

## Rozruch silnika synchronicznego z rozdzielonymi uzwojeniami stojana i mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania symulacyjne oraz weryfikację pomiarową rozruchu silnika synchronicznego jawnobiegunowego dużej mocy z dzielonymi uzwojeniami stojana. Sterowanie procesem rozruchu realizowane jest przez mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia. Rozpatrzono przypadki rozruchu z zasilaniem części oraz całości uzwojeń stojana oraz z włączonym lub wyłączonym dławikiem rozruchowym. Przedstawiono model symulacyjny programu PSpice oraz uzyskane wyniki. Zamieszczono przebiegi pomiarowe uzyskane na obiekcie rzeczywistym.

**Abstract.** The article presents simulation study and measurement verification of start-up process of the large-power salient-pole synchronous motor with separated stator windings. Control of start-up process is realized by the microprocessor controlled unit for synchronous motor excitation supply. Start-up process with supplying the part or the whole stator windings and with or without the start-up reactor are analysed. PSpice model and simulation result are presented. Measurements obtained from the real object are included. (**Starting of synchronous motor with separated stator windings and microprocessor controlled excitation unit**)

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny, sterowanie mikroprocesorowe, rozruch asynchroniczny, uzwojenia rozdzielone

**Keywords:** synchronous motor, microprocessor control, asynchronous start-up, separated windings

### Wstęp

Wolnoobrotowe silniki synchroniczne, wykonywane jako silniki z biegunami jawnymi, wykorzystywane są w układach napędowych wentylatorów, pomp, sprężarek itp. Dla silników o dużej mocy i dużym momencie bezwładności, rozruch takiego układu napędowego uznaje się za trudny.

Niewłaściwie przeprowadzona procedura rozruchu może doprowadzić do utknięcia silnika na prędkości podsynchronicznej, długotrwałej pracy z prądem większym od znamionowego oraz oscylacji prędkości obrotowej, pulsacji momentu elektromagnetycznego, znacznych przeciążeń mechanicznych na wale silnika i przyspieszonego zużycia łożysk. Prądy rozruchowe kilkakrotnie przekraczają wartości prądów znamionowych, co powoduje znaczne nagrzewanie uzwojeń silnika. Rozruch silników dużej mocy jest więc jednym z najważniejszych zagadnień eksploatacyjnych.

Najprostszą metodą rozruchu silnika jawnobiegunowego jest rozruch asynchroniczny bezpośredni, polegający na bezpośrednim włączeniu silnika do sieci zasilającej [1, 2, 3]. Wadą tej metody jest duży prąd rozruchowy powodujący spadki napięcia w sieci zasilającej.

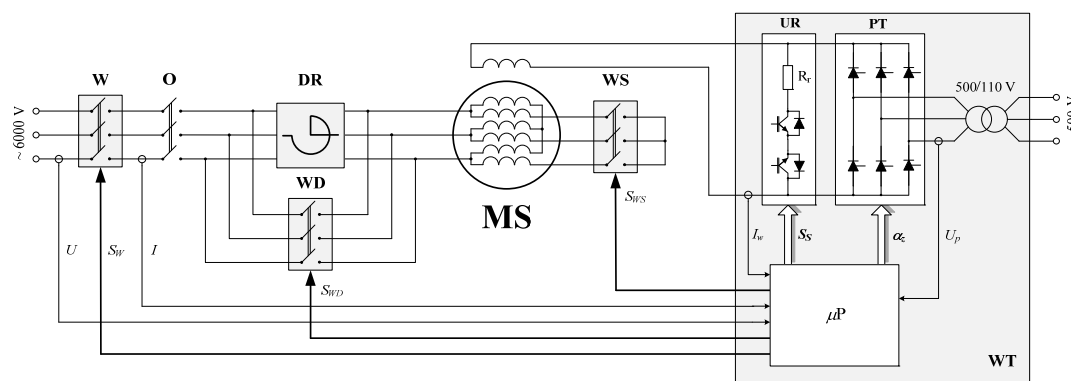
W celu ograniczenia wpływu prądu rozruchowego na sieć zasilającą stosuje się metody łagodzenia skutków rozruchu.

Jedną z nich jest rozruch z rozrusznikiem stojanowym w postaci dławika rozruchowego [1, 2, 4, 5].

Na skutek impedancji dławika włączonej szeregowo do uzwojeń stojana zmniejsza się prąd rozruchowy silnika, a napięcie na silniku pomniejszone jest o spadek napięcia na dławiku, co skutkuje obniżeniem momentu rozruchowego [6, 7, 8]. W końcowym etapie rozruchu prąd rozruchowy maleje, zwiększa się napięcie na silniku i zwiększa się moment rozwijany przez silnik. Dławik zwierany jest przy prędkości bliskiej prędkości synchronicznej.

W silnikach o specjalnej konstrukcji, z rozdzielonymi uzwojeniami stojana, możliwe jest łagodzenie skutków rozruchu poprzez zasilanie jedynie części uzwojenia [7, 9, 10, 11]. Nie zasilane części uzwojeń pozostają w stanie otwartym, bądź przyłącza się do nich baterię kondensatorów. Kondensator jest źródłem prądu biernego pobieranego przez silnik. W ten sposób odciąża się sieć zasilającą od przepływu tego prądu. Po osiągnięciu odpowiedniej prędkości następuje zmiana konfiguracji uzwojeń stojana, odłączenie baterii kondensatorów i podanie napięcia na pełne uzwojenia.

Celem artykułu jest analiza możliwości łagodzenia skutków rozruchu poprzez zastosowanie przełączalnych uzwojeń stojana silnika synchronicznego oraz dławika rozruchowego.



Rys.1. Schemat układu sterowania silnika z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia i dławikiem rozruchowym: MS – silnik synchroniczny, WT – blok zasilania wzbudzenia,  $\mu P$  – system mikroprocesorowy, PT – prostownik tyrystorowy, UR – układ rozruchowy, W – wyłącznik, O – odłącznik, WD – wyłącznik dławika, DR – dławik rozruchowy, WS – wyłącznik przełączania konfiguracji uzwojeń stojana

## Silnik synchroniczny z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania silnika z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia [12].

Urządzenie opracowane przy współudziale autora jest przeznaczone do współpracy z silnikami synchronicznymi o napięciu zasilania 6 kV i prądzie wzbudzenia do 400 A.

Sterowanie rezystorem rozruchowym zrealizowane jest z wykorzystaniem kluczy tranzystorowych umożliwiających przepływ dwukierunkowego prądu indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia podczas rozruchu asynchronicznego. Zastosowanie układu tranzystorowego pozwala wyeliminować powszechnie stosowane i awaryjne układy stycznikowe. Sterowanie prądem wzbudzenia odbywa się poprzez zmianę kąta wysterowania tyrystorów mostka tyrystorowego.

Urządzenie może pracować w sposób autonomiczny, lub jako element wykonawczy w systemie zarządzanym przez zewnętrzny sterownik nadrzędny [12, 13, 14].

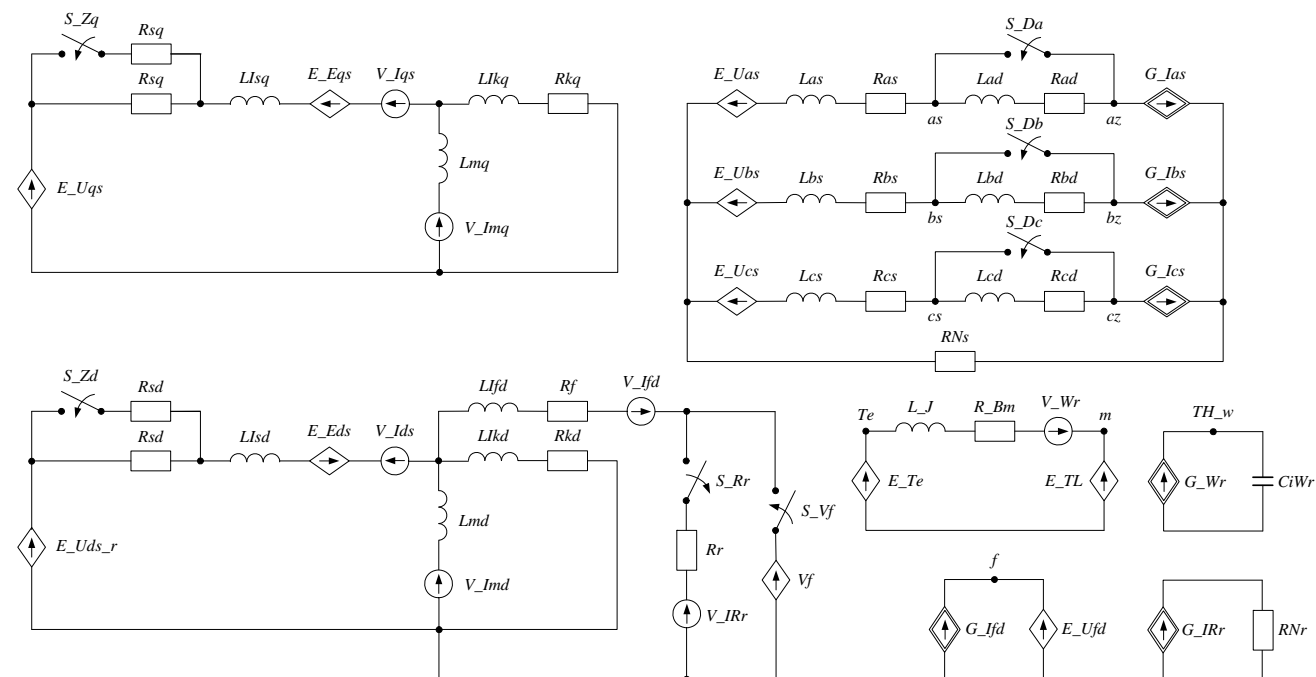
Algorytmy programowe zaimplementowane w systemie mikroprocesorowym umożliwiają realizację procedur rozruchowych, regulacji mocy biernej lub prądu wzbudzenia w trakcie pracy synchronicznej, forsowanie wzbudzenia w przypadku zapadu napięcia zasilającego oraz wyłączenia silnika z rozładowaniem energii obwodu wzbudzenia poprzez wysterowanie mostka tyrystorowego do pracy falownikowej [15].

Możliwe jest przeprowadzenie rozruchu w układzie tradycyjnym, układzie z dławikiem rozruchowym oraz w układzie z przełączalnymi uzwojeniami stojana silnika. Procedura rozruchowa może być realizowana według różnych, parametryzowanych algorytmów, m.in. algorytmów czasowych, prądowych, prędkościowych i częstotliwościowych [3, 12].

## Obiekt badań

Obiektem badań był silnik synchroniczny jawnobiegunowy typu GYd-178 w wykonaniu specjalnym o danych znamionowych przedstawionych w Tabeli 1.

Konstrukcja silnika pozwala na włączenie połowy lub całości uzwojeń stojana, jak to przedstawiono na rysunku 1.



Rys.2. Model symulacyjny programu PSpice

Tabela 1. Dane znamionowe silnika synchronicznego GYd-178sp/02

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Moc znamionowa mechaniczna	$P_{mN}$	4000 kW
Moc znamionowa elektryczna	$P_N$	4157 kW
Napięcie stojana	$U_{N(YY)}$	6000 V
Prąd stojana	$I_N$	500 A
Napięcie wzbudzenia	$U_{wN}$	78 V
Prąd wzbudzenia	$I_{wN}$	430 A
Częstotliwość	$f_N$	50 Hz
Prędkość obrotowa	$n_N$	750 obr/min
Współczynnik mocy	$\cos \varphi_N$	0,8 poj.

Z wałem silnika sprzęgnięte są dwa generatory synchroniczne typu P-1500/10/250/03 o mocach znamionowych 1750 kW każdy, pracujące podczas rozruchu silnika na biegu jałowym, bez obciążenia i bez zasilania obwodu wzbudzenia.

Typowe obciążenie badanego układu napędowego w trakcie pracy synchronicznej wynosi 2510 kW. Ze względu na konstrukcję bloku zasilania wzbudzenia, maksymalny prąd wzbudzenia silnika ograniczono do wartości 400 A. Na podstawie analizy charakterystyk statycznych stwierdzono, że obniżenie maksymalnego prądu wzbudzenia o 30 A względem wartości znamionowej nie niesie negatywnych konsekwencji przy takim obciążeniu silnika.

## Model symulacyjny

Uwzględnienie rozdzielonych uzwojeń stojana z bateriami kondensatorów w niezasilanych częściach uzwojeń, ze względu na sprzężenia pomiędzy poszczególnymi częściami uzwojeń, znacznie komplikuje opis matematyczny silnika. W rozpatrywanym przypadku, nie zasilane części uzwojeń nie są łączone z bateriami kondensatorów, lecz pozostają w stanie otwartym. Pozwala to na wykorzystanie prostego modelu symulacyjnego przedstawionego na rysunku 2. Model symulacyjny opracowano na podstawie [16, 17, 18] wprowadzając niezbędne modyfikacje. Uwzględniono impedancję sieci zasilającej oraz zaimplementowano możliwość rozruchu z dławikiem rozruchowym.

Zakładając, że obie części uzwojenia stojana są identyczne oraz objęte są idealnym sprzężeniem magnetycznym:

$$(1) \quad \begin{aligned} R_1 &= R_2 = R \\ L_1 &= L_2 = L = M \end{aligned}$$

gdzie:  $R$  – rezystancja,  $L$  – indukcyjność własna,  $M$  – indukcyjność wzajemna, impedancja zastępcza równoległego połączenia obu części uzwojeń stojana wyraża się zależnością:

$$(2) \quad Z = \frac{R}{2} + j\omega L$$

Przy przyjętym założeniu dołączenie drugiej części uzwojenia stojana podczas rozruchu silnika można traktować jako dołączenie dodatkowych, równoległych rezystancji do rezystancji  $R_{sd}$  i  $R_{sq}$  reprezentujących połowę uzwojenia stojana w modelu przedstawionym na rysunku 2.

Za pomocą opracowanego modelu przeprowadzono badania symulacyjne rozruchu silnika dla różnych konfiguracji układu rozruchowego. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunkach 3-5.

Na podstawie rysunków 3 i 4 można zauważyć, że rozruch przy częściowym zasilaniu uzwojeń stojana odbywa się przy mniejszym prądzie rozruchowym kosztem zmniejszonego momentu rozruchowego, co skutkuje wydłużeniem czasu rozruchu.

Obniżenie prądu rozruchowego możliwe jest także

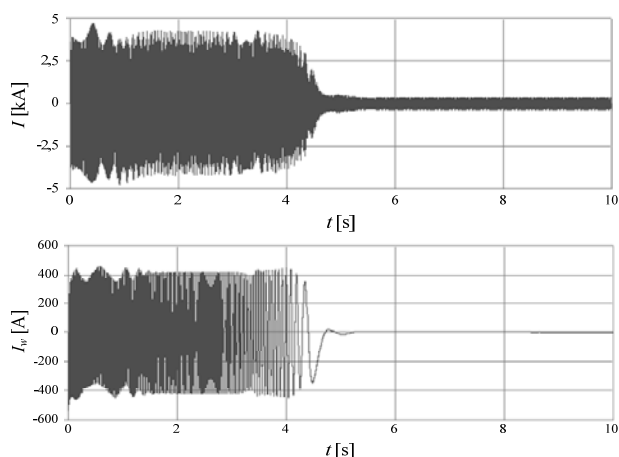
poprzez włączenie w obwód stojana dławika rozruchowego. Na podstawie rysunków 5 i 6 można zauważyć, że najmniejszy prąd rozruchowy możliwy jest do uzyskania podczas rozruchu z dławikiem rozruchowym przy częściowym zasilaniu uzwojenia wzbudzenia. Zwarcie dławika oraz włączenie napięcia zasilania na pełne uzwojenia stojana przy prędkości bliskiej prędkości synchronicznej skutkuje nieznacznym wzrostem prądu stojana. Dla przyjętych parametrów sieci zasilającej i dławika rozruchowego wartość skuteczna prądu rozruchowego w tym przypadku wyniosła 1400 A, co stanowi mniej niż 3-krotność prądu znamionowego silnika.

### Weryfikacja pomiarowa

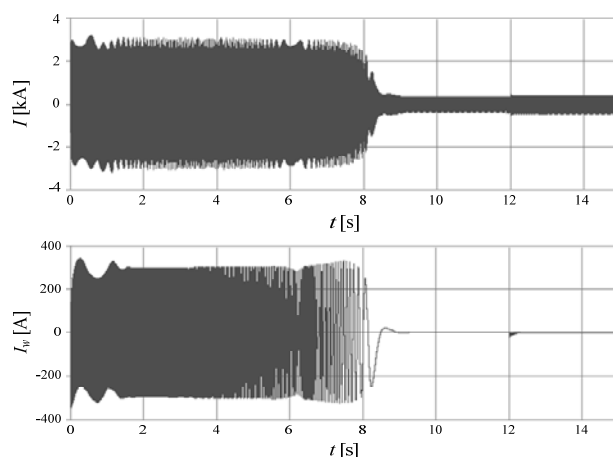
W oprogramowaniu mikroprocesorowego bloku zasilania wzbudzenia [12] zaimplementowano procedury rozruchu asynchronicznego dla silników z rozdzielonymi uzwojeniami stojana. Po wdrożeniu układ w jednej z kopalń węgla kamiennego przeprowadzono pomiary weryfikacyjne na obiekcie rzeczywistym.

Na rysunkach 7-8 przedstawiono wyniki pomiarów w układzie z dławikiem rozruchowym i przełączaniem uzwojeń stojana podczas rozruchu silnika GYd-178sp/02. Na czas rozruchu napięcie na szynach sieci zasilającej silnik zostało podniesione do wartości 6,6 kV.

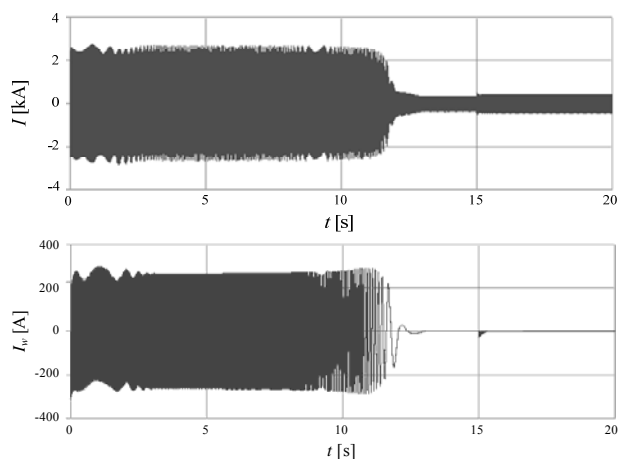
Jak można zauważyć na rysunkach 7-8 załączenie napięcia na pełne uzwojenia stojana przy prędkości bliskiej prędkości synchronicznej powoduje nieznaczny wzrost



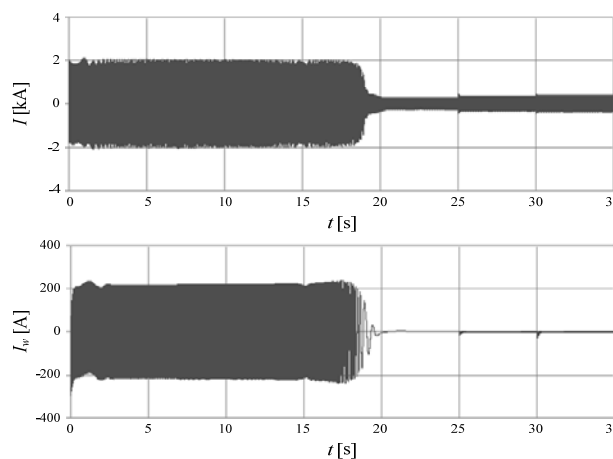
Rys.3. Prąd stojana oraz prąd obwodu wzbudzenia podczas rozruchu przy zasilaniu pełnego uzwojenia stojana



Rys.4. Prąd stojana oraz prąd obwodu wzbudzenia podczas rozruchu przy zasilaniu części uzwojenia stojana – zwarcie uzwojeń stojana w chwili  $t=12$  s



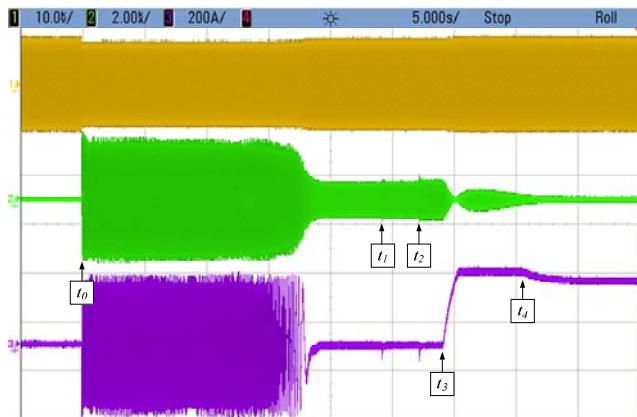
Rys.5. Prąd obwodu wzbudzenia oraz prąd stojana podczas rozruchu z dławikiem rozruchowym i zasilaniem pełnego uzwojenia stojana – zwarcie dławika w chwili  $t=15$  s



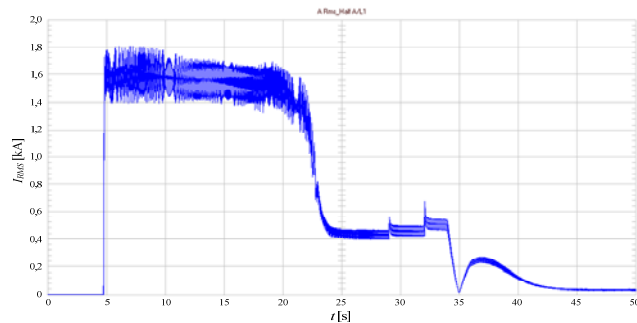
Rys.6. Prąd stojana oraz prąd obwodu wzbudzenia podczas rozruchu z dławikiem rozruchowym i zasilaniem części uzwojenia stojana – zwarcie uzwojeń stojana w chwili  $t=30$  s

prądu stojana, o wartość około 50 A. Podobnie nieznaczny wzrost prądu towarzyszy zwarciu dławika rozruchowego.

Zastosowana struktura układu rozruchowego pozwoliła na znaczne ograniczenie prądu rozruchowego silnika w początkowej fazie rozruchu do wartości około 1600 A.



Rys.7. Przebiegi pomiarowe podczas rozruchu silnika: 1 – napięcie zasilania, 2- prąd stojana, 3 – prąd obwodu wzbudzenia;  $t_0$  – start rozruchu,  $t_1$  – zwarcie wyłącznika konfiguracji uzwojeń stojana,  $t_2$  – zwarcie dławika rozruchowego,  $t_3$  – włączenie mostka tyrystorowego,  $t_4$  – praca synchroniczna



Rys.8. Przebieg wartości skutecznej prądu stojana podczas rozruchu silnika

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono problematykę rozruchu asynchronicznego silników synchronicznych dużej mocy z rozdzielonymi uzwojeniami stojana. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na zaimplementowanie odpowiednich procedur rozruchowych w mikroprocesorowym bloku zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego [12] zapewniających skuteczny rozruch napędu ze znacznym ograniczeniem niekorzystnego wpływu na sieć zasilającą. Zastosowane algorytmy zostały zweryfikowane w układzie przemysłowym.

