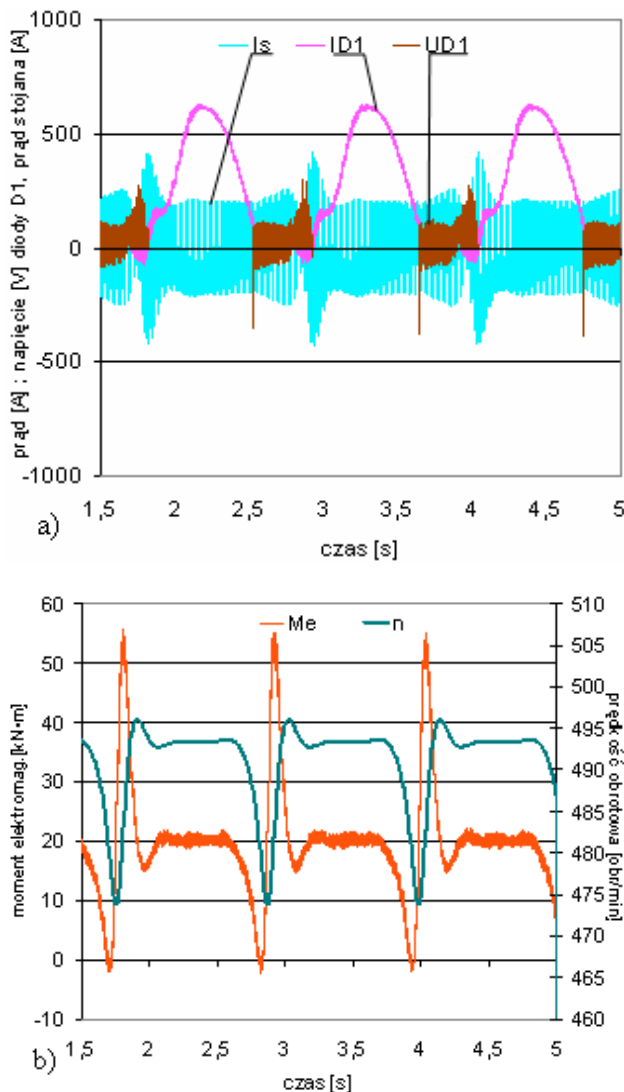
Jedną z przyjętych do obliczeń metod sterowania tyrystorem synchronizacji TH1 było wykorzystanie rozłączenia jednej z faz wirnika wyłącznikiem Q0, a następnie pomiar przebiegu chwilowej wartości siły elektromotorycznej na jego zaciskach. Analiza przebiegu tej SEM wykorzystana była przez układ sterowania (rys. 2a) do ustalenia optymalnej chwili wyzwolenia tyrystora TH1, a tym samym załączenia napięcia stałego do uzwojenia wirnika badanego silnika [6, 7, 10]. W rozwiązaniu układu wzbudzenia zastosowano dodatkową diodę D1 włączoną równolegle do zacisków

wyłącznika Q0 (rys. 2a), której celem jest ograniczenie skutków rozwarcia [3, 4] jednej fazy wirnika przed synchronizacją. Po rozwarciu wyłącznika Q0 przez diodę bocznikującą jego styki zaczyna płynąć prąd półkresowy, którego kierunek jest zgodny z prądem wzbudzenia wywołanym załączeniem napięcia stałego. Składowa przemienna prądu sumuje się podczas synchronizacji ze stałym prądem wzbudzenia, co wpływa korzystnie na przebieg procesu [6], zwiększając moment synchronizujący.



Rys. 2. Schemat ideowy układu zasilania uzwojenia wirnika prądem stałym: z diodą (a) i bez diody (b)
Fig. 2. The circuit part of the model; a diagram of field winding power supply with diode (a) and without (b)

