

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

Stanisław AZAREWICZ, Adam ZALAS, Paweł ZALAS*

AWARYJNE STANY PRACY SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PIERŚCIENIOWYCH

Przedstawiono analizę zjawisk dynamicznych, które mogą wystąpić podczas pracy synchronicznej silnika indukcyjnego pierścieniowego. Zjawiska te spowodowane są typowymi stanami zakłóceniami jakie mogą wystąpić w układzie zasilania silnika. Do nich należy zaliczyć: obniżenie napięcia spowodowane procesami technologicznymi lub rozruchem silników dużej mocy, niesymetryczne obniżenie napięć fazowych spowodowane stanami awaryjnymi sieci, chwilowy zanik napięcia zasilania itp. Zjawiska te mogą wystąpić podczas pracy silnika, dlatego istotne jest poznanie ich wpływu na przebieg i wartość momentów dynamicznych, prądów i prędkości silnika pierścieniowego pracującego w stanie synchronicznym. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wybranych zakłóceń oraz sformułowano wnioski i zalecenia eksploatacyjne dla tego typu napędów.

1. WSTĘP

W napędach przemysłowych charakteryzujących się rozruchem ciężkim wykorzystywane są silniki indukcyjne pierścieniowe jak również silniki asynchroniczne zsynchronizowane typu SAS, głównie tam, gdzie w stanie pracy normalnej moment obciążenia jest niewielki i możliwe jest wykorzystanie tych silników jako kompensatorów mocy bierniej.

Istotną wadą silników SAS jest ich konstrukcja wirnika wymagająca wprowadzenia jednej z faz o zwiększonym przekroju. W rezultacie silniki są droższe, trudniejsze w konstrukcji a przez to produkowane są jednostkowo do określonego zastosowania. Silniki pierścieniowe typowej konstrukcji są dość powszechnie stosowane a produkcja ich należy do dobrze opanowanych. W wielu przypadkach silniki te po dokonaniu rozruchu urządzenia pracują w niedociążeniu [3, 4, 5, 8] i mogłyby być wprowadzone w synchronizm poprzez zasilenie ich uzwojeń wirnika prądem stałym. Rozwiązanie to ma jednak istotne wady. Moment synchroniczny tych silników jest stosunkowo mały [1, 2]. Także moment

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

synchronizujący jest niewielki, co utrudnia wprowadzenie tych silników w synchronizm typowymi metodami.

Problem ten został rozwiązany poprzez zastosowanie odpowiedniego sterowania przebiegiem rozruchu i synchronizacji silników indukcyjnych pierścieniowych [1, 2, 6, 7, 9, 10]. Zaletą pracy synchronicznej tych silników jest istotna poprawa parametrów energetycznych, sprawności i współczynnika mocy, co w warunkach konieczności optymalizacji energetycznej napędów ma istotne znaczenie [4]. Stosunkowo mały moment synchroniczny silników powoduje, że są one mniej odporne na pojawiające się zakłócenia zasilania od typowych silników synchronicznych. Dlatego też istotne jest poznanie zjawisk jakie mogą wystąpić podczas typowych zakłóceń napięcia zasilającego. W tym celu przeprowadzono komputerowe badania symulacyjne napędu z wybranym silnikiem pierścieniowym pracującym w stanie synchronicznym. Badaniom poddano zachowanie silnika podczas chwilowego zaniku napięcia, spadku napięcia oraz zmniejszenia napięcia w jednej fazie zasilającej. Wyniki badań przedstawiono na wykresach a także porównano uzyskane wyniki ze skutkami, jakie by wystąpiły, gdyby silnik pracował w stanie pracy asynchronicznej. Na podstawie uzyskanych wyników badań przedstawiono wnioski i zalecenia dotyczące eksploatacji silników asynchronicznych pierścieniowych wprowadzonych do pracy synchronicznej.

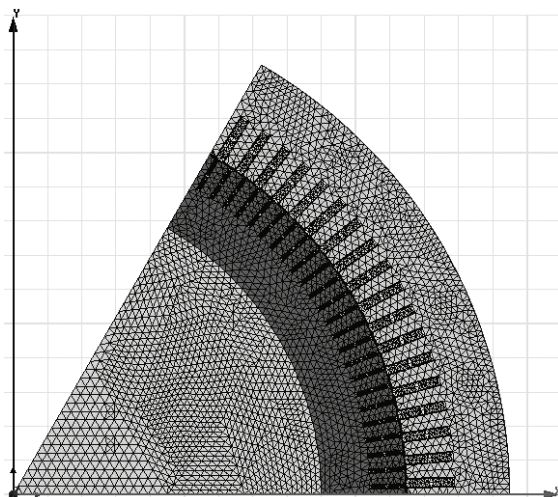
2. BADANIA PORÓWNAWCZE ZJAWISK DYNAMICZNYCH W STANACH ZAKŁÓCENIOWYCH ZASILANIA SILNIKA

