

Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane metody rozruchu asynchronicznego silnika synchronicznego dużej mocy. Przedstawiono podstawy działania silnika z biegunami jawnymi. Zaprezentowano model symulacyjny silnika z dławikiem rozruchowym przy zasilaniu z sieci o skończonej mocy zwarciowej oraz tyrystorowym układzie zasilania uzwojenia wzbudzenia. Zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych. Przedstawiono implementację wybranego algorytmu rozruchowego w mikroprocesorowym bloku zasilania wzbudzenia silnika. Zaprezentowano przebiegi pomiarowe w układzie rzeczywistym.

Abstract. The article presents selected methods of asynchronous starting of large synchronous motor. The basics of salient pole motors are described. Simulation model of synchronous motor with starting reactor in the stator winding supplied with the grid of finite short-circuit power and with thyristors rectifier for excitation are presented. Selected results of simulation are contained. Selected starting algorithm implemented in microprocessor controlled excitation supply unit is discussed. Waveforms measured during start of synchronous motor are shown. **(Starting of synchronous motor with a microprocessor controlled power supply unit for the excitation)**

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, rozruch asynchroniczny, symulacja komputerowa, sterowanie mikroprocesorowe

Keywords: synchronous motor, asynchronous starting, computer simulation, microprocessor control

Wstęp

Silniki synchroniczne dużej mocy w górnictwie wykorzystuje się zazwyczaj do napędu wentylatorów głównych przewietrzania dołu kopalni. Ze względu na masę wentylatorów dochodzącą do kilkudziesięciu ton i średnice dochodzące do 9 m, tego typu układy napędowe charakteryzują się dużym momentem bezwładności, około 10 razy większym od momentu bezwładności wirnika silnika napędowego [1]. Duża moc silnika i duży moment bezwładności powodują, że rozruch takiego układu napędowego uznaje się za ciężki.

Niewłaściwie przeprowadzona procedura rozruchu może doprowadzić do utknięcia silnika na prędkości podsynchronicznej, długotrwałej pracy z prądem większym od wartości znamionowej oraz oscylacji prędkości obrotowej, pulsacji momentu elektromagnetycznego, znacznymi przeciążeniami mechanicznymi na wale silnika i przyspieszonym zużyciem łożysk. Po nieudanym rozruchu, ze względu na długie czasy wybiegu, kolejna próba możliwa jest zazwyczaj dopiero po kilkunastu, a nierzadko kilkudziesięciu minutach. Należy także wziąć pod uwagę, że prądy rozruchowe kilkakrotnie przekraczają wartości prądów znamionowych, co powoduje znaczne nagrzewanie uzwojeń silnika. Z tego względu należy ograniczyć ilość prób rozruchu w określonym przedziale czasu.

Przepisy górnicze wymagają, aby w każdym szybie wydechowym oprócz czynnego wentylatora głównego lub zespołu wentylatorów głównych obecny był wentylator rezerwowy, którego uruchomienie możliwe jest w czasie 10 minut [2]. Awaria wentylatora głównego i nieudany rozruch wentylatora rezerwowego stwarza poważne zagrożenie dla zdrowia i życia załogi, a przerwa trwająca co najmniej 20 minut skutkuje wstrzymaniem robót i wyprowadzeniem pracowników w kierunku szybów wdechowych lub na powierzchnię [2].

Z tego względu rozruch silników synchronicznych napędu wentylatorów przewietrzania kopalni jest jednym z podstawowych zagadnień eksploatacyjnych w górnictwie.

Silnik synchroniczny z biegunami jawnymi

Silniki synchroniczne dużej mocy wykonuje się z wirnikiem cylindrycznym lub z biegunami wydajnymi (jawnymi). Do napędu wentylatorów przewietrzania dołu kopalni wykorzystuje się zazwyczaj silniki synchroniczne z biegunami jawnymi, gdzie uzwojenie wzbudzenia nawinięte

jest na biegunach wirnika. Rdzeń wirnika zawiera lite elementu obwodu magnetycznego (nabiegunki) i jest symetryczny względem osi biegunów jawnych oznaczanych jako oś d oraz względem osi podłużnej oznaczanej jako oś q prostopadłej do osi d . Reaktancja synchroniczna w obu osiach ma różne wartości.

Układ równań opisujących model maszyny synchronicznej dla pracy silnikowej wyrażony w wielkościach względnych ma postać [3, 4, 5, 6]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= r_s i_d + T_N \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_m \psi_q \\
 u_q &= r_s i_q + T_N \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_m \psi_d \\
 u_w &= r_w i_w + T_N \frac{d\psi_w}{dt} \\
 0 &= r_D i_D + T_N \frac{d\psi_D}{dt} \\
 0 &= r_Q i_Q + T_N \frac{d\psi_Q}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

przy czym:

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= x_d i_d + x_{dw} i_w + x_{dD} i_D \\
 \psi_q &= x_q i_q + x_{qQ} i_Q \\
 \psi_w &= x_w i_w + x_{dw} i_d + x_{wD} i_D \\
 \psi_D &= x_D i_D + x_{wD} i_w + x_{dD} \\
 \psi_Q &= x_Q i_Q + x_{qQ} i_q
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie:

- u_d, u_q - napięcia stojana w osiach d i q ,
- u_w - napięcie wzbudzenia,
- i_d, i_q - prądy stojana w osiach d i q ,
- i_w - prąd wzbudzenia,
- i_D, i_Q - prądy uzwojeń tłumiących w osiach d i q ,
- ψ_d, ψ_q - strumienie skojarzone z uzwojeniami stojana w osiach d i q ,
- ψ_w - strumień skojarzony z uzwojeniem wzbudzenia,
- ψ_D, ψ_Q - strumienie skojarzone z uzwojeniami tłumiącymi w osiach d i q ,
- r_s - rezystancja uzwojenia stojana,
- r_w - rezystancja uzwojenia wzbudzenia,
- r_D, r_Q - rezystancje uzwojeń tłumiących w osiach d i q ,

- x_d - reaktancje własne uzwojeń stojana w osiach d i q ,
- x_{dv} - reaktancja wzajemna uzwojenia stojana w osi d i uzwojeń wzbudzenia,
- x_{dD} - reaktancja wzajemna uzwojenia stojana i uzwojeń tłumiących w osi d ,
- x_{qQ} - reaktancja wzajemna uzwojenia stojana i uzwojeń tłumiących w osi q ,
- x_{wD} - reaktancja wzajemna uzwojenia wzbudzenia i uzwojeń tłumiących w osi d ,
- ω_m - prędkość kątowna wirnika,
- T_N - znamionowa stała czasowa.