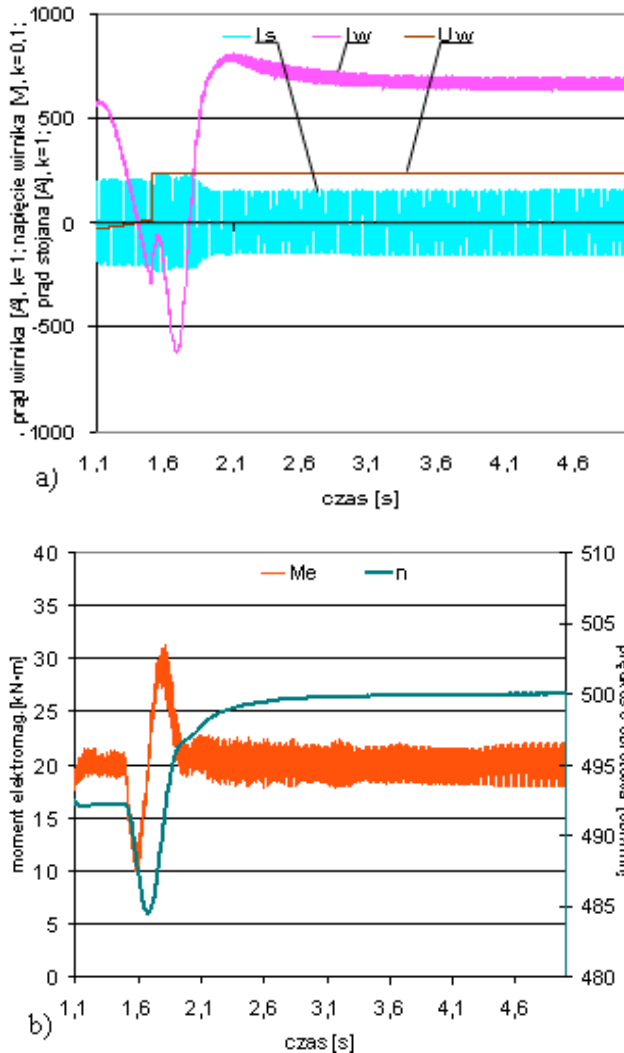
Analizowany przebieg napięcia na diodzie D1 (rys. 2a) w stanie pracy asynchronicznej po zakończonym rozruchu zawiera informacje o położeniu wirnika względem pola wirującego. Analiza wyników wykonanych obliczeń wykazała, że najkorzystniejszą chwilą rozpoczęcia procesu synchronizacji badanego silnika jest przejście przebiegu tego napięcia z wartości ujemnej na dodatnią. Jednak jest to sygnał bardzo zniekształcony, o znacznej zawartości wyższych harmonicznych pochodzenia żłobkowego, co w układzie rzeczywistym stanowiłoby duże utrudnienie w sterowaniu tyrystorem synchronizacji. Na rysunku 3 pokazano obliczone przebiegi czasowe prądu stojana I_s , prądu I_d płynącego przez diodę D1, napięcia U_d na zaciskach diody (a), prędkości obrotowej oraz momentu elektromagnetycznego (b) podczas pracy asynchronicznej po dokonaniu rozruchu. Obliczenia wykonano dla znamionowej wartości momentu obciążenia. Przyjęto wypadkowy moment bezwładności $J_z = 1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, co odpowiada pracy badanego silnika w napędzie młynka kulowego.



Rys. 3. Przebiegi czasowe podczas pracy asynchronicznej silnika
 Fig. 3. Waveforms of the quantities during motor's asynchronous operation