Specjalne konstrukcje silników, w tym także silników indukcyjnych dużej mocy [7, 9, 10, 11], w których istnieje możliwość zasilania części uzwojenia stojana pozwalają na ograniczenie prądów rozruchowych. W przypadkach, gdy jest to niewystarczające istnieje możliwość dodatkowego wykorzystania dławików rozruchowych.

Dalsze ograniczenie prądu rozruchowego możliwe jest dzięki włączeniu w trakcie rozruchu w niezasilane części uzwojeń stojana baterii kondensatorów. Wymaga to jednak dodatkowych badań, w celu doboru odpowiedniej pojemności kondensatorów. Zastosowanie zbyt dużej wartości pojemności baterii kondensatorów może spowodować wystąpienie rezonansu i generowanie przepięć w uzwojeniach stojana [9].

Przeprowadzone pomiary weryfikacyjne podczas rozruchu rzeczywistego układu napędowego potwierdzają

skuteczność łagodzenia procesów rozruchowych poprzez zastosowanie rozdzielonych uzwojeń stojana w silniku współpracującym z dławikiem rozruchowym.

**Autor:** dr inż. Marian Hyla, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.hyla@polsl.pl

### LITERATURA

- [1] Das J. C.; Casey J.: Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1999, s.1-10
- [2] Nevelsteen J., Aragon H.: Starting of large motors-methods and economics. IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 25, No. 6, 11/12 1989, s.1012-1018
- [3] Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2017, s.177-184
- [4] Sangha G. S.: Capacitor-Reactor Start of Large Synchronous Motor on a Limited Capacity Network. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-20, no. 5, 1984, s.1337-1343
- [5] LeDoux K., Visser P. W., Hulin J.D., Nguyen H.: Starting Large Synchronous Motors in Weak Power Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 3, 2015, s.2676-2682
- [6] Arshad W. M., Danielson C., Lendenmann H., Persson H., Hagg J., Dulas J.: Rated Starting Performance of Solid Pole Synchronous Motors from Reduced Voltage Factory Tests. 2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, s.1-10
- [7] Zawilak T.: Rozruch silników synchronicznych dużej mocy przy częściowym zasilaniu uzwojenia stojana. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 84/2009, KOMEL, Katowice 2009, s.33-37
- [8] Zawilak T., Zawilak J. Łagodny rozruch silników prądu przemiennego dużej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, KOMEL, Katowice 2009, s.11-16
- [9] Antal L., Zawilak T.: Rozruch silnika indukcyjnego z rozdzielonymi uzwojeniami stojana, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol.54, nr 23/2003, s.101-111
- [10] Zawilak T., Antal L., Zawilak J.: Prąd rozruchowy silników indukcyjnych z rozdzielonymi uzwojeniami stojana, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol.63, nr 29/2009, s.131-142
- [11] Zawilak T.: Rozruch silników dużej mocy prądu przemiennego przy rozdzielonych uzwojeniach stojana. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 80/2008, KOMEL, Katowice 2008, s.233-237
- [12] Hyla M.: Power supply unit for the excitation of a synchronous motor with a reactive power regulator. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, nr 1(521), s.57-61
- [13] Hyla M.: Automatic compensation of reactive power with a system for monitoring a 6 kV electrical power grid in a mine. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, nr 2(522), s.5-10
- [14] Hyla M.: Integrated control system of main fans station for deep mines ventilation. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 04(524) 2015, s.16-21
- [15] Hyla M.: Wybrane aspekty sterowania tyrystorową wzbudnicą silnika synchronicznego. V Ogólnopolska Konferencja Naukowa Modelowanie i Symulacja MIS-5, Kościelisko 23-27 czerwca 2008, s.345-348
- [16] Szczęsny R.: Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1999
- [17] Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa, 1986
- [18] Li Y., Mi C., Karmaker H.: Modeling of the Starting Performance of Large Solid-pole Synchronous Motors Using Equivalent Circuit Approach, 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, s.1-6
- [19] Wojtuszkiewicz K., Zachara Z., PSpice. Przykłady praktyczne. Wyd. MIKOM, Warszawa 2000