

Stanisław Azarewicz, Adam Zalas, Paweł Zalas  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## PRACA SYNCHRONICZNA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PIERŚCIENIOWYCH

### SYNCHRONOUS OPERATION OF SLIP-RING INDUCTION MOTORS

**Abstract:** The problems connected with the synchronization process of typical slip-ring induction motors applied in various industrial drive systems. In comparison to synchronized induction motors (SAS) which have constructions designed for synchronization after starting the typical slip-ring induction motors are not suited for synchronization process. The main reason is that the control systems perform the synchronization process in the moment which is not optimal for that process. The article presents the solutions of this problem. The study results show that the presented method can be applied in many industrial drive systems.

#### 1. Wstęp

Silniki indukcyjne pierścieniowe nadal znajdują szerokie zastosowanie w napędach o rozruchu ciężkim pomimo coraz powszechniejszego stosowania silników indukcyjnych klatkowych o sterowaniu częstotliwościowym. W przyszłości także mogą być wykorzystywane w napędach, w których nie jest wymagana lub nie jest opłacalna regulacja prędkości obrotowej.

Mankamentem ich stosowania w napędach o niewielkim momencie obciążenia w stanie ustalonym są niekorzystne parametry energetyczne. Ma to coraz większe znaczenie w związku z koniecznością oszczędnego gospodarowania energią elektryczną.

Poprawę parametrów energetycznych tych silników, pracujących głównie w niedociążeniu, można uzyskać poprzez dokonanie ich synchronizacji po rozruchu. Wymaga to jednak rozwiązania pewnych problemów technicznych, z których najistotniejsze to wybór optymalnej chwili załączenia prądu wzbudzenia do uzwojenia wirnika oraz jego minimalnej wartości aby ograniczyć momenty dynamiczne występujące w procesie synchronizacji [4].

Istotny jest także prawidłowy dobór układu sterowania rozruchem i zasilania napięciem stałym uzwojeń wirnika [1, 2].

W artykule przedstawiono propozycję sposobu rozwiązania powyższych problemów, podano układ realizacji synchronizacji wraz ze sposobem jego sterowania a także wyniki badań symulacyjnych wybranego napędu dużej mocy z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym. Na podstawie przeprowadzonych badań określono warunki, jakie powinien spełniać silnik pierścieniowy przeznaczony do pracy synchronizacyjnej.

Wykazano również, że w stanie pracy synchronicznej silniki indukcyjne pierścieniowe mogą pracować ze współczynnikiem mocy bliskim jedności a nawet, przy dużym niedociążeniu, w stanie pracy kompensatorowej.

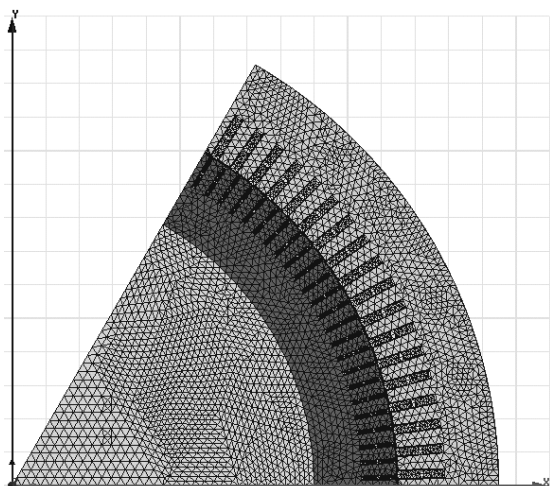
#### 2. Analiza procesu synchronizacji silnika pierścieniowego

Badaniom symulacyjnym poddano silnik indukcyjny pierścieniowy o parametrach zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika pierścieniowego

moc znamionowa	kW	1000
napięcie stojana	V	6000
prąd stojana	A	124
prędkość obrotowa	obr/min	493
współczynnik mocy	-	0,82 <sub>ind.</sub>
sprawność	-	94,6%
prąd wirnika	A	410