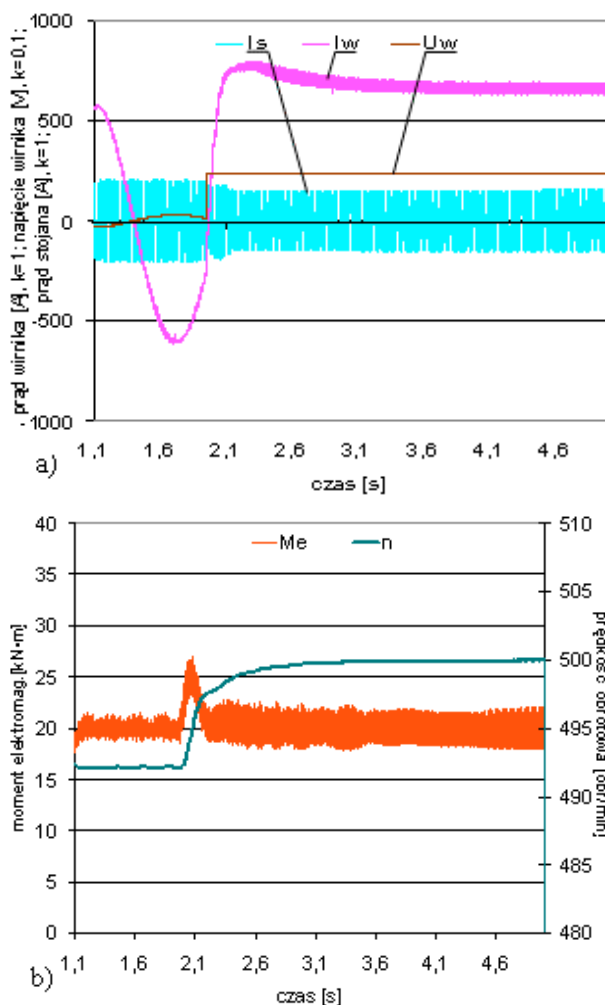
Jak widać na rysunku 3, dodatkową niedogodnością zaproponowanego rozwiązania jest konieczność rozłączenia jednej z faz wirnika po zakończonym rozruchu, co skutkuje obniżeniem momentu maksymalnego silnika przy pracy asynchronicznej i prowadzi do zwiększenia poślizgu [8, 9] oraz pulsacji prędkości i prądów. Dlatego też proces synchronizacji powinien być przeprowadzony bezzwłocznie w pierwszej korzystnej chwili czasowej.

Innym rozwiązaniem sposobu sterowania tyrystorem synchronizacji (rys. 2b) jest analiza przebiegu napięcia na rezystorze rozruchowym ostatniego stopnia rozrusznika. Odpowiednio dobrana wartość rezystancji rezystorów rozruchowych ostatniego stopnia, symetrycznie włączonych w obwód faz wirnika, nieznacznie wpłynie na zwiększenie poślizgu silnika w stanie pracy asynchronicznej ustalonej. Umożliwia natomiast wyznaczenie korzystnej chwili wyzwolenia tyrystora synchronizacji.

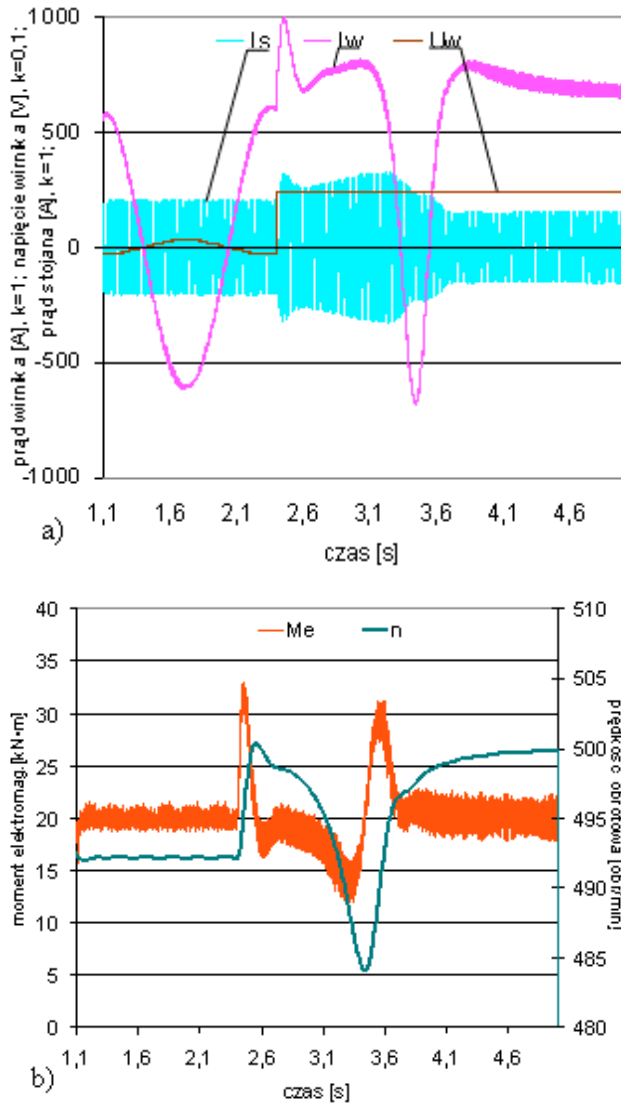


Rys. 4. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla $t = 1,5$ s
 Fig. 4. Waveforms of the quantities during motor synchronization started at $t = 1.5$ s

