

Trakcyjno-akumulatorowy układ napędu górniczej lokomotywy elektrycznej

Przemysław Deja

1. Wstęp

W polskich kopalniach węgla kamiennego występuje zapotrzebowanie na nowoczesne i niezawodne maszyny do przewozu ludzi oraz transportu urobku i materiałów. Zakłady górnicze posiadają na wyposażeniu wiele odmian maszyn transportowych. Ze względu na źródło zasilania energią dzieli się je na spalinowe oraz elektryczne. Te drugie, z uwagi na sposób dostarczania energii elektrycznej, dzielą się na: akumulatorowe, przewodowe oraz zasilane z trakcji elektrycznej. Koszty eksploatacji różnych niezależnych maszyn górniczych zasilanych energią elektryczną są wysokie. Dlatego uzasadnione jest wdrożenie rozwiązań umożliwiających zasilanie maszyny zarówno z elektrycznej trakcji przewodowej, jak i z baterii akumulatorów. Trakcyjno-akumulatorowy układ napędu eliminowałby zatem ograniczenia maszyny akumulatorowej (zasięg wynikający z pojemności baterii) oraz ograniczenia maszyn zasilanych z trakcji (praca wyłącznie w pomieszczeniach niemietanowych lub ze stopniem „a” niebezpieczeństwa wybuchu metanu).

Prace nad ww. typem napędu prowadziły firmy SIEMENS oraz ABB. Opracowano i wykonano prototyp lokomotywy z ww. zasilaniem układu napędowego. Z uwagi na gabaryty rozwiązania te nie znalazły jednak zainteresowania wśród użytkowników. Ciągły rozwój technologii wytwarzania baterii ogniw pozwala sądzić, że możliwe będzie opracowanie napędu elektrycznego zoptymalizowanego pod kątem gabarytów oraz wyposażenia elektrycznego.

W artykule przedstawiono wyniki pracy realizowanej w ITG KOMAG nad trakcyjno-akumulatorowym układem napędu elektrycznego lokomