

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

STANY DYNAMICZNE W PRACY SYNCHRONICZNEJ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PIERŚCIENIOWYCH

TRANSIENT STATES DURING SYNCHRONOUS OPERATION OF SLIP-RING INDUCTION MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono problemy związane z procesem synchronizacji, utraty synchronizacji oraz ponownej synchronizacji typowych silników indukcyjnych pierścieniowych pracujących w napędach różnego typu. Przedstawiono metody pozwalające łagodzić niekorzystne stany dynamiczne podczas utraty synchronizacji wywołanej przez chwilowe przeciążenie maszyny lub zmniejszenie wartości napięć zasilających stojan. Badania obliczeniowe wykonano wykorzystując opracowany polowo-obwodowy model numeryczny dla wybranego typu silnika pierścieniowego dużej mocy.

Abstract: The paper presents the problems connected with the process of synchronization, loss of synchronization and resynchronization typical slip-ring induction motors, working in different types of drives. The paper also presents the methods to attenuate the dynamic waveforms during the synchronization loss caused by momentary overload the machine or reduce the value of the stator voltages. The computational studies were performed using a specially developed field-circuit numerical model for the selected type of high-power slip-ring induction motors.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki pierścieniowe, synchronizacja, obliczenia MES
Keywords: electrical machines, slip-ring induction motors, synchronization, FEM calculation

1. Wstęp

Jednym z najistotniejszych zagadnień, któremu poświęca się obecnie coraz większą uwagę, obok problemów rozwoju urządzeń energii odnawialnej, jest zmniejszenie energochłonności urządzeń elektrycznych. Spośród wielu możliwości poprawy bilansu energetycznego urządzeń jest poprawa współczynnika mocy silników elektrycznych stosowanych powszechnie w przemyśle. Poprawiając współczynnik mocy odbiorników zmniejszamy straty energii elektrycznej w wyniku zmniejszenia prądu pobieranego z sieci, a pozytywny efekt będzie tym większy im większej mocy jest silnik oraz im mniej jest obciążony. Dotyczy to także strat mocy w samym silniku. Coraz powszechniejsze stosowanie przemienników częstotliwości do zasilania silników indukcyjnych klatkowych wyposażonych dodatkowo w filtry, w znacznym stopniu poprawiło sprawność energetyczną tych napędów, wprowadzając jednakże straty dodatkowe i zakłócenia. W przemyśle nadal stosowane są dość licznie silniki indukcyjne pierścieniowe, zazwyczaj znacznej mocy [4, 5], pracujące w napędach o rozruchu ciężkim, zasilane bezpośrednio z sieci. Napędy te zazwyczaj nie wymagają regulacji prędkości obroto-

wej. 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 ich rozruchu. Realizacja synchronizacji wymaga jednak rozwiązania pewnych problemów technicznych, z których najistotniejsze to wybór optymalnej chwili załączenia prądu wzbudzenia do uzwojenia wirnika [2, 7] oraz dobranie jego minimalnej wartości tak, aby ograniczyć siły dynamiczne występujące w procesie synchronizacji. W tym celu bardzo istotnym jest właściwy wybór układu sterowania rozruchem i zasilania napięciem stałym uzwojeń wirnika [1, 3, 7]. Niemniej istotnym problemem jest także takie rozwiązanie układu sterowania, aby zapewniał on synchroniczną pracę podczas chwilowych przeciążeń silnika (automatyczna regulacja wzbudzenia) oraz zapewniającą łagodną ponowną synchronizację po utracie synchronizmu w wyniku przeciążenia lub okresowego zmniejszenia wartości napięć zasilających stojan.