Na rysunkach 4–6 pokazano przebiegi chwilowe obserwowanych wielkości podczas procesów synchronizacji badanego silnika pierścieniowego, rozpoczętych w różnych chwilach czasowych. Literą „k” w opisie rysunków oznaczono współczynniki skali. Obliczenia wykonano dla przyjętych wcześniej warunków pracy. Wartość napięcia stałego załączanego do uzwojenia wirnika ustalono na poziomie zapewniającym w stanie pracy synchronicznej ustaloną prąd wirnika o wartości maksymalnej $1,1I_{2n}$. W celu zwiększenia przejrzystości wyników wykonanych obliczeń w części obwodowej opracowanego modelu silnika prostownik sterowany (rys. 2a, b) zastąpiono idealnym źródłem napięcia stałego.



Rys. 5. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla $t = 1,9$ s
 Fig. 5. Waveforms of the quantities during motor synchronization started at $t = 1.9$ s



Rys. 6. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla $t = 2,4$ s
 Fig. 6. Waveforms of the quantities during motor synchronization started at $t = 2.4$ s

Na podstawie analizy uzyskanych wyników obliczeń symulacyjnych stwierdzono, że przebieg procesu synchronizacji, przebiegi chwilowe i wartości momentów dynamicznych oraz prądów silnika a także czas ustalenia prędkości po synchronizacji zależą istotnie przede wszystkim od chwili czasowej załączenia napięcia wzbudzenia. Łagodny i skuteczny przebieg procesu synchronizacji badanego silnika pierścienio-

wego, dla przyjętych warunków pracy maszyny, zapewnia załączenie napięcia stałego w chwili przejścia napięcia mierzonego na rezystorze rozruchowym z wartości dodatniej na ujemną (rys. 5). Nie występują wówczas przepięcia i przetężenia prądu silnika (rys. 4, 6) a synchronizacja odbywa się w najkrótszym czasie z małymi oscylacjami momentu i prędkości obrotowej (rys. 5).

Wykorzystując opracowany model wykonano obliczenia pracy badanego silnika w stanie asynchronicznym oraz synchronicznym. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe zmiany wartości prądu stojana i współczynnika mocy silnika w funkcji obciążenia. Podczas pracy synchronicznej przyjęto wartość prądu wirnika równą $1,1I_{2n}$.

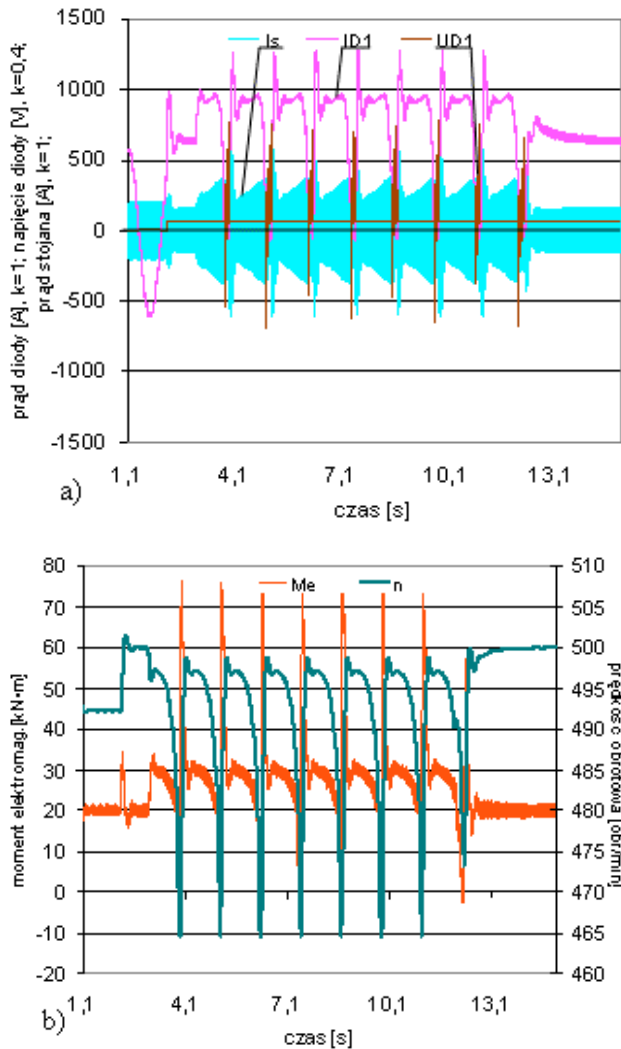
Tabela 2. Praca synchroniczna i asynchroniczna silnika pierścieniowego
Table 2. Synchronous and asynchronous operation of the slip-ring induction motor

M/M_n	Praca synchroniczna		Praca asynchroniczna	
	współczynnik mocy	prąd stojana	współczynnik mocy	prąd stojana
0,3	0,46 _{poj.}	59	0,57 _{ind.}	68
0,5	0,71 _{poj.}	69	0,74 _{ind.}	81
0,75	0,97 _{poj.}	83	0,79 _{ind.}	102
1	1	103	0,82 _{ind.}	124
1,1	0,97 _{ind.}	115	0,82 _{ind.}	136

Typowy silnik indukcyjny pierścieniowy podczas pracy synchronicznej charakteryzuje się stosunkowo małym momentem synchronicznym. W wyniku tego jest wrażliwy na chwilowe przeciążenia. Przechodzi wówczas do pracy asynchronicznej trwającej do czasu, gdy wartość momentu obciążenia umożliwi resynchronizację silnika. W celu sprawdzenia wpływu zaproponowanych układów zasilania uzwojenia wirnika napięciem stałym (rys. 2) na przebieg procesu utraty synchronizacji i pracy asynchronicznej w wyniku chwilowego przeciążenia maszyny oraz procesu resynchronizacji wykonano odpowiednie obliczenia. Wyniki obliczeń dla układu zasilania uzwojenia wirnika z diodą w jednej z faz (rys. 2a) oraz bez diody (rys. 2b) pokazano odpowiednio na rysunkach 7 oraz 8. W chwili $t = 3$ s zamodelowano skokowy wzrost momentu obciążenia do wartości $1,5M_n$, a w chwili $t = 12$ s obciążenie zostało skokowo zmniejszone do wartości znamionowej. W obu przypadkach od chwili inicjacji procesu synchronizacji utrzymywano stałą wartość napięcia zasilającego uzwojenie wirnika.

Zastosowanie układu zasilania pokazanego na rysunku 2a wywołało, podczas pracy asynchronicznej wzbudzonej maszyny, znaczące pulsacje prędkości i udary prądów silnika oraz duże amplitudy zmian wartości chwilowych momentu elektromagnetycznego (rys. 7), co może powodować niekorzystne udary mechaniczne na wale maszyny

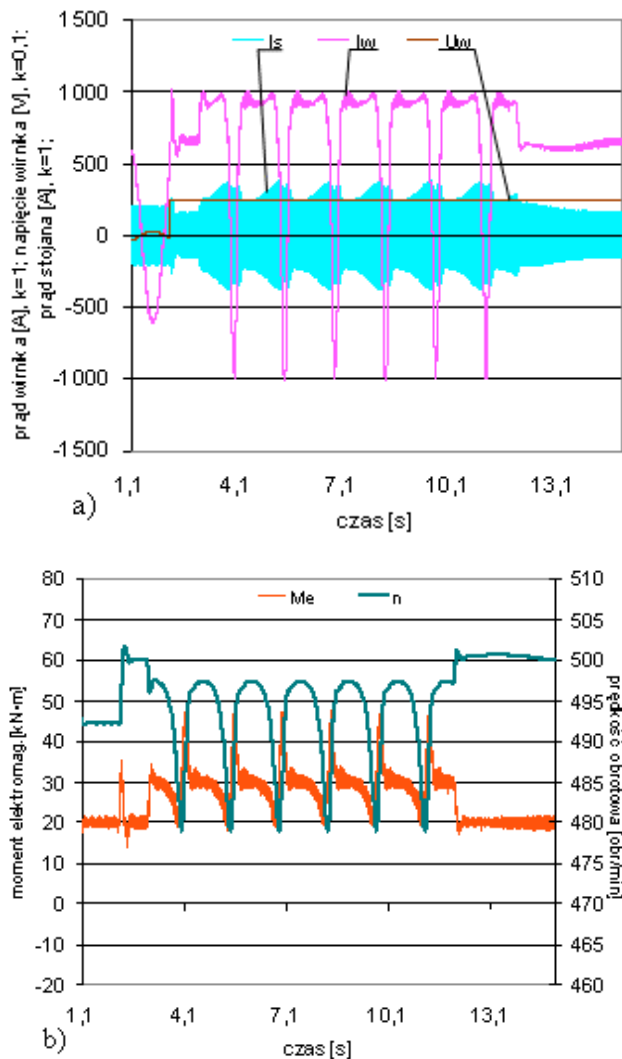
roboczej i stanowić dodatkowe obciążenie. Proces resynchronizacji przebiega łagodnie i w krótkim czasie (rys. 7) po zmniejszeniu momentu obciążenia.