2.1. MODEL OBLICZENIOWY BADANEGO SILNIKA

Badaniom symulacyjnym poddano silnik indukcyjny pierścieniowy o parametrach zestawionych w tabeli 1. Obliczenia przeprowadzono metodą FEM wykorzystując komercyjne oprogramowanie Maxwell firmy Ansys. Opracowano dwuwymiarowy, połowobwodowy model obliczeniowy silnika. W części obwodowej modelu wykorzystując symetrię zamodelowano tylko część magnetowodu silnika. Fragment magnetowodu badanego silnika wraz z siatką elementów skończonych pokazano na rysunku 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



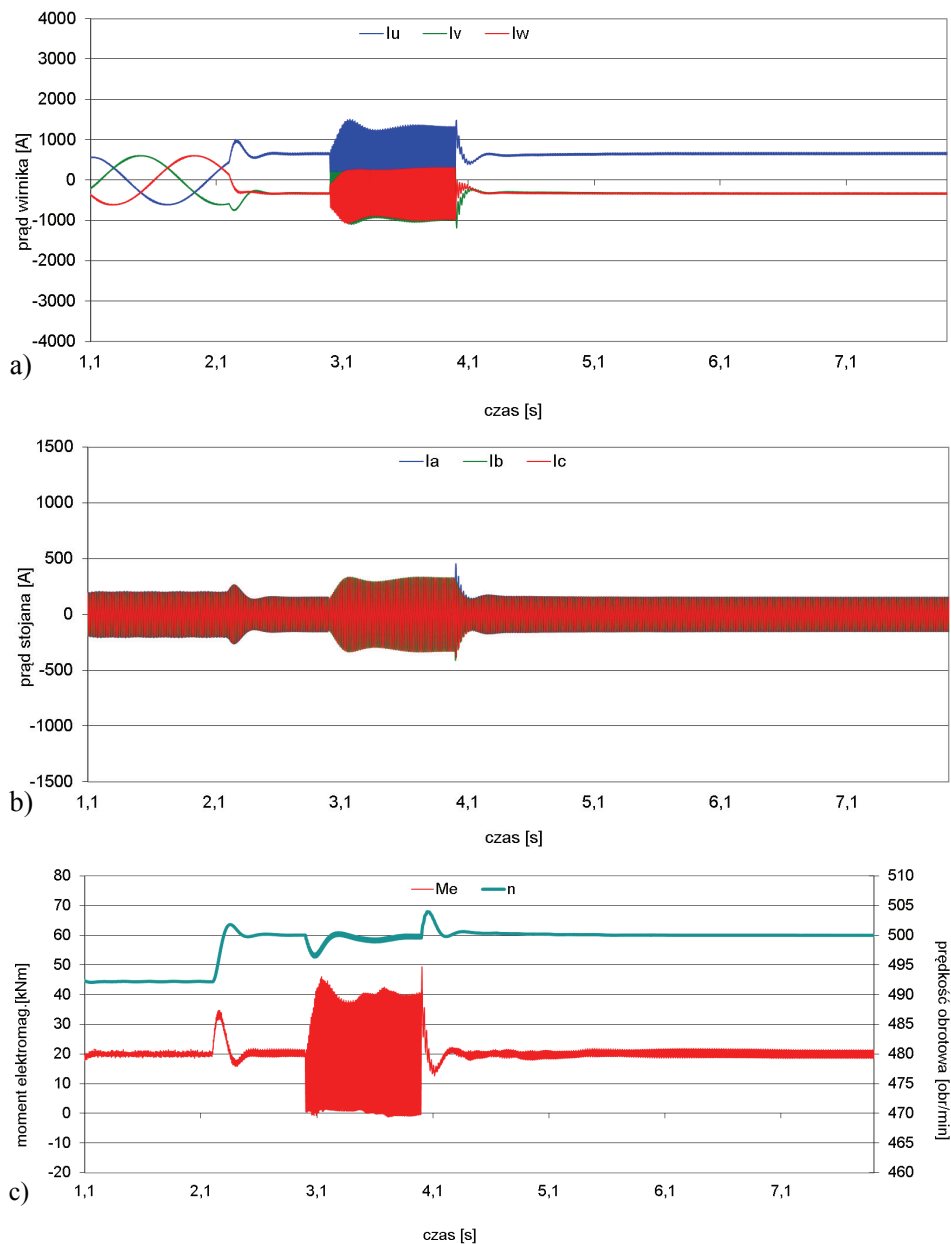
Rys. 1. Fragment magnetowodu oraz siatki dyskretyzacyjnej modelowanego silnika

Podczas obliczeń pracy silnika rozruch dokonywany był w sposób tradycyjny z wykorzystaniem rozrusznika rezystancyjnego. Po ustaleniu się prędkości podsynchronicznej w obliczeniach pracy synchronicznej silnika 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, przedstawiono w pracach [1, 2]. W części obwodowej modelu uwzględniono również rzeczywiste układy połączeń oraz zasilania uzwojeń stojana.

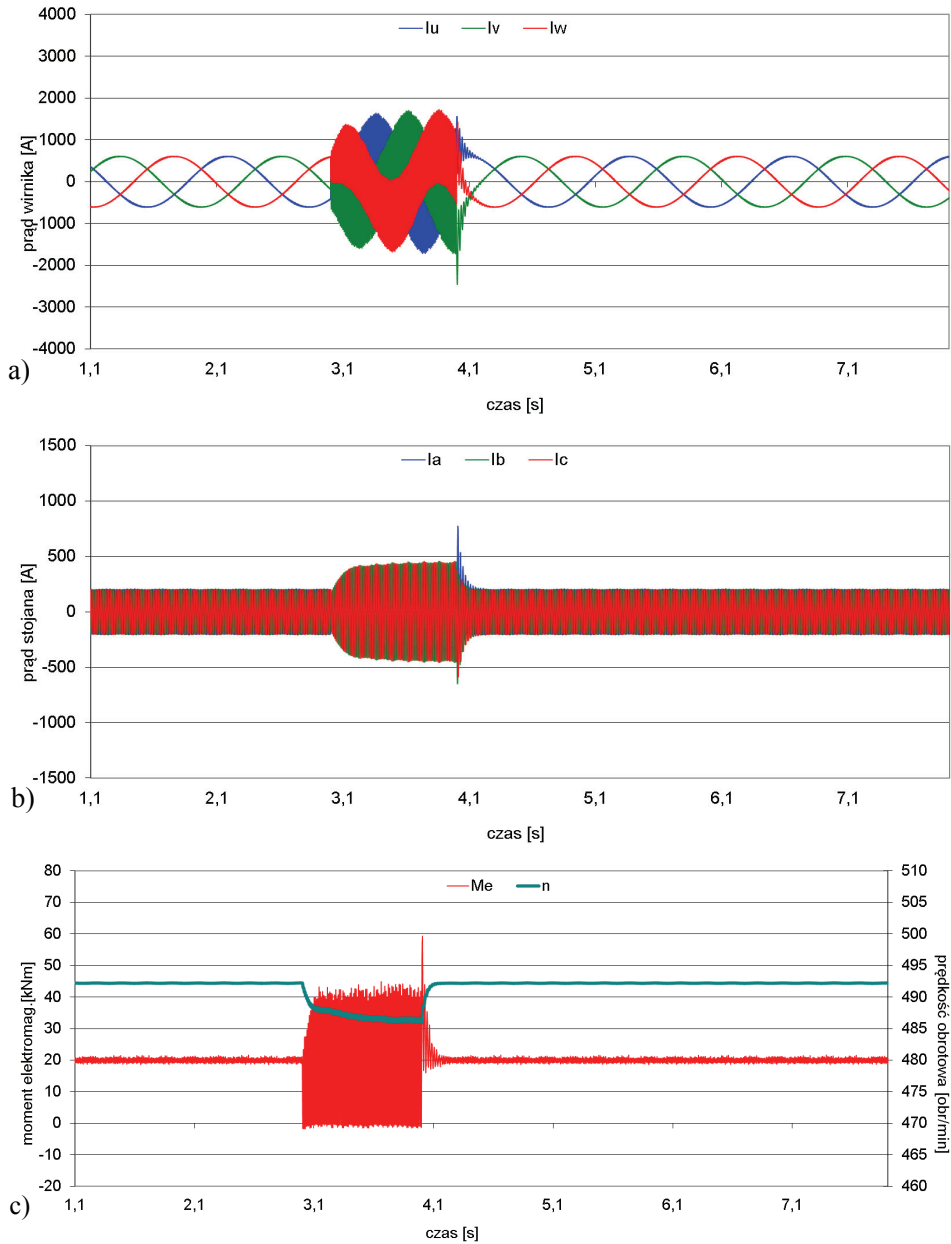
2.2. WYNIKI BADAŃ OBLICZENIOWYCH

Wykorzystując opracowany model silnika pierścieniowego dużej mocy wykonano obliczenia pracy układu napędowego w stanie synchronicznej oraz asynchronicznej pracy silnika. Wyniki obliczeń zachowania się silnika odpowiednio: dla chwilowego zaniku napięcia w jednej fazie zasilającej (rys. 2, 3), chwilowego zaniku napięć zasilających (rys. 4, 5) oraz spadku wartości napięć (rys. 6, 7) przedstawiono w postaci przebiegów czasowych prądów wirnika (a), prądów stojana (b) oraz momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej (c). Przyjęto, że czas wystąpienia każdego z rodzajów zakłóceń w zasilaniu badanego silnika wynosił $t_z = 1$ s, a zamodelowane skokowe zmniejszenie wartości napięć zasilających stojan wynosiło 20% napięcia znamionowego. Obliczenia wykonano dla znamionowej wartości momentu obciążenia silnika oraz momentu bezwładności $J_z = 1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (dwukrotnie większej od momentu inercji samego wirnika). Wartość napięcia stałego załączanego do uzwojenia wirnika podczas procesów synchroni-

zacji ustalono na poziomie zapewniającym w stanie pracy synchronicznej ustalonej prąd wirnika o wartości maksymalnej $1,41I_{2n}$.



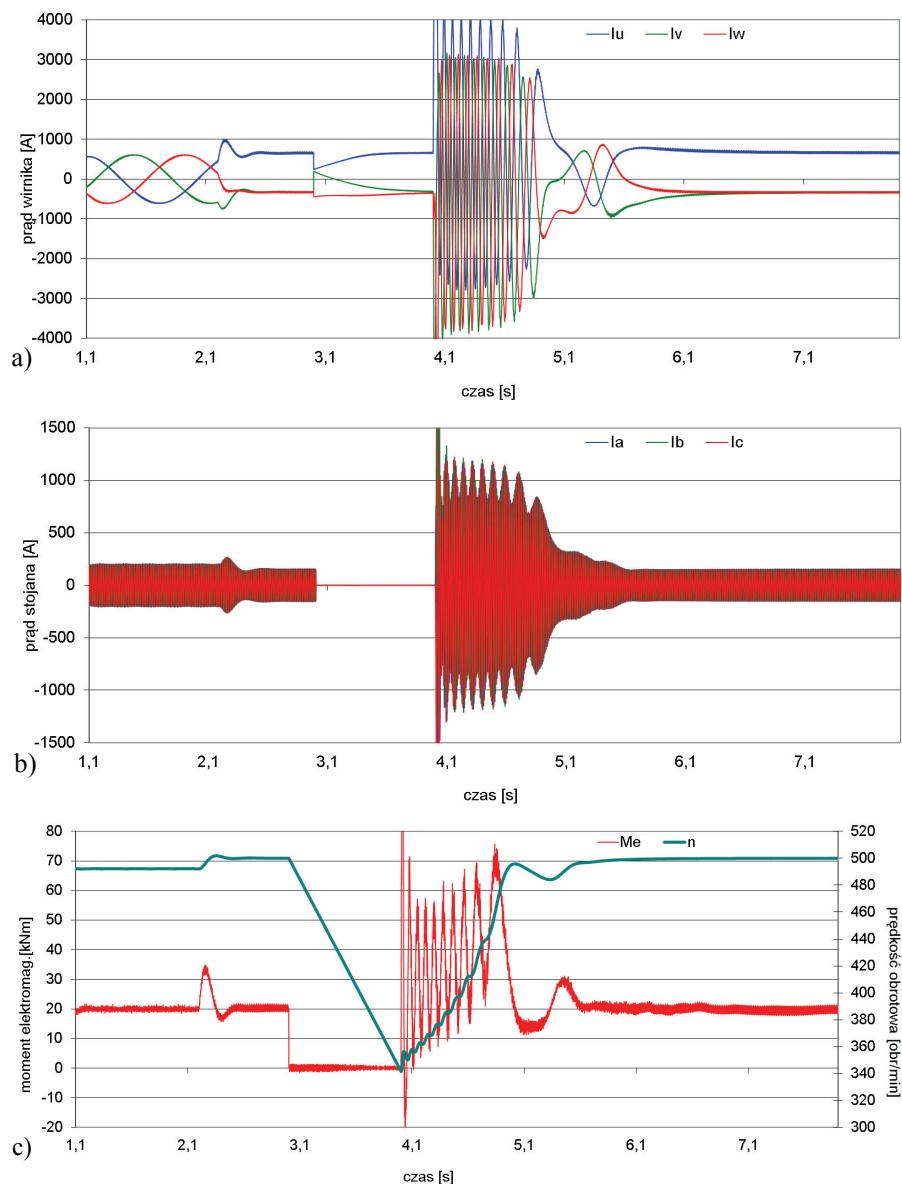
Rys. 2. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy synchronicznej silnika pierścieniowego przy chwilowej utracie napięcia w jednej z faz zasilających