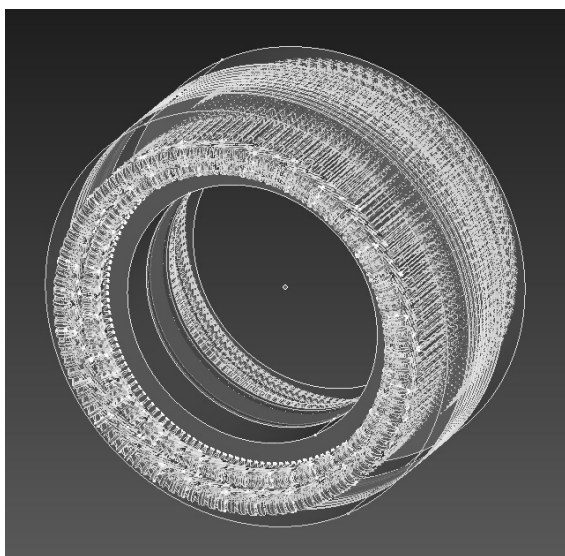
W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych napędu z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym dużej mocy podczas ustalonej pracy synchronicznej oraz przebiegi dynamiczne jakie występują podczas utraty synchronizmu i ponownej synchronizacji silnika. Poznanie powyższych problemów jest bardzo istotne ze względu na niewielką przeciążalność silników asynchronicznych pierścieniowych podczas pracy synchronicznej. W wyniku przeprowadzonej analizy i badań symulacyjnych zaproponowano algorytm sterowania układem połączeń i zasilania uzwojenia wirnika, będącego wzbudnicą silnika, minimalizujący niekorzystne udary prądów oraz momentu w warunkach pracy zakłóceniewej.

2. Analiza procesu utraty synchronizacji silnika pierścieniowego

Badaniom symulacyjnym poddano silnik indukcyjny pierścieniowy typu SAUe-1512r o parametrach zestawionych w tabeli 1.

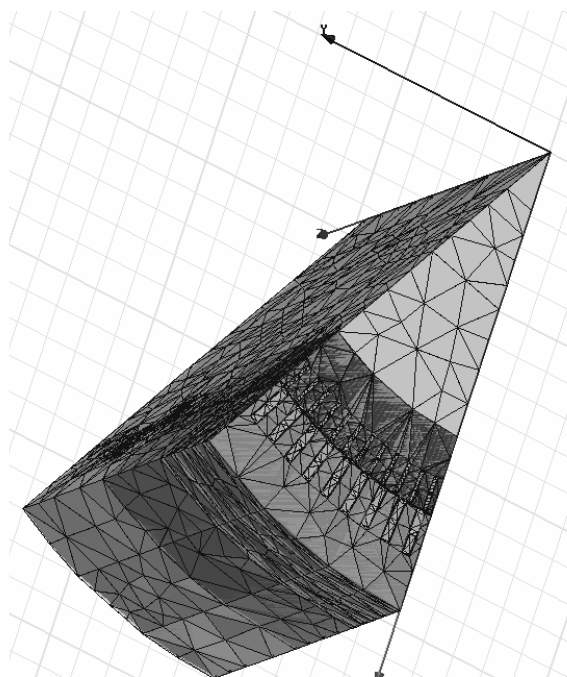
Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika pierścieniowego