Rys. 7. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji
– układ zasilania wirnika z diodą

Fig. 7. Waveforms of the quantities during momentary loss of synchronism
– the field winding power supply with diode

Zastosowanie układu zasilania bez diody (rys. 2b) wpłynęło na zmniejszenie pulsacji prędkości silnika oraz uderów prądów i momentu (rys. 8), ale przebiegi procesów dynamicznych nie można uznać za łagodne.

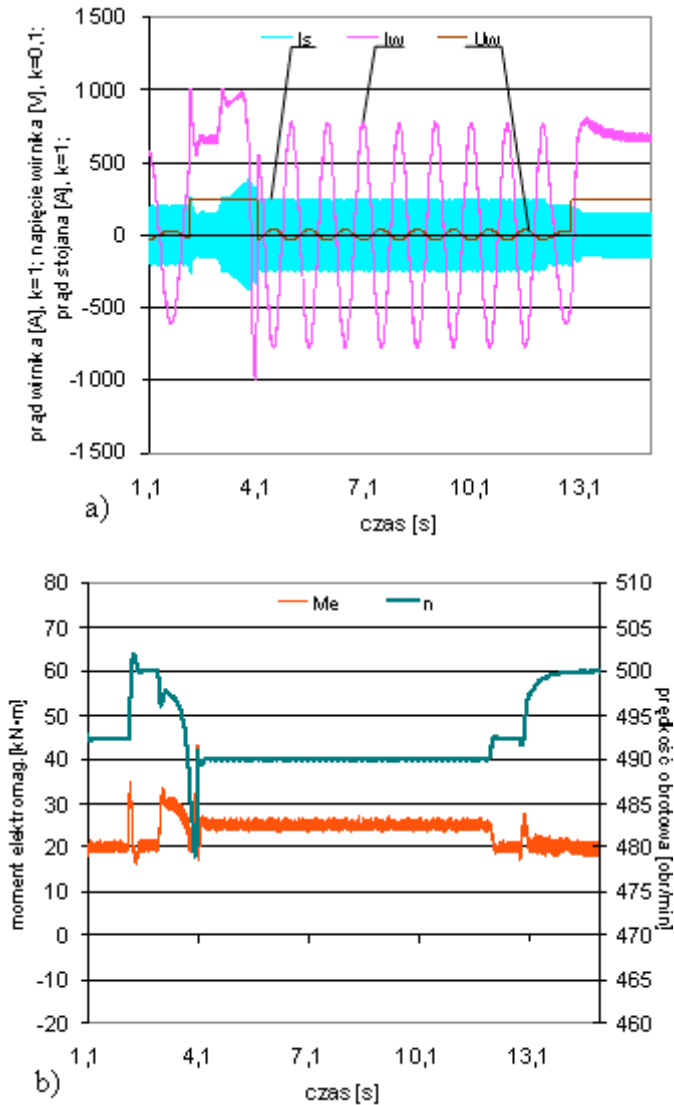


Rys. 8. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji
– układ zasilania wirnika bez diody

Fig. 8. Waveforms of the quantities during momentary loss of synchronism
– the field winding power supply without diode