Układ równań opisujący stan maszyny uzupełnia się równaniem mechanicznym o postaci:

$$(3) \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} [(\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) - m_0]$$

gdzie:

- T_M – mechaniczna stała czasowa,
- m_0 – moment obciążenia.

W trakcie pracy synchronicznej ustalonej pochodne strumieni skojarzonych układu równań (1) przyjmują wartości zerowe. Jednak w stanach niestabilnych, w tym podczas rozruchu asynchronicznego, pochodne strumieni mają wartość niezerową i wpływają na dynamikę zmian prędkości obrotowej.

Podczas rozruchu asynchronicznego przepływ prądu w zwartym rezystorem rozruchowym uzwojeniu wzbudzenia, powstały na skutek indukowanego w nim napięcia, powoduje dodatkowe oddziaływanie na strumienie skojarzone z uzwojeniami stojana i uzwojeniami tłumiącymi w osi d , a w efekcie na moment rozwijany przez maszynę.

Rozruch asynchroniczny silnika z biegunami jawnymi

Rozruch silnika jawnobiegunowego przeprowadza się na ogół metodą rozruchu asynchronicznego. Odbywa się to poprzez załączenie napięcia zasilania stojana bez zasilania obwodu wzbudzenia. Przepływ prądu w uzwojeniach stojana powoduje powstanie pola wirującego, które wywołuje przemienny moment obrotowy działający na wirnik. Ze względu na zbyt dużą częstotliwość zmian tego momentu w stosunku do bezwładności wirnika o momencie rozruchowym decyduje moment powstały dzięki prądom wirowym indukowanym w litych nabiegownikach magnetycznych oraz prądom przepływającym w uzwojeniach tłumiących działających podobnie jak klatka rozruchowa w silniku asynchronicznym.

Aby zapobiec powstawaniu wysokich napięć w obwodzie wzbudzenia, na czas rozruchu do uzwojenia wzbudzenia dołączany jest rezystor rozruchowy umożliwiający przepływ prądu w uzwojeniu. W praktyce, uzwojenie wzbudzenia zwiiera się rezystorem o wartości około 10 razy większej od rezystancji uzwojenia wzbudzenia.

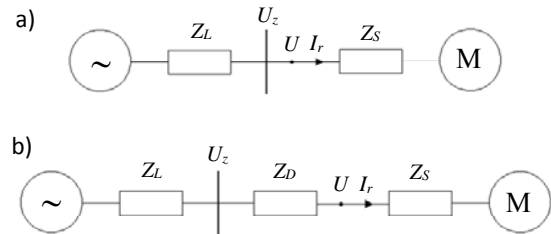
Po osiągnięciu prędkości podsynchronicznej (w granicach 85–95 % n_N), gdy w uzwojeniu wzbudzenia indukowane są niewielkie prądy o małej częstotliwości, rezystor rozruchowy jest rozwierany, a uzwojenie wirnika zasilane jest prądem stałym, co pozwala wirnikowi wejść w synchronizm i pracować z prędkością synchroniczną.

Silnik synchroniczny podczas rozruchu asynchronicznego pobiera duży prąd rozruchowy, znacznie większy od znamionowego. Prąd rozruchowy może powodować wahania napięcia w sieci zasilającej.

W niektórych napędach o ciężkim rozruchu, w celu ograniczenia prądów rozruchowych stosuje się dławiki rozruchowe włączone szeregowo z obwodem zasilania stojana silnika. W końcowym etapie rozruchu, gdy prądy rozruchowe osiągają odpowiednio małe wartości, dławiki rozruchowe są zwierane. Zwarcie dławika odbywa się przed

podaniem napięcia do obwodu wzbudzenia, aby impedancja dławika nie powodowała dodatkowego spadku napięcia na zaciskach uzwojeń stojana, skutkującego zmniejszeniem momentu rozwijanego przez silnik przed wciągnięciem wirnika do pracy synchronicznej.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat zastępczy układu zasilania silnika podczas rozruchu asynchronicznego bezpośrodkowego i z dławikiem rozruchowym [7].



Rys.1. Schemat zastępczy układu zasilania silnika przy rozruchu asynchronicznym: a) rozruch bezpośredni, b) rozruch z dławikiem rozruchowym: M – silnik, Z_L – impedancja linii zasilającej, Z_s – impedancja silnika, Z_D – impedancja dławika, U_z – napięcie na szynach rozdzielni zasilającej, U – napięcie zasilania silnika, I_r – prąd rozruchowy

Włączenie w obwód stojana dławika rozruchowego powoduje skutek spadku napięcia na impedancji dławika [7] ograniczenie prądu rozruchowego i momentu rozruchowego silnika zgodnie z zależnościami [8, 9]:

$$(4) \quad I_r' = I_r \frac{U'}{U_N}$$

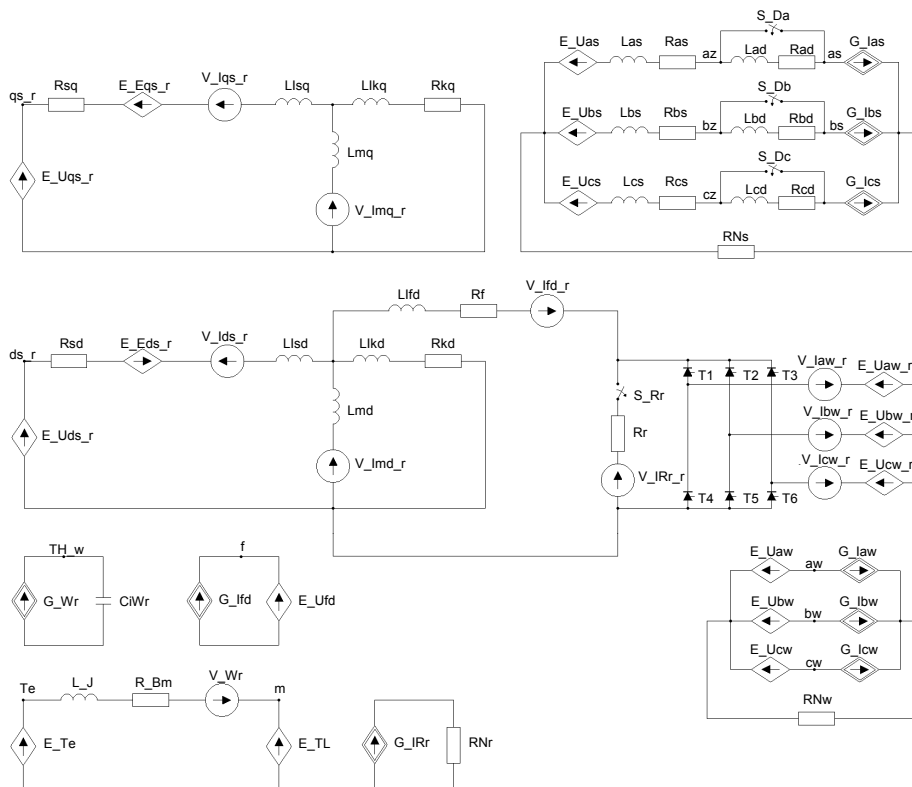
$$(5) \quad M_r' = M_r \left(\frac{U'}{U_N} \right)^2$$

gdzie: U_N – znamionowe napięcie zasilania silnika, U' – obniżone napięcie zasilania silnika, I_r – prąd rozruchowy przy znamionowym napięciu zasilania, I_r' – prąd rozruchowy przy obniżonym napięciu zasilania, M_r – moment rozruchowy przy znamionowym napięciu zasilania, M_r' – moment rozruchowy przy obniżonym napięciu zasilania.

Jak można zauważyć na podstawie zależności (4, 5), zmiana prądu rozruchowego jest proporcjonalna do zmiany napięcia zasilania, a zmiana momentu rozruchowego zależna jest od kwadratu napięcia zasilającego silnik.

W celu wytworzenia większego momentu synchronizującego i zapewnienia łatwiejszego przejścia silnika do pracy synchronicznej, w niektórych rozwiązaniach stosuje się forsowanie wzbudzenia podczas końcowego etapu rozruchu. Po włączeniu zasilania wzbudzenia, w uzwojeniu wzbudzenia wymuszany jest przez kilka sekund prąd o wartości około 20-50 % większej od wartości znamionowej. Po przejściu silnika do pracy synchronicznej prąd wzbudzenia zmniejszany jest do wartości wynikającej z realizowanego procesu, np. wykorzystania niedociążonego silnika jako źródła mocy biernej w procesie statycznej lub nadążnej kompensacji mocy biernej [6, 10].

W układach napędowych wentylatorów przewietrzania kopalni, w celu zmniejszenia momentu obciążenia podczas rozruchu, rozruch silnika wykonuje się przy zamkniętych klapach aparatu kierowniczego. Po uzyskaniu stanu pracy synchronicznej klapy są otwierane, a silnik obciążony momentem roboczym. Rozruch silnika odbywa się więc przy momencie obciążenia znacznie mniejszym od momentu roboczego, co umożliwia przeprowadzenie rozruchu asynchronicznego przy obniżonym napięciu zasilania w układzie z dławikiem rozruchowym.



Rys.2. Model symulacyjny silnika synchronicznego jawnobiegunowego z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia

Istnieją także inne metody rozruchu [8, 11, 12], jednak w praktyce przemysłowej dla wolnoobrotowych silników synchronicznych dużej mocy stosuje się zazwyczaj rozruch asynchroniczny bezpośredni lub rozruch z dławikiem rozruchowym. Coraz częściej pojawiają się jednak układy z falownikiem umożliwiające łagodny rozruch oraz regulację prędkości obrotowej w stanie pracy synchronicznej.

Skutki rozruchu można także łagodzić stosując specjalne konstrukcje silników, np. silniki dwubiegowe, dla których początkowy rozruch odbywa się dla mniejszej prędkości, a następnie uzwojenia przełączane są do pracy z większą prędkością [1].

Model symulacyjny

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony model symulacyjny badanego układu dla programu PSpice.

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem modelu silnika synchronicznego z biegunami jawnymi opartego o układ równań (1) przedstawionego w [13]. Wprowadzono niezbędne modyfikacje związane ze sterowaniem prądu wzbudzenia przez mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia [14] oraz uwzględnieniem skończonej mocy zwarciowej źródła zasilania i możliwości rozruchu za pomocą dławika rozruchowego. Opis modelu utworzono w pliku tekstowym *.cir.

W modelu symulacyjnym uwzględniono powiększony moment bezwładności spowodowany napędzaniem wentylatora. Przyjęto, że rozruch odbywa się przy zamkniętych kłapach aparatu kierowniczego wentylatora.

Badano rozruch asynchroniczny. Proces sterowania rezystorem rozruchowym i mostkiem tyrystorowym podczas rozruchu i wyłączania silnika przedstawiono w pracy [15].

Obiektem badań był silnik synchroniczny typu GAe-1716t/01 o danych znamionowych przedstawionych w Tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe silnika synchronicznego GAe1716t/01

| Parametr | Oznaczenie | Wartość |
|---------------------|------------------|-------------|
| Moc znamionowa | P_N | 3150 kW |
| Napięcie stojana | $U_{M(Y)}$ | 6000 V |
| Prąd stojana | I_N | 350 A |
| Napięcie wzbudzenia | U_{wN} | 95 V |
| Prąd wzbudzenia | I_{wN} | 300 A |
| Częstotliwość | f_N | 50 Hz |
| Prędkość obrotowa | n_N | 375 obr/min |
| Współczynnik mocy | $\cos \varphi_N$ | 0,9 |

Wyniki badań

Najprostszą metodą rozruchu asynchronicznego jest rozruch czasowy polegający na wymuszeniu prądu w uzwojeniu wzbudzenia po określonym czasie, liczonym od chwili załączenia napięcia zasilania stojana.

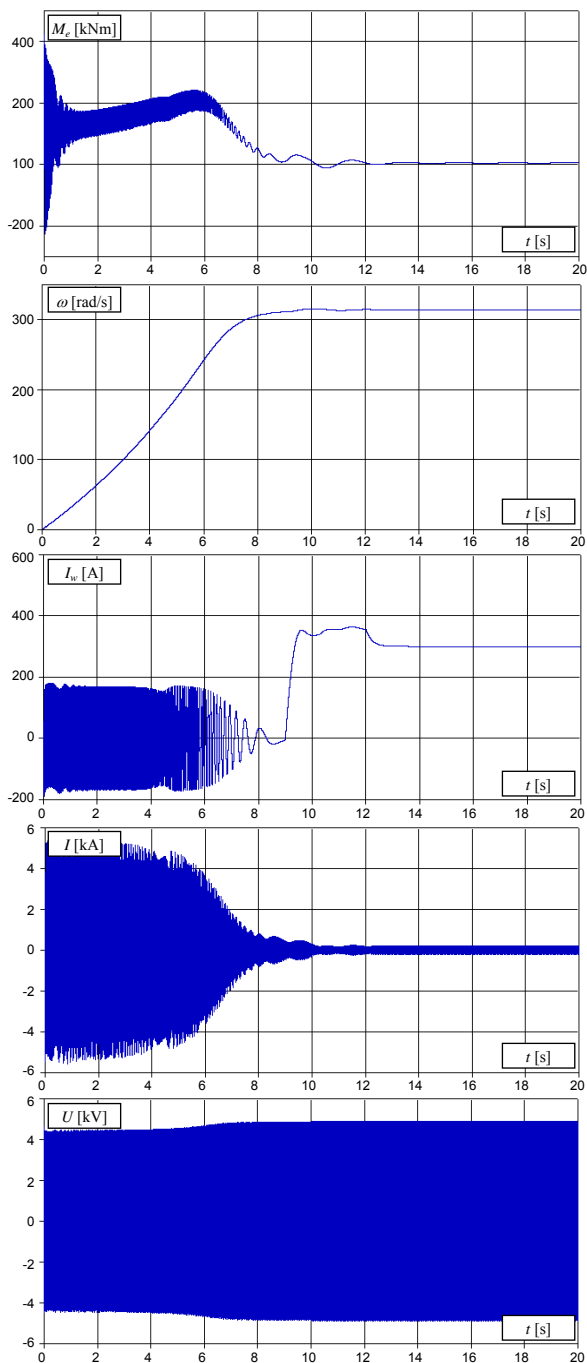
Ze względu na skończoną moc zwarciową rozdzielni 6 kV z których zasilane są napędy, rzeczywisty czas rozruchu jest dłuższy od czasu jaki można uzyskać przy zasilaniu silnika z sieci sztywnej. Dodatkowo istnieje możliwość, że w trakcie rozruchu napięcie na szynach rozdzielni będzie niższe od znamionowego, np. na skutek pracy innych dużych odbiorników energii.

Częstą praktyką przy ręcznym rozruchu silników dużej mocy jest podniesienie napięcia w rozdzielni 6 kV na czas rozruchu, co skutkuje powiększeniem moment rozruchowego oraz wzrostem wartości prądu rozruchowego. Jednakże w układach automatycznego rezerwowania, np. przy automatycznym rozruchu wentylatora rezerwowego wskutek awarii wentylatora podstawowego, takie działania nie są możliwe.

Na rysunku 3 przedstawiono proces rozruchu silnika przy impedancji sieci dobranej w taki sposób, aby prąd rozruchowy spowodował 10 % spadek napięcia zasilającego na szynach rozdzielni, a na rysunku 4 w taki sposób, aby spadek napięcia wyniósł 20 %. Można zauważyć charakterystyczny kształt prądu rozruchowego [16] będącego przyczyną spadku napięcia.

Jak można zauważyć na rysunku 3 włączenie prądu wzbudzenia następuje w chwili $t=9$ s. Po trzysekundowym forsowaniu następuje przejście do pracy synchronicznej przy prądzie wzbudzenia o wartości znamionowej.

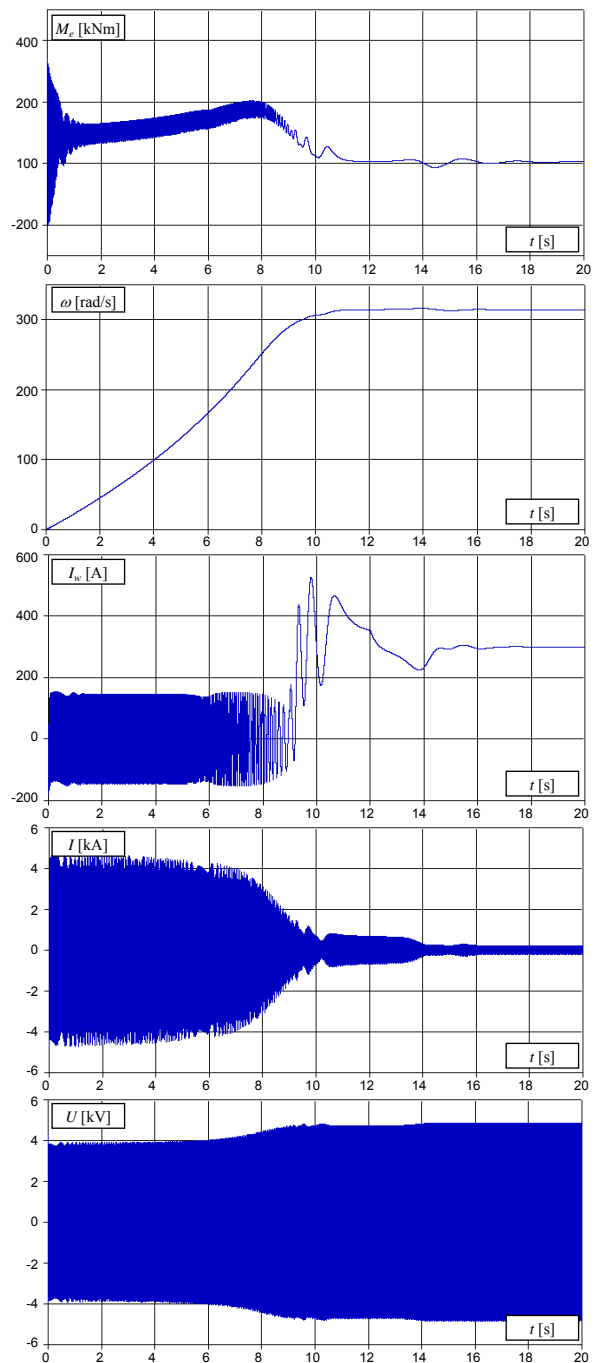
Obniżenie napięcia na szynach rozdzielni skutkuje zmniejszonym momentem rozwijanym przez silnik oraz wydłużonym czasem rozruchu. Dla przypadku z rysunku 4 załączenie prądu wzbudzenia w chwili $t=9$ s nastąpiło przy prędkości znacznie mniejszej od prędkości synchronicznej, co skutkuje powiększonymi oscylacjami momentu, udarami prądu wzbudzenia i utrudnionym przejściem do pracy synchronicznej. W skrajnym przypadku, zbyt wczesne załączenie prądu wzbudzenia mogłoby uniemożliwić wciągnięcie wirnika silnika w synchronizm.