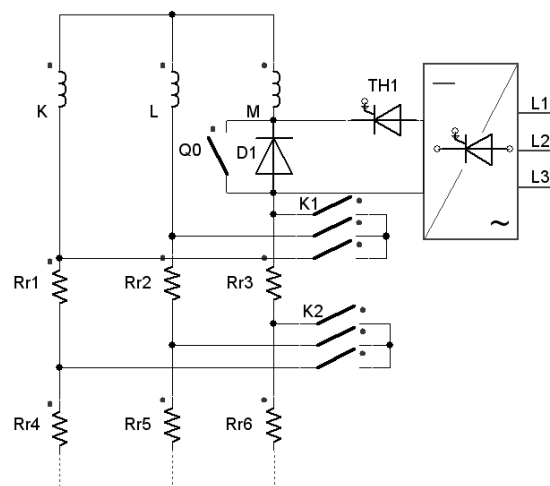
Określenie wpływu chwili załączenia napięcia stałego do uzwojenia wirnika na przebieg procesu synchronizacji wybranego silnika pierścieniowego przeprowadzono w ramach badań symulacyjnych przy różnych wartościach momentu obciążenia. Badania symulacyjne przeprowadzono metodą polowo-obwodową wykorzystując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



Rys. 1. Fragment magnetowodu oraz siatki dyskretyzacyjnej modelowanego silnika

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. Schemat ideowy połączeń uzwojeń wirnika badanego silnika pierścieniowego podczas rozruchu oraz synchronizacji, wykorzystywany w części obwodowej opracowanego modelu obliczeniowego, pokazano na rysunku 2.

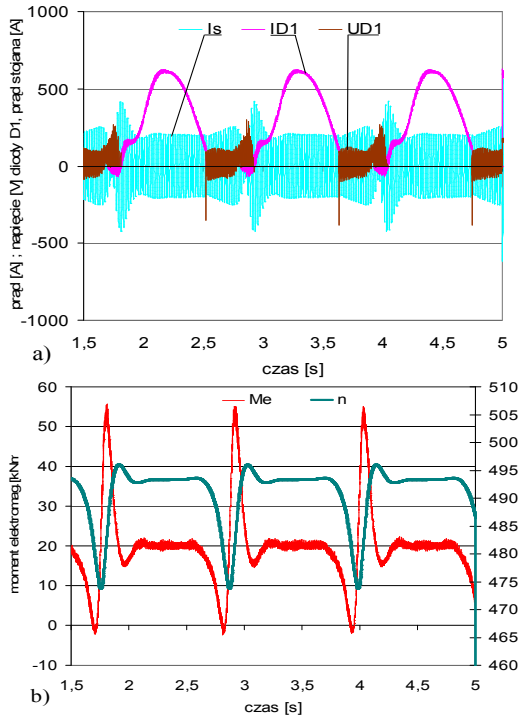
Jedną z przyjętych do obliczeń metod sterowania tyrystorem synchronizacji TH1 było wykorzystanie rozłączenia jednej z faz wirnika wyłącznikiem Q0, a następnie pomiar przebiegu chwilowej wartości siły elektromotorycznej na jego zaciskach. Analiza przebiegu tej SEM wykorzystana była przez układ sterowania (rys. 2) do ustalenia optymalnej chwili wyzwolenia tyrystora TH1, a tym samym załączenia napięcia stałego do uzwojenia wirnika badanego silnika. W rozwiązaniu układu wzbudzenia zastosowano dodatkową diodę D1 włączoną równolegle do zacisków wyłącznika Q0 (rys. 2), której celem jest ograniczenie skutków rozwarcia jednej fazy wirnika przed synchronizacją. Po rozwarciu wyłącznika Q0 przez diodę bocznikującą jego styki zaczyna płynąć prąd półokresowy, którego kierunek jest zgodny z prądem wzbudzenia wywołanym załączeniem napięcia stałego. Składowa przemienna prądu sumuje się podczas synchronizacji ze stałym prądem wzbudzenia [3], co wpływa korzystnie na przebieg procesu, zwiększając moment synchronizujący.