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



Rys. 1. Magnetowód modelowanego silnika pierścieniowego

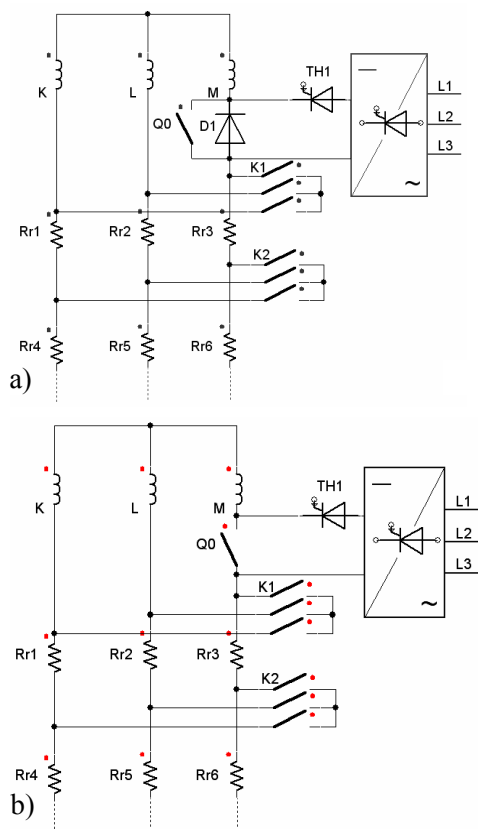
Badania obliczeniowe przeprowadzono wykorzystując opracowany w tym celu polowo-obwodowy model silnika, wykorzystując komercyjne oprogramowanie Maxwell firmy Ansys. W obliczeniach zastosowana została metoda elementów skończonych. Na rysunku 1 pokazano magnetowód oraz uzwojenia badanego silnika pierścieniowego. Na rysunku 2 pokazano fragment magnetowodu wraz z siatką elementów skończonych, wykorzystywanego w części polowej opracowanego modelu obliczeniowego.



Rys. 2. Fragment magnetowodu oraz siatki dyskretnej modelowanego silnika

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 ponowną synchronizację silnika. W celu sprawdzenia wpływu układów zasilania uzwojenia wirnika napięciem stałym na przebieg procesu utraty synchronizacji i pracy asynchronicznej w wyniku chwilowego przeciążenia maszyny oraz procesu ponownej synchronizacji wykonano odpowiednie obliczenia. Przyjęto wypadkowy moment bezwładności $J_z = 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, co odpowiada pracy badanego silnika w napędzie młyna kulowego. Wartość napięcia stałego załączanego do uzwojenia wirnika w chwili ini-

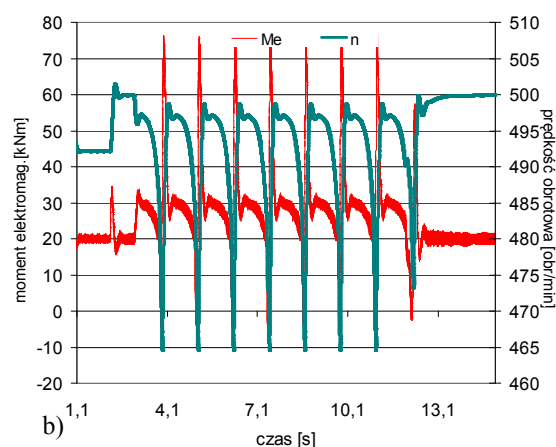
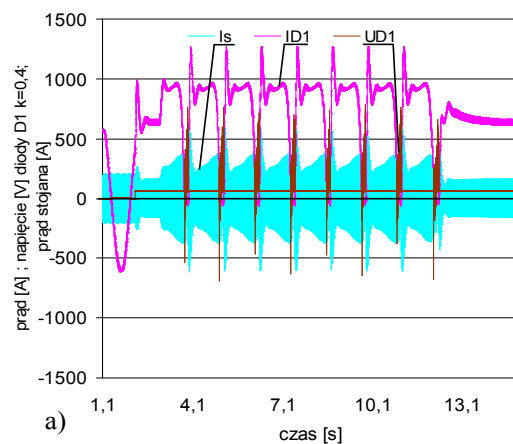
cji procesu synchronizacji ustalono na poziomie zapewniającym w stanie pracy synchronicznej ustaloną prąd wirnika o wartości maksymalnej $1,1I_{2n}$. Uwzględniając układ połączeń uzwojeń wirnika podczas ich zasilania prądem stałym, wartość tego prądu może być zwiększona po wykonaniu sprawdzających obliczeń cieplnych. Wyniki obliczeń dla układu zasilania uzwojenia wirnika [3] z diodą w jednej z faz (rys. 3a) oraz bez diody (rys. 3b) pokazano odpowiednio na rysunkach 4 oraz 5. W chwili $t=3s$ zamodelowano skokowy wzrost obciążenia do wartości $1,5Mn$, a w chwili $t=12s$ obciążenie zostało skokowo zmniejszone do wartości znamionowej. W obu przypadkach (rys. 4 i 5) od chwili inicjacji procesu synchronizacji utrzymywano stałą wartość napięcia zasilającego uzwojenie wirnika.