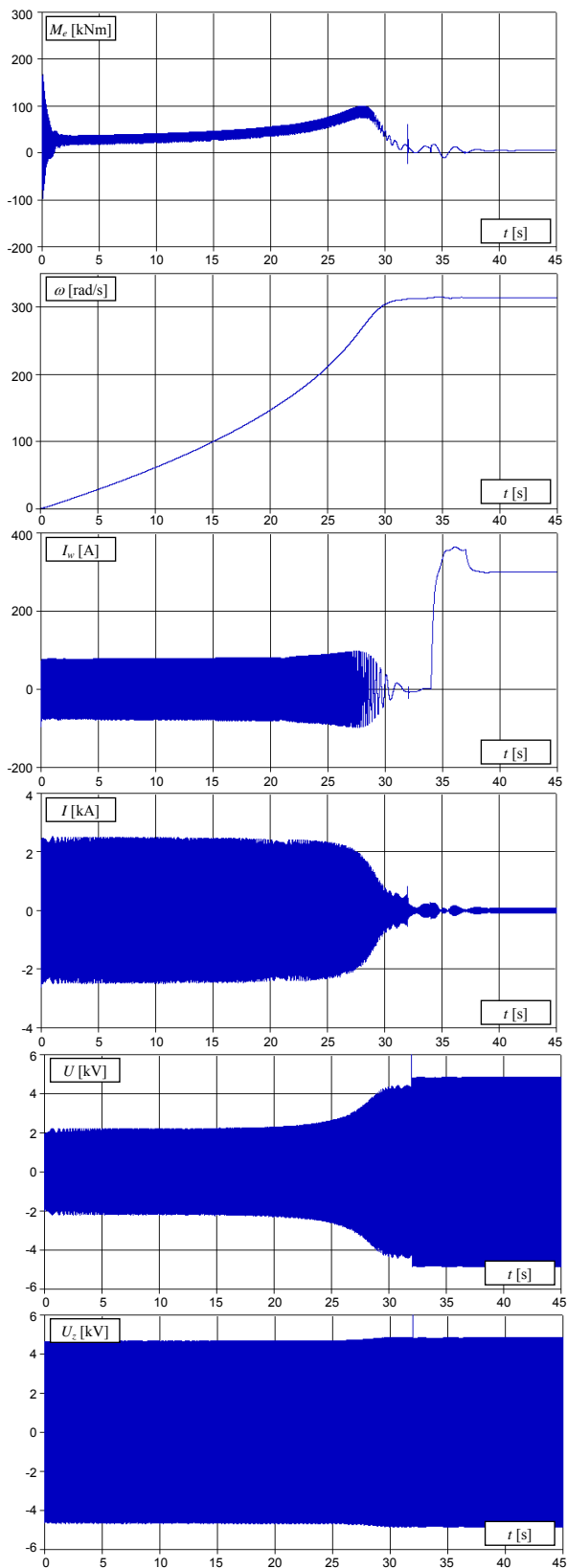
Rys.3. Rozruch silnika bez dławika rozruchowego przy znamionowym napięciu źródła zasilania: T_e - moment elektromagnetyczny, ω - prędkość, I_w - prąd wzbudzenia, I - prąd stojana, U - napięcie stojana

W związku z zależnością czasu rozruchu od napięcia zasilającego, przy czasowym algorytmie rozruchu silników synchronicznych, przyjmuje się czasy znacznie przekraczające czasy możliwe do uzyskania przy zastosowaniu innych metod. Skutkuje to niepotrzebną pracą silnika z prędkością podsynchroniczną, charakteryzującą się pulsacjami momentu i prędkości obrotowej oraz zwiększoną wartością prądu w uzwojeniach stojana silnika.

W niektórych układach napędowych podczas rozruchu asynchronicznego stosuje się dławiki rozruchowe. Impedancja dławika znacząco ogranicza prąd, jednak niekorzystnie wpływa na moment rozruchowy, powodując wydłużenie procesu rozruchu.

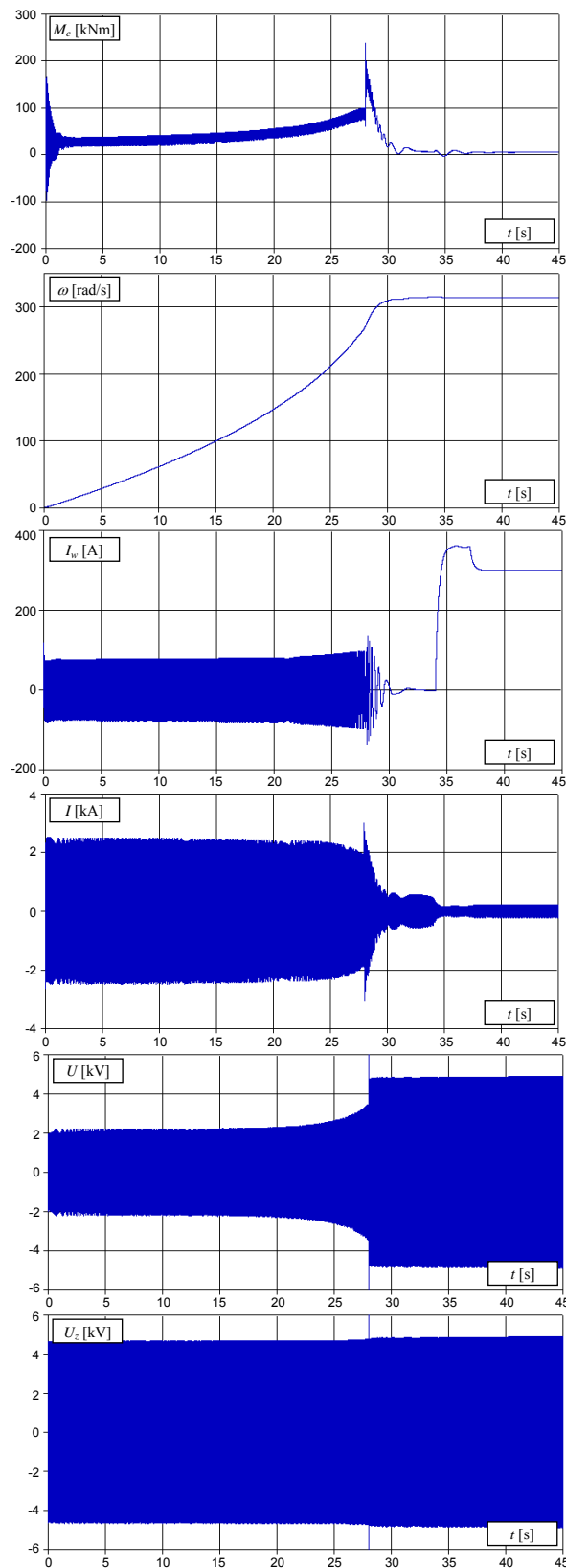


Rys.4. Rozruch silnika bez dławika rozruchowego przy obniżonym napięciu źródła zasilania: T_e - moment elektromagnetyczny, ω - prędkość, I_w - prąd wzbudzenia, I - prąd stojana, U - napięcie stojana



Rys.5. Rozruch silnika z dławikiem rozruchowym: M_e - moment elektromagnetyczny, ω - prędkość, I_w - prąd wzbudzenia, I - prąd stojana, U - napięcie stojana, U_z - napięcie zasilania na szynach rozdzielni

Na rysunku 5 przedstawiono proces rozruchu silnika z dławikiem rozruchowym przy zwarciu dławika w chwili $t=32$ s. Parametry dławika dobrano w taki sposób, aby wspólnie z impedancją sieci zasilającej ograniczył prąd rozruchowy o 50 % w stosunku do prądu uzyskanego w



Rys.6. Rozruch silnika z dławikiem rozruchowym przy zbyt wczesnym zwarciu dławika: M_e - moment elektromagnetyczny, ω - prędkość, I_w - prąd wzbudzenia, I - prąd stojana, U - napięcie stojana, U_z - napięcie zasilania na szynach rozdzielni

warunkach przedstawionych na rysunku 3. Przedstawiono napięcie zasilania stojana silnika oraz napięcie na szynach rozdzielni.

Dławik rozruchowy powinien zostać zwarty przed włączeniem napięcia w obwodzie wzbudzenia, po

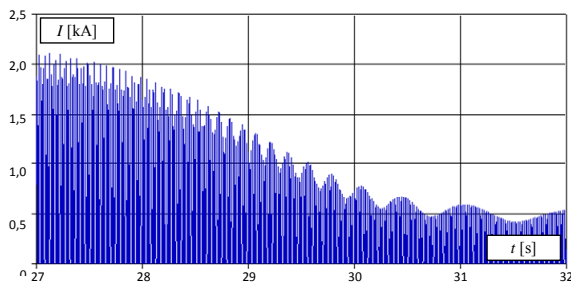
zmniejszeniu prądu stojana do odpowiedniej wartości. Kryterium zwarcia dławika może być kryterium czasowe, jednak w takim przypadku należy uwzględnić możliwość wydłużenia czasu rozruchu ze względu na obniżone napięcie zasilania na szynach rozdzielni 6 kV spowodowane przez inne odbiory. Na rysunku 6 przedstawiono proces rozruchu przy zbyt wczesnym zwarciu dławika w chwili $t=28$ s, co skutkuje udarem momentu i wzrostem prądu stojana w końcowej fazie rozruchu.

Wybór chwili załączenia prądu wzbudzenia może być dokonany także na podstawie innych kryteriów.

Załączenie napięcia do obwodu wzbudzenia powinno się odbywać przy prędkości podsynchronicznej, bliskiej prędkości wirowania pola stojana. Możliwy jest więc wybór chwili załączenia wzbudzenia na podstawie pomiaru prędkości obrotowej. Wymaga to zastosowania przetwornika prędkości obrotowej wału silnika.

Podczas rozruchu silnika synchronicznego, wirujące pole kołowe twornika przecina zwarte przez rezystor rozruchowy uzwojenie magneśnicy indukując w nim napięcie. Częstotliwość tego napięcia zależna jest od poślizgu i maleje wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Przy prędkości bliskiej prędkości synchronicznej okres indukowanego napięcia może wynosić kilka sekund. Chwilę włączenia napięcia wzbudzenia można więc określić na podstawie pomiaru częstotliwości prądu płynącego w obwodzie wzbudzenia zwartym przez rezystor rozruchowy.

W miarę wzrostu prędkości obrotowej do prędkości podsynchronicznej, maleje amplituda prądu stojana, a zmianom tym towarzyszą oscylacje wartości skutecznej. Na rysunku 7 przedstawiono powiększony fragment przebiegu prądu stojana z rysunku 4. Oscylacje amplitudy prądu z rysunku 7, przy sinusoidalnym kształcie przebiegów, odzwierciedlają się w oscylacjach wartości skutecznej. Przeprowadzając pomiar okresu oscylacji i wartości skutecznej prądu stojana można dokonać wyboru chwili zwarcia dławika rozruchowego oraz chwili załączenia napięcia do obwodu wzbudzenia.