Rys. 2. Schemat ideowy układu zasilania uzwojenia wirnika prądem stałym

Analizowany przebieg napięcia na diodzie D1 (rys. 2) 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 stanowiło by 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 młyna kulowego.

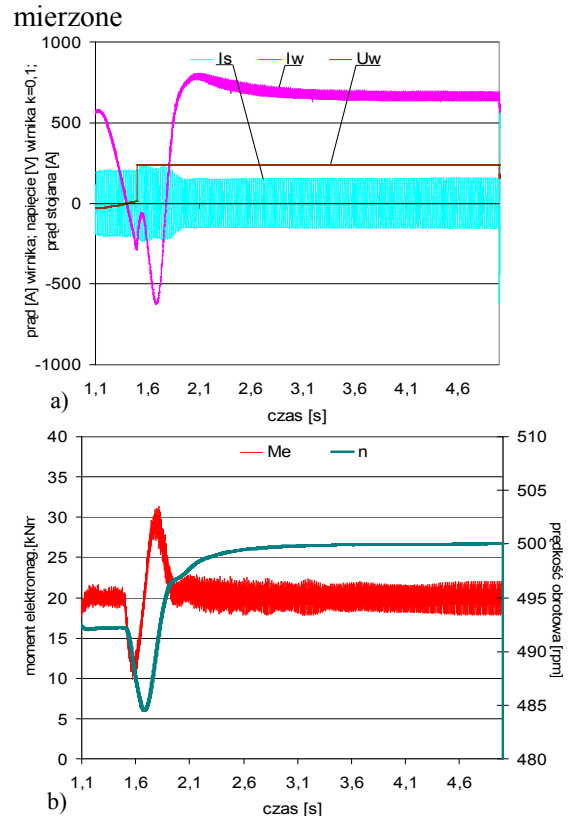
Jak widać na rysunku 3 dodatkową niedogodnością zaproponowanego rozwiązania jest konieczność rozłączenia jednej z faz wirnika po zakończonym rozruchu, co skutkuje obniżeniem momentu maksymalnego silnika przy pracy asynchronicznej i prowadzi do zwiększenia poślizgu oraz pulsacji prędkości i prądów. Dlatego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



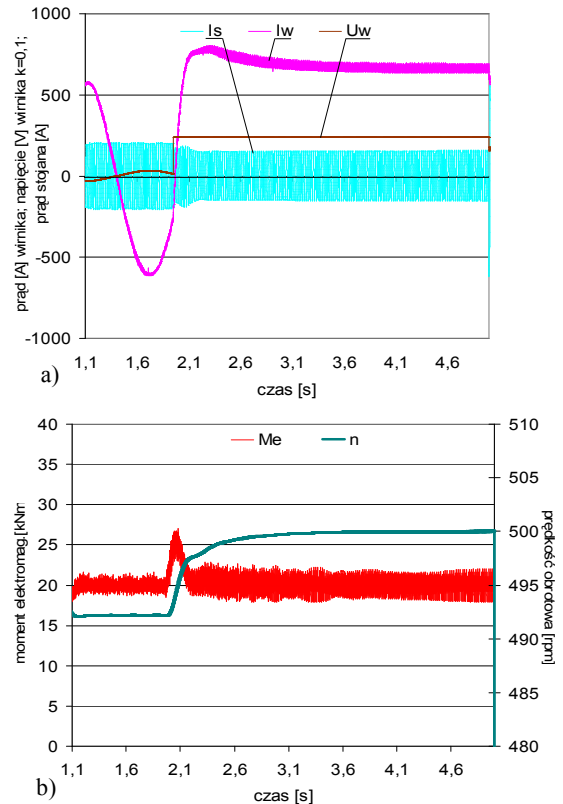
Rys. 3. Przebiegi czasowe podczas pracy asynchronicznej silnika

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

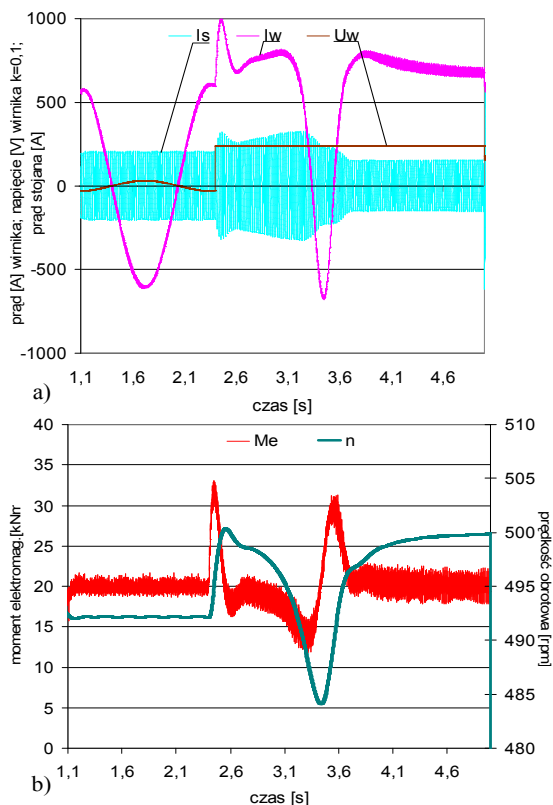
Na rysunkach 4-6 pokazano przebiegi chwilowe obserwowanych wielkości podczas procesów synchronizacji badanego silnika pierścieniowego, rozpoczętych w różnych chwilach czasowych. Obliczenia wykonano dla przyjętych wcześniej warunków pracy. Wartość napięcia stałego załączanego do uzwojenia wirnika ustalono na poziomie zapewniającym w stanie pracy synchronicznej ustalonej prąd wirnika o wartości maksymalnej  $1,1I_{2n}$ . W celu zwiększenia przejrzystości wyników wykonanych obliczeń w części obwodowej opracowanego modelu silnika prostownik sterowany (rys. 2) zastąpiono idealnym źródłem napięcia stałego. Jako  $U_w$  oraz  $I_w$  pokazano napięcie



Rys. 4. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla  $t=1,5s$



Rys. 5. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla  $t=1,9s$



Rys. 6. Przebiegi czasowe podczas procesu synchronizacji rozpoczętej dla  $t=2,4s$

na rezystancji rozruchowej w jednej z faz uzwojenia wirnika oraz prąd w tej fazie.

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 pierścieniowego, 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

$M/M_n$	praca synchroniczna		praca asynchroniczna	
	współczynnik mocy	prąd stojana	współczynnik mocy	prąd stojana
0,3	0,46 <sub>poj.</sub>	59	0,57 <sub>ind.</sub>	68
0,5	0,71 <sub>poj.</sub>	69	0,74 <sub>ind.</sub>	81
0,75	0,97 <sub>poj.</sub>	83	0,79 <sub>ind.</sub>	102
1	1	103	0,82 <sub>ind.</sub>	124
1,1	0,97 <sub>ind.</sub>	115	0,82 <sub>ind.</sub>	136

### 3. Wnioski

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych wskazują, że załączenie napięcia wzbudzenia w optymalnej chwili czasowej zapewnia skuteczną synchronizację silnika indukcyjnego pierścieniowego bez szkodliwych stanów dynamicznych oraz bez konieczności stosowania zwiększonego prądu wzbudzenia. Silnik pierścieniowy przeznaczony do synchronizacji po rozruchu powinien mieć moment maksymalny powyżej 200% momentu znamionowego. Podczas pracy synchronicznej silnik asynchroniczny pracuje ze współczynnikiem mocy bliskim jedności co skutkuje zmniejszeniem prądu pobieranego z sieci.

### 4. Literatura

- [1]. Azarewicz S., Zalas A., Zawilak J.: *Tyrystorowy 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]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998r.
- [4]. Zalas P.: *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.

### Autorzy

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