Znacznie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowego układu sterowania zapobiegającego pracy asynchronicznej wzbudzonego silnika. Wyniki obliczeń dla takiego przypadku pokazano na rysunku 9. W obliczeniach w chwili utraty synchronizacji i wzrostu poślizgu silnika napięcie stałe zostało wyłączone ($t = 4,2$ s), a uzwojenia wirnika połączone w gwiazdę i zwarte przez rezystory ostatniego stopnia

rozrusznika (rys. 2b), wykorzystywane później ($t = 12,8$ s) w procesie łagodnej resynchronizacji. Zaproponowane rozwiązanie praktycznie całkowicie wyeliminowało udary momentu silnika oraz prądów i zminimalizowało pulsację prędkości.



Rys. 9. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji
– okresowe wyłączenia napięcia wzbudzenia

Fig. 9. Waveforms of the quantities during momentary loss of synchronism
– momentary shutdown of the field voltage

3. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników wykonanych obliczeń stwierdzono, że zaproponowana metoda synchronizacji silników indukcyjnych pierścieniowych zapewnia skuteczny i łagodny przebieg procesu bez szkodliwych stanów dynamicznych oraz bez konieczności stosowania zwiększonego prądu wzbudzenia. Podczas pracy synchronicznej silnik asynchroniczny pracuje ze współczynnikiem mocy bliskim jedności co skutkuje zmniejszeniem prądu pobieranego z sieci, ale jest podatny na przeciążenia skutkujące utratą synchronizacji. Najkorzystniejszym rozwiązaniem w takim wypadku jest odłączenie napięcia stałego na okres zaistnienia przeciążenia oraz połączenie uzwojeń wirnika do pracy asynchronicznej, zwierając je w gwiazdę.

LITERATURA

- [1] AZAREWICZ S., ZALAS A., ZAWILAK J., *Tyristorowy układ łagodnej synchronizacji*, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 1995, nr 51, 67–71.
- [2] AZAREWICZ S., ZALAS A., ZAWILAK J., *Łagodny rozruch i łagodna synchronizacja silników synchronicznych*, Ustroń, 7–8.11.1996, Katowice, BOBRME Komel 1996, 66–71.
- [3] BARLIK R., NOWAK M., *Układy sterowania i regulacji urządzeń energoelektronicznych*, Warszawa, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1998.
- [4] BARLIK R., NOWAK M., *Technika tyrystorowa*, WNT, Warszawa 1994.
- [5] BISZTYGA K., *Sterowanie i regulacja silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1989.
- [6] PASZEK W., *Dynamika maszyn prądu przemiennego*, Wydawnictwo HELION, Gliwice 1998.
- [7] SOBCZYK T., *Łagodna synchronizacja silników synchronicznych dużej mocy z asynchronicznego stanu pracy*, XX SME, Maszyny synchroniczne, Kazimierz Dolny, Maj 1984.
- [8] STAATS G.W., XIAN-SHU L., *A new criterion for synchronization of salient-pole synchronous motors*, Conference record of the 1983 Minig Industry Technical Conf. IEEE 1983, 138–150.
- [9] STAATS G.W., *Maximum permissible slip for synchronizing salient-pole synchronous motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-2, nr 3, 1987.
- [10] ZALAS P., *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.
- [11] ZALAS P., ZAWILAK J., *Wpływ układu sterowania prądem wzbudzenia na proces synchronizacji silnika synchronicznego*, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, PEMINE, Ustroń, 17–19.05.2006, Katowice: BOBRME „Komel” 2006, 83–88.
- [12] ZALAS P., ZAWILAK J., *Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych*, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, PEMINE, Ustroń, 18–20.05.2005, Katowice: BOBRME „Komel” 2005, Zeszyty Problemowe nr 71, 59–64.

SIMULATION RESEARCH OF SYNCHRONIZATION PROCESS OF SLIP-RING INDUCTION MOTORS

The paper presents problems connected with processes of synchronization, loss synchronism and restoration synchronism for typical slip-ring induction motors applied in various industrial drive systems. The calculations were performed using a specially developed field-circuit calculation model for a selected model of the large power slip-ring induction motor. The calculation results are presented as diagrams over time.