Rys.7. Prąd stojana przy dochodzeniu do prędkości podsynchronicznej w układzie z dławikiem rozruchowym

Rozruch silnika z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia

Na rysunku 8 przedstawiono schemat blokowy mikroprocesorowego bloku zasilania wzbudzenia z silnikiem synchronicznym [14] przeznaczony do współpracy z silnikami dużej mocy zasilanymi napięciem 6 kV i prądami wzbudzenia do 400 A. Urządzenie zarządzane jest przez system mikroprocesorowy, a zaimplementowane algorytmy pozwalają na przeprowadzenie rozruchu asynchronicznego w układzie klasycznym lub z dławikiem rozruchowym, kontrolę pracy synchronicznej z możliwością regulacji mocy biernej lub prądu wzbudzenia oraz technologiczne lub awaryjne wyłączenie napędu z rozładowaniem energii obwodu wzbudzenia poprzez pracę falownikową przekształtnika tyrystorowego [15].

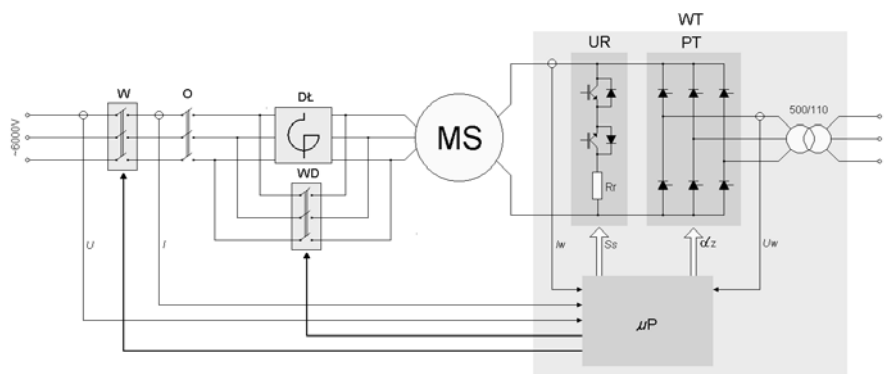
W obwodzie rezystora rozruchowego, w miejsce powszechnie wykorzystywanego stycznika, zastosowano klucze tranzystorowe w konfiguracji umożliwiającej przepływ dwukierunkowego prądu indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia podczas rozruchu silnika. Bezstycznikowy układ wzbudzenia pozwala na zwiększenie niezawodności i trwałości urządzenia.

System mikroprocesorowy, oprócz sterowania prądem w obwodzie wzbudzenia, steruje wyłącznikami w polu 6 kV, kontrolując równocześnie dopuszczalny obszar pracy oraz stan zabezpieczeń wewnętrznych i zewnętrznych umieszczonych np. w polu rozdzielczym zasilającym silnik. Dostępny jest tryb pracy autonomicznej lub współpraca z zewnętrznym, nadrzędnym układem sterowania [17]. Współpraca z urządzeniami zewnętrznymi realizowane jest poprzez wbudowane interfejsy komunikacyjne RS-485 oraz Ethernet.

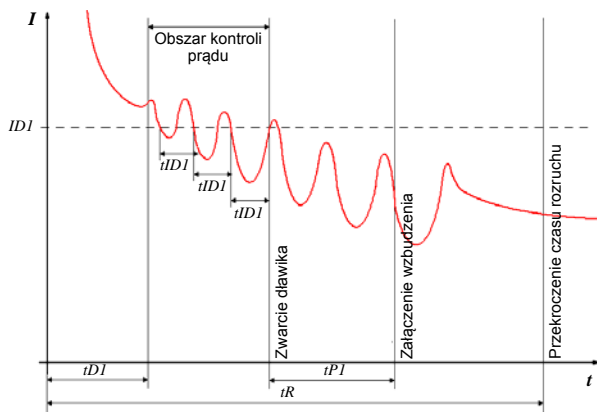
Procedura rozruchu asynchronicznego sterowana przez system mikroprocesorowy może być realizowana według różnych, parametryzowanych algorytmów [14], m.in. algorytmów czasowych, prądowych, prędkościowych i częstotliwościowych.

Na rysunku 9 przedstawiono ideę rozruchu realizowanego przez mikroprocesorowo sterowany blok zasilania wzbudzenia w układzie z dławikiem rozruchowym, przy trybie zwierania dławika prądowym i trybie włączenia wzbudzenia czasowym.

Tryb prądowy związany jest z detekcją oscylacji wartości skutecznej prądu stojana podczas pracy z prędkością podsynchroniczną. Kontrolowany jest czas oscylacji prądu $tID1$ wokół ustawionej wartości prądu końcowego $ID1$. System mikroprocesorowy mierzy czas sygnału wyjściowego programowego komparatora porównującego wartość skuteczną prądu stojana z ustawionym poziomem $ID1$.



Rys.8. Schemat układu sterowania silnika z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia: MS – silnik synchroniczny, WT – blok zasilania wzbudzenia, μP - system mikroprocesorowy, PT – prostownik tyrystorowy, UR – układ rozruchowy, W – wyłącznik, O – odłącznik, WD – wtycznik dławika, Dł – dławik rozruchowy



Rys.9. Idea rozruchu z trybem zwierania dławika prądowym i trybem załączenia wzbudzenia czasowy: t_{DI} – minimalny czas do zwarcia dławika, I_{DI} – prąd końcowy dławika, i_{DI} – czas prądu końcowego dławika, t_{PI} – czas do załączenia wzbudzenia, t_R – maksymalny czas rozruchu

Po osiągnięciu przez silnik prędkości podsynchronicznej, uzyskiwanej po spełnieniu założonych warunków prądowo-czasowych, następuje zwarcie dławika rozruchowego. Od chwili zwarcia dławika, zgodnie z prezentowanym algorytmem rozruchu, realizowany jest czasowy tryb załączenia napięcia w obwodzie wzbudzenia. Po upływie czasu t_{PI} następuje załączenie mostka tyrystorowego, którego zadaniem jest wymuszenie prądu stałego w obwodzie wzbudzenia. Po załączeniu mostka tyrystorowego mikroprocesor kontroluje narastanie prądu w obwodzie wzbudzenia, a po przekroczeniu wartości ustawionej parametrem odłącza rezystor rozruchowy. Kontrola narastania prądu wzbudzenia przed rozwarciem rezystora rozruchowego ma na celu zabezpieczenie silnika przed nadmiernym wzrostem napięcia w uzwojeniu wzbudzenia w przypadku, gdyby niemożliwe było wymuszenie prądu wzbudzenia przez mostek tyrystorowy, np. z powodu uszkodzenia zaworów przekształtnika. Brak prądu o określonej wartości w obwodzie wzbudzenia po zadanym czasie skutkuje awaryjnym wyłączeniem napędu.

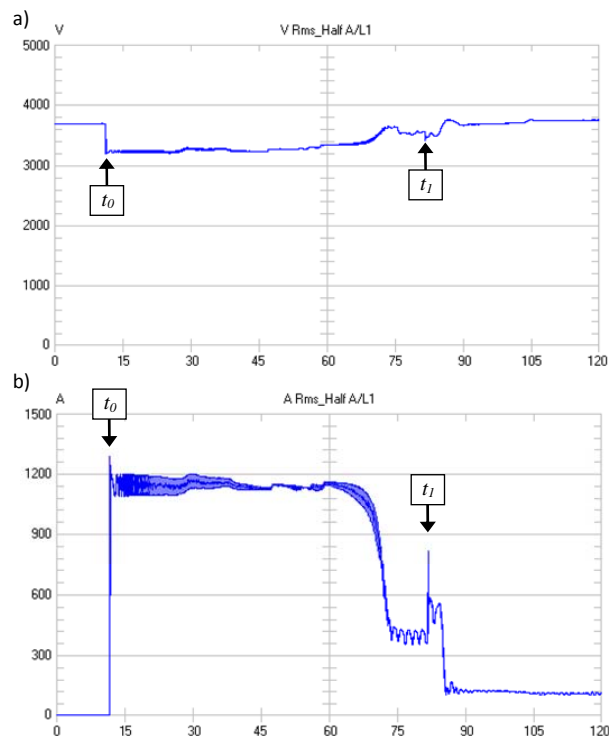
Ostatnim etapem procedury rozruchowej jest możliwość forsowania prądu wzbudzenia, co pozwala na zwiększenie momentu synchronizującego w końcowym etapie rozruchu i pewne przejście silnika do pracy synchronicznej.

Prezentowany układ mikroprocesorowego bloku zasilania wzbudzenia został wdrożony w kilkudziesięciu układach napędowych wentylatorów przewietrzania dołu kopalni zarówno w układach z bezpośrednim rozruchem asynchronicznym, jak i w układach z dławikami rozruchowymi.

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi pomiarowe wartości skutecznych napięcia fazowego i prądu stojana podczas rozruchu asynchronicznego silnika GAe-1716t/01 napędzającego wentylator główny przewietrzania dołu kopalni w układzie z dławikiem rozruchowym wiroprądowym typu 30TL85/62 o mocy 4500 kVA. Procedura rozruchu realizowana przez system mikroprocesorowego sterowania bloku zasilania wzbudzenia przeprowadzona została zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 9. Czas od zwarcia dławika do włączenia prądu wzbudzenia wyniósł 3 sekundy.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę rozruchu asynchronicznego silników synchronicznych dużej mocy. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na zaimplementowanie odpowiednich procedur rozruchowych w mikroprocesorowym bloku zasilania wzbudzenia silnika



Rys.10. Rozruch asynchronicznego z dławikiem rozruchowym: a) wartość skuteczna napięcia zasilania na szynach rozdzielni, b) wartość skuteczna prądu stojana; t_0 – załączenie silnika, t_1 – zwarcie dławika rozruchowego

synchronicznego [14] zapewniających skuteczny rozruch napędu. Zastosowane algorytmy zostały zweryfikowane w układach przemysłowych.

Zapewnienie skutecznego rozruchu pozwala na zautomatyzowanie procesu, uproszczenie obsługi i zmniejszeniem awaryjności oraz umożliwia wykorzystanie urządzeń w układach automatycznego załączania rezerwowego napędu w przypadku awarii układu podstawowego [17].

Zastosowanie przedstawionego bloku zasilania wzbudzenia z mikroprocesorowym układem sterowania umożliwia zastąpienie energochłonnych i kłopotliwych w obsłudze wzbudnic elektromaszynowych oraz umożliwia realizację statycznej lub nadajnej regulacji mocy biernej z możliwością współpracy z nadrzędnym układem kompensacji sieci elektroenergetycznej zakładu [10].

Liczne wdrożenia w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi potwierdzają niezawodność i efektywność zastosowanych rozwiązań.

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] Zalas P., Zawilak J.: Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005, KOMEL, Katowice 2005
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. z 2002 r., nr 139, poz. 1169 oraz z 2006 r., nr 124, poz. 863 oraz z 2010 r., nr 126, poz. 855)
- [3] Latek W.: Teoria maszyn elektrycznych. PWN, Warszawa 1982
- [4] Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego, PWN, Warszawa 1987

- [5] Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa, 1986
- [6] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [7] Yu Hu, Zhifei Chen; Zhe Chen; Yue Yuan: A novel method for the analysis of the impact of the high-power motor starting on grid. 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 6-9 July 2011, ss. 394 – 398
- [8] Zawilak T., Zawilak J.: Łagodny rozruch silników prądu przemiennego dużej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, KOMEL, Katowice 2009
- [9] 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, ss.1-10
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Nevelsteen J., Aragon H.: Starting of large motors-methods and economics. IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 25, No. 6, 11/12 1989
- [13] Szczęsny R.: Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1999
- [14] 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
- [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] Rusek A., Czaban A., Lis J.: A mathematical model of a synchronous drive with protrude poles, an analysis using variational method. Przegląd Elektrotechniczny, R.89 Nr 04/2013 Str. 106-108
- [17] 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