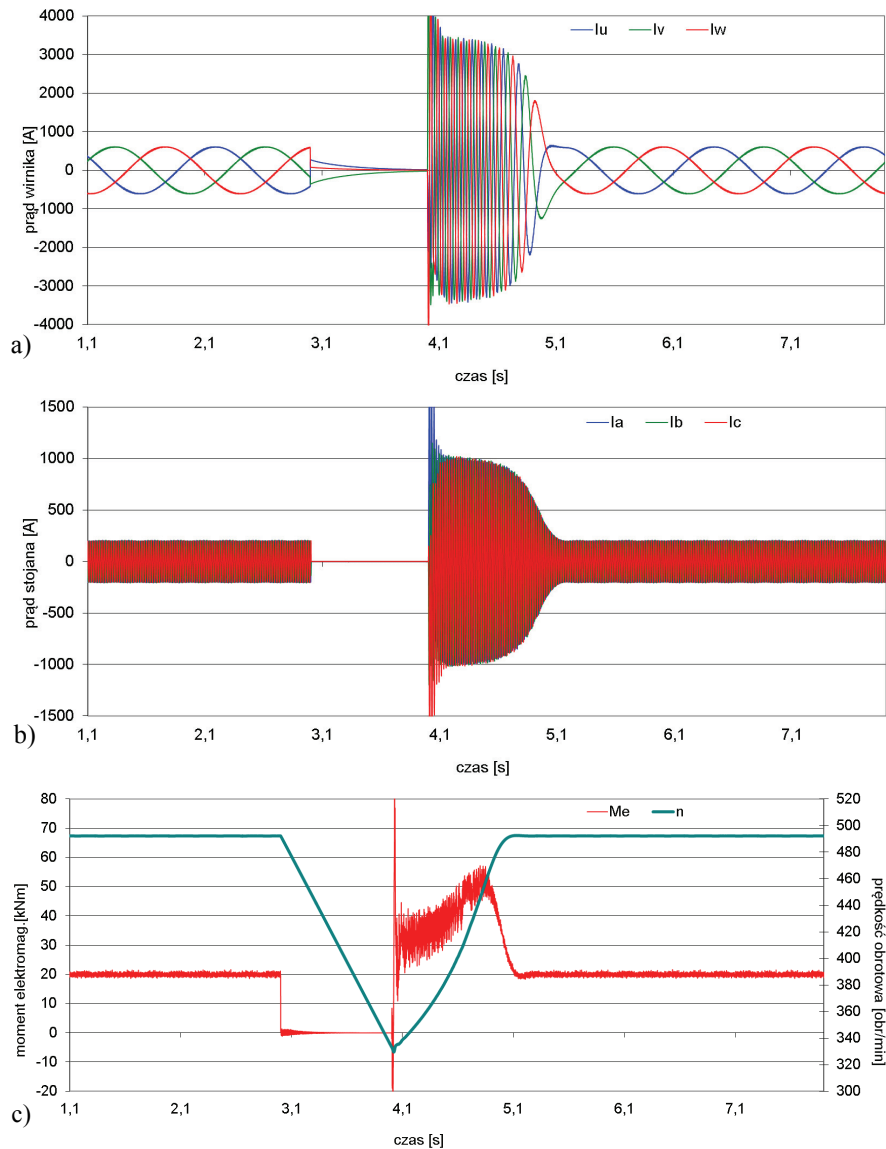
Rys. 3. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy asynchronicznej silnika pierścieniowego przy chwilowej utracie napięcia w jednej z faz zasilających

Porównując uzyskane przebiegi można zauważyć, że dla pracy synchronicznej silnika (rys. 2) wzrost wartości prądu stojana oraz wypadnięcie z synchronizmu nie sta-

nowi istotnego zagrożenia dla pracy napędu, zaś powrót napięcia zasilania powoduje ponowną synchronizację napędu. Chwilowe przebiegi dynamiczne prądu i momentu w stanie zakłócenia pracy silnika nie są większe niż to ma miejsce w przypadku pracy asynchronicznej (rys. 3) i nie stanowią zagrożenia.