Rys. 3. Schemat ideowy układu zasilania uzwojenia wirnika prądem stałym: z diodą (a) i bez diody (b)

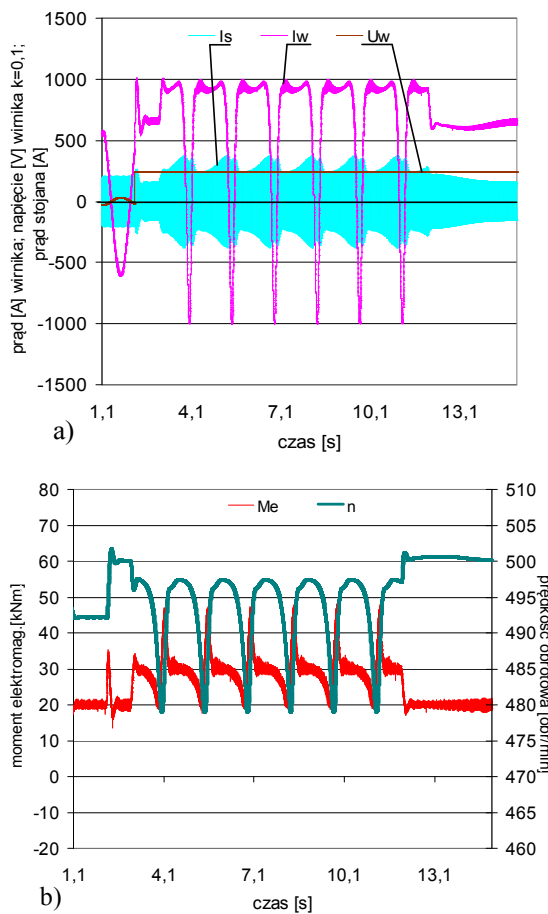
Zastosowanie układu zasilania z diodą w jednej z faz miało na celu uzyskanie prądu półkresowego, którego kierunek był zgodny z prądem wzbudzenia wywołanym załączeniem napięcia stałego. Składowa przemienna prądu sumuje się podczas synchronizacji ze stałym prądem

wzbudzenia, co wpływa korzystnie na przebieg procesu [3, 6], zwiększając moment synchronizujący.



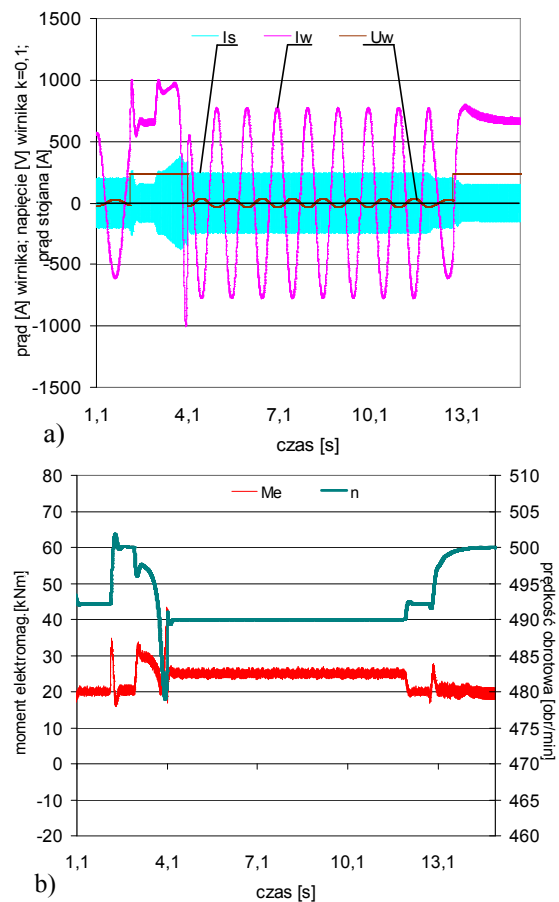
Rys. 4. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji w wyniku przeciążenia - układ zasilania wirnika z diodą

Zastosowanie układu zasilania z diodą wywołało podczas pracy asynchronicznej wzbudzonej maszyny znaczące pulsacje prędkości i udary prądów silnika oraz duże amplitudy zmian wartości chwilowych momentu elektromagnetycznego (rys. 4), co może powodować niekorzystne udary mechaniczne na wale maszyny roboczej i stanowić dodatkowe obciążenie łożysk. Proces ponownej synchronizacji przebiega natomiast łagodnie i w krótkim czasie (rys. 4) po zmniejszeniu momentu obciążenia. Zastosowanie układu zasilania bez diody wpłynęło na zmniejszenie pulsacji prędkości silnika oraz udarów prądów i momentu (rys. 5), ale przebiegi procesów dynamicznych nie można uznać za łagodne.



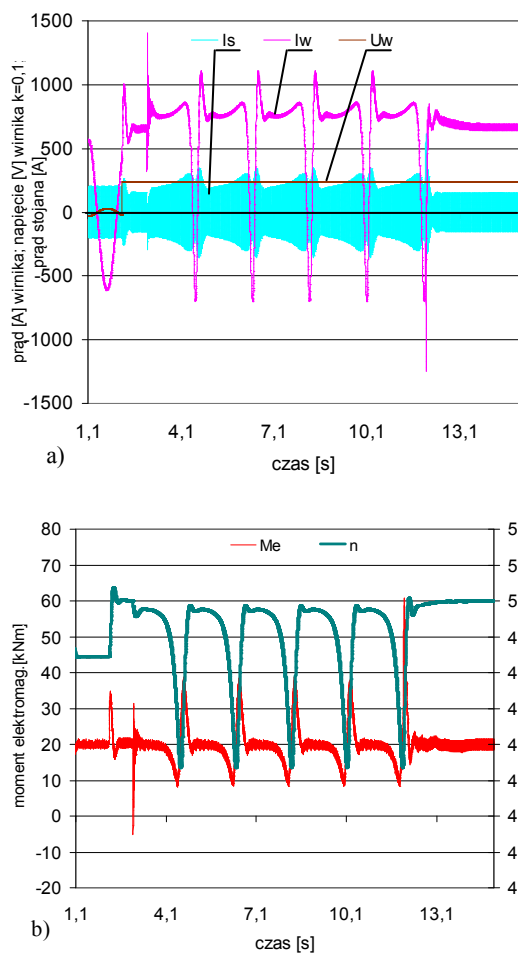
Rys. 5. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji w wyniku przecięcia - układ zasilania wirnika bez diody

Znacznie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowego układu sterowania zapobiegającego pracy asynchronicznej wzbudzonego silnika pierścieniowego. Wyniki obliczeń dla takiego przypadku pokazano na rysunku 6. W obliczeniach w chwili utraty synchronizacji i wzrostu poślizgu silnika napięcie stałe zostało wyłączone ($t=4,2s$), a uzwojenia wirnika połączone w gwiazdę i zwarte przez rezystory ostatniego stopnia rozrusznika (rys. 3b), wykorzystywane później ($t=12,8s$) w procesie synchronizacji. Zaproponowane rozwiązanie praktycznie całkowicie wyeliminowało udary momentu silnika oraz prądów i zminimalizowało pulsację prędkości (rys. 6). Załączenie napięcia stałego w warunkach pracy asynchronicznej ustalonej i wybranej, nie przypadkowej chwili czasowej [3] zapewniło ponowną łagodną synchronizację silnika.