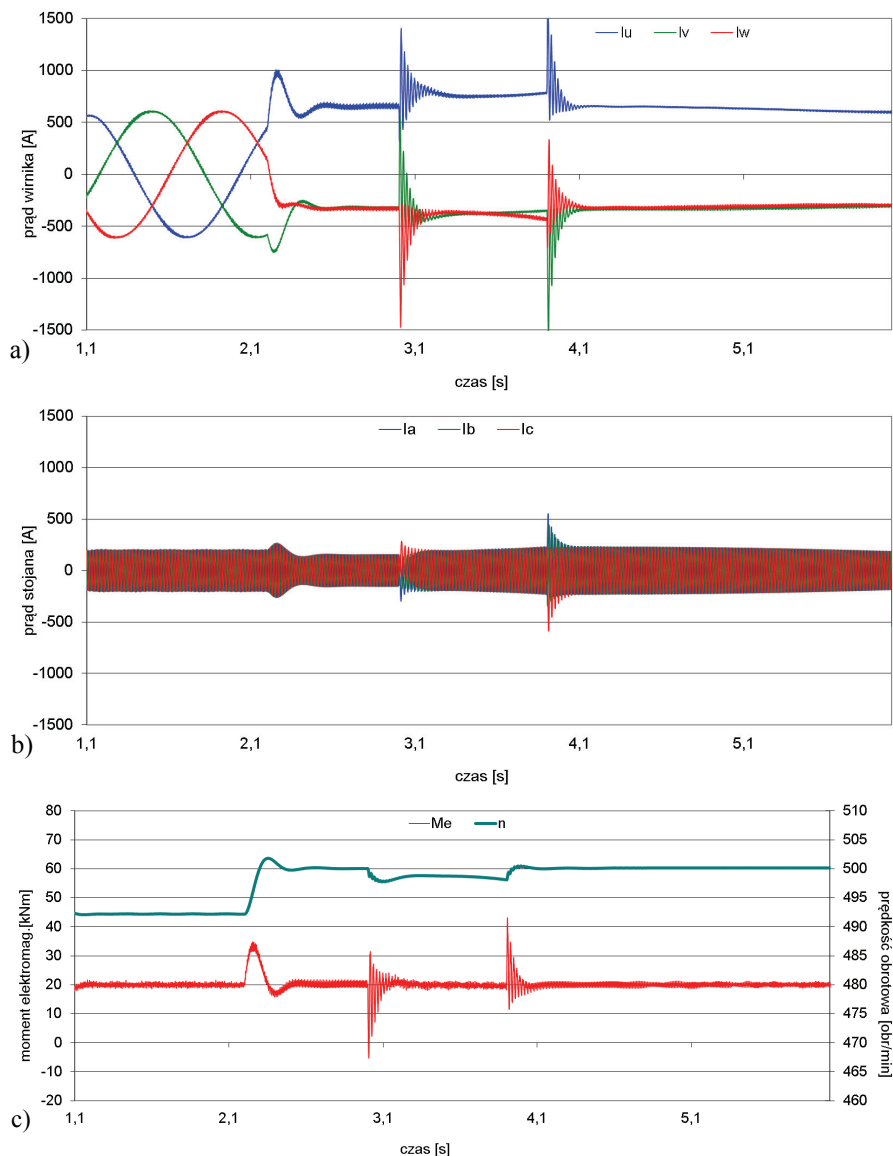
Rys. 4. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy synchronicznej silnika pierścieniowego i chwilowej utracie napięć zasilających



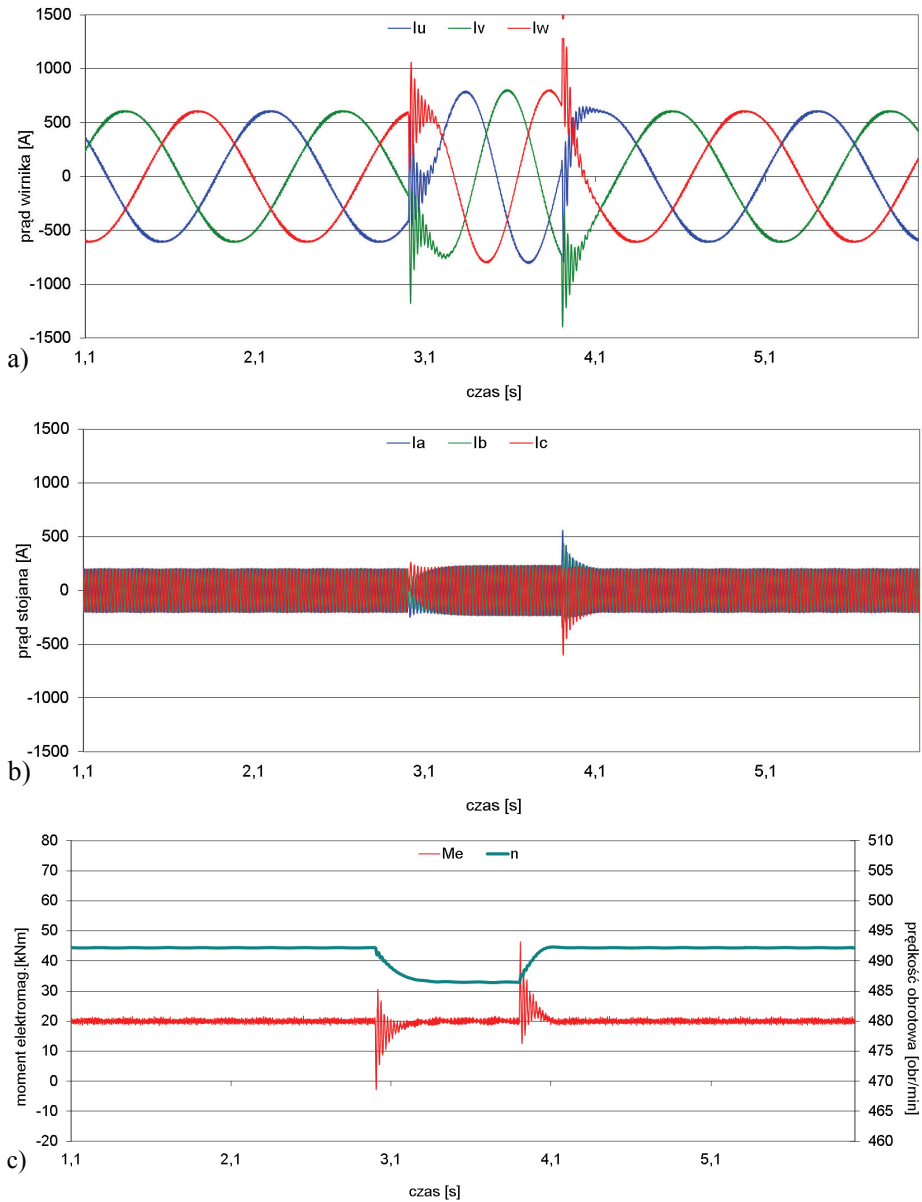
Rys. 5. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy asynchronicznej silnika pierścieniowego i chwilowej utracie napięć zasilających

Chwilowa utrata napięć zasilających powinna skutkować ponownym rozruchem silnika i przebiegiem jego synchronizacji. Pominięcie procesu ponownego rozruchu, jak wynika z przedstawionych badań, skutkuje istotnym narażeniem dynamicznym i prądowym silnika pracującego zarówno w stanie pracy asynchronicznej (rys. 5), jak i synchronicznej (rys. 4). Ze względu na wymagania procesów technologicznych co do czasu trwania stanu

awaryjnego należy dokonać analizy umożliwiającej takie sterowanie rezystancją rozruchową jak i prądem wzbudzenia silnika aby ten czas skrócić do minimum przy jednoczesnym zminimalizowaniu stanów dynamicznych. Istotny jest także czas trwania utraty zasilania, zarówno dla pracy asynchronicznej, jak i synchronicznej ze względu na procesy nieustalone w silniku.



Rys. 6. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy synchronicznej silnika pierścieniowego i chwilowego zmniejszenia wartości napięć zasilających



Rys. 7. Przebiegi czasowe badanych wielkości podczas pracy asynchronicznej silnika pierścieniowego i chwilowego zmniejszenia wartości napięć zasilających

Chwilowe obniżenie napięcia przy pracy synchronicznej zależnie od wartości tego obniżenia i szybkości reakcji układów wzbudzenia skutkować może wypadnięciem silnika z synchronizmu. Ten przypadek stanu awaryjnego napędu nie stanowi zagrożenia dla

silnika przy pracy asynchronicznej (rys. 7), zwiększając jego poślizg i straty, natomiast przy pracy synchronicznej może wystąpić utrata synchronizmu i związane z tym niekorzystne zjawiska przejściowe (rys. 6). Wzrost napięcia spowoduje ponowną, automatyczną synchronizację.

3. WNIOSKI

Analizując uzyskane wyniki badań porównawczych zachowania silnika w stanie pracy asynchronicznej i synchronicznej podczas typowych zakłóceń napięcia zasilającego można stwierdzić:

- Chwilowy zanik napięcia zasilającego jednej z faz skutkuje zmniejszeniem momentu synchronicznego i w rezultacie wypadnięciem silnika z synchronizmu co związane jest z wystąpieniem zwiększonego prądu zasilającego pozostałych faz oraz niekorzystnym wzrostem momentu dynamicznego. Analogiczne zjawiska wystąpią podczas pracy asynchronicznej silnika, a przebieg momentu dynamicznego i prądu stojana są większe niż przy pracy synchronicznej. Należy zatem stwierdzić, że to zakłócenie nie stanowi zagrożenia dla pracy synchronicznej silnika indukcyjnego pod warunkiem, że jest krótkotrwałe.
- Chwilowy zanik napięcia zasilania powodujący istotne zmniejszenie prędkości obrotowej wymaga bezwzględnie przeprowadzenia ponownego procesu rozruchu i synchronizacji silnika. Załączenie napięcia z pominięciem procesu rozruchu może skutkować istotnymi narażeniami prądowymi i dynamicznymi. Przy krótkotrwałych zanikach napięcia zasilania, gdy spadek prędkości jest nieznaczny, należy rozważyć indywidualnie sposób sterowania ponowną synchronizacją silnika.
- Chwilowe obniżenie napięcia może powodować wypadnięcie z synchronizmu silnika, jeżeli reakcja układów wzbudzenia będzie zbyt wolna. Przy prawidłowo działającym układzie sterowania prądem wzbudzenia silnika i krótkim czasie trwania obniżenia nie wystąpi zjawisko wypadnięcia z synchronizmu silnika.

Podsumowując wyniki badań można stwierdzić, że badane zakłócenia nie stanowią zagrożenia dla pracy synchronicznej silnika indukcyjnego pierścieniowego. Możliwe jest zatem wprowadzenie do eksploatacji tego typu rozwiązania wszędzie tam, gdzie nie występują nagle przeciążenia w układzie napędowym.

LITERATURA

- [1] AZAREWICZ S., ZALAS A., ZALAS P., *Stany dynamiczne w pracy synchronicznej silników indukcyjnych pierścieniowych*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2013, nr 98, 143–148.

- [2] AZAREWICZ S., ZALAS A., ZALAS P., *Badania symulacyjne procesu synchronizacji silników indukcyjnych pierścieniowych*, Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Studia i Materiały, Nr 31, 2011, 41–54.
- [3] PODDAR G., RANGANATHAN V.T., *Direct torque and frequency control of double-inverter-fed slip-ring induction motor drive*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, Iss. 6, 2004, 1329–1337.
- [4] SCHACHTER N., RUESCH U., *Synchronous and slip-ring induction motors drive cement mills*, Industry Applications Magazine, IEEE, Vol. 6, Iss. 4, 2000, 22–35.
- [5] SINGH B.K., NAIK K.B., *Design of microprocessor based closed-loop slip power recovery control of slip ring induction motor drive*, 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2001. Proceedings, 2001, Vol. 1, 49–52.
- [6] 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.
- [7] STAATS G.W., *Maximum permissible slip for synchronizing salient-pole synchronous motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 3, 1987.
- [8] VERMA V., MAITI S., CHAKRABORTY C., *Sensorless control of grid-connected doubly-fed slip-ring induction motor drive*, Industrial Electronics, 2009, IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, 2009, 1276–281.
- [9] ZALAS P., *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.
- [10] 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, BOBRME „Komel”, Katowice 2006, 83–88.

EMERGENCY OPERATION OF SLIP-RING INDUCTION MOTORS

The paper presents the analysis of dynamic phenomena that may occur during synchronous operation of slip-ring induction motors. These phenomena are caused by the typical conditions that may occur in the motor. To them include: voltage reduction caused by technological processes or start high power motors, unbalanced phase voltages decrease caused by emergency power system conditions, momentary lack of supply voltages, etc. These phenomena may occur under normal operating conditions is therefore important to assess their influence on the course and value of dynamic torques, currents and rotational speed of slip-ring induction motor operating in the synchronous state. The article presents the results of simulations of selected interference and formulated conclusions and recommendations for this type of drive.