Rys. 6. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji w wyniku przecięcia – okresowe wyłączenia napięcia wzbudzenia

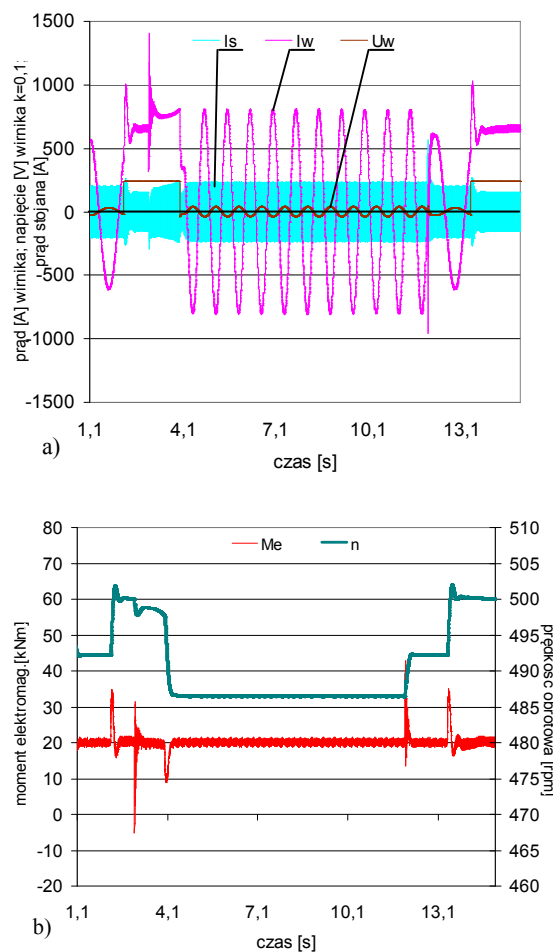
Inną z przyczyn mogących wystąpić zakłóceń w pracy synchronicznej silnika pierścieniowego skutkującą utratą synchronizacji jest okresowe zmniejszenie wartości napięć zasilających wywołane pracą równoległą (rozruch) innych maszyn dużej mocy zasilanych z tego samego transformatora. W celu analizy przebiegów dynamicznych w stanach przejściowych, które wystąpią podczas procesu utraty synchronizmu i ponownej synchronizacji silnika wykonano odpowiednie obliczenia, w których zamodelowano skokowe zmniejszenie wartości napięć zasilających stojan o 20%. W chwili $t=12s$ wartość napięć zasilających została przywrócona do wartości znamionowej. Podczas obliczeń założono stałą wartość napięcia zasilającego uzwojenie wirnika. Wyniki obliczeń dla układu zasilania uzwojeń wirnika bez diody pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji w wyniku zmniejszenia wartości napięć zasilających stojan

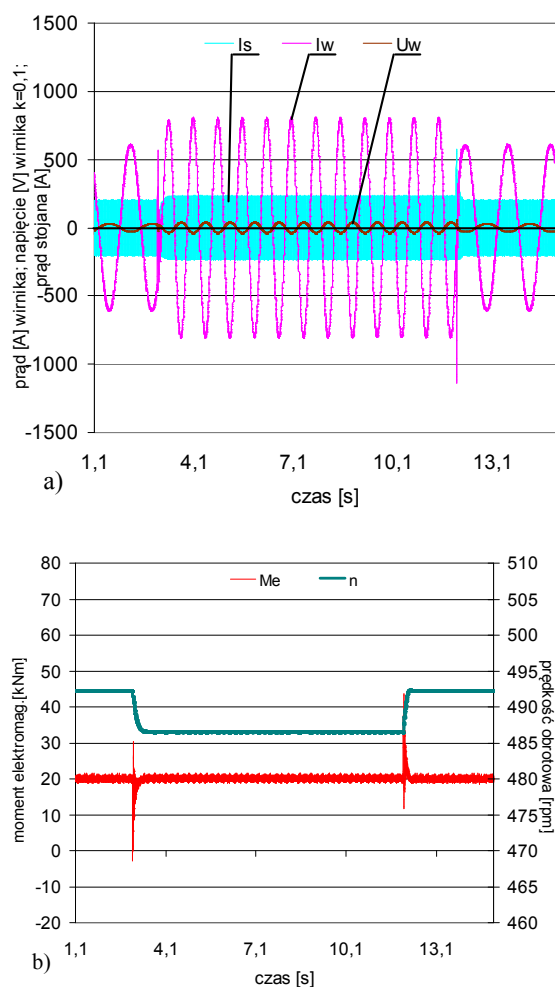
Przebieg procesu utraty synchronizacji (rys. 7) wywołanego okresowym zmniejszeniem wartości napięć zasilających stojan jest zbliżony do procesu wywołanego okresowym przeciążeniem silnika (rys. 5). Również przebiegi dynamiczne towarzyszące pracy asynchronicznej wzbudzonej maszyny pierścieniowej oraz procesu ponownej synchronizacji są w obu przypadkach zbliżone. Również korzystnym rozwiązaniem będzie zastosowanie dodatkowego układu sterowania zapobiegającego pracy asynchronicznej wzbudzonego silnika. Wyniki obliczeń procesu z wykorzystaniem dodatkowego układu pokazano na rysunku 8. W obliczeniach w chwili utraty synchronizacji w wyniku okresowego zmniejszenia wartości napięć zasilających stojan napięcie stałe zasilające wzbudnicę zostało wyłączone ($t=4s$), a uzwojenia wirnika połączone w gwiazdę i zwarte przez rezystory ostatniego stopnia rozrusznika, wykorzysta-

wane później ($t=13,4s$) w procesie ponownej łagodnej synchronizacji.



Rys. 8. Przebiegi czasowe podczas chwilowej utraty synchronizacji w wyniku zmniejszenia wartości napięć zasilających stojan – okresowe wyłączenie napięcia wzbudzenia

Przyjęty algorytm sterowania układem połączeń uzwojenia wirnika oraz napięciem wzbudzenia praktycznie całkowicie wyeliminował udary momentu silnika oraz prądów i zminimalizował pulsację prędkości, zapewniając przebiegi stanów przejściowych zbliżone do typowej pracy asynchronicznej silnika pierścieniowego przy okresowej zmianie wartości napięć zasilających stojan (rys. 9).



Rys. 9. Przebiegi czasowe podczas chwilowego zmniejszenia wartości napięć zasilających stajan – praca asynchroniczna silnika

3. Wnioski

Przeprowadzona analiza i badania symulacyjne zachowania się silnika indukcyjnego pierścieniowego podczas pracy synchronicznej umożliwiły poznanie występujących stanów dynamicznych i ich związków z budową układu zasilania uzwojeń prądem stałym oraz algorytmu jego sterowania. Konstrukcja układu zasilania uzwojenia prądem stałym i algorytm jego sterowania ma istotny wpływ na wielkość i czas trwania stanów dynamicznych, a tym samym narażeń silnika. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia minimalizację stanów dynamicznych w procesach przejściowych oraz poprawną pracę silnika indukcyjnego pierścieniowego podczas pracy synchronicznej.

4. 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]. Azarewicz S., Zalas A., Zawilak J.: *Praca synchroniczna silników indukcyjnych pierścieniowych*, Ryto 25-27.05.2011, Katowice, BOBRME KOMEL 2011, nr 91, 99–102.
- [4]. Glinka T.: *Zużycie energii elektrycznej w układach napędowych przenośników taśmowych*, Katowice, BOBRME KOMEL 2005, nr 73, 37–42.
- [5]. Przybylski J.: *Napęd odwracalny w elektrowni szczytowo - pompowej*, Katowice, BOBRME KOMEL 2005, nr 72, 119–124.
- [6]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998r.
- [7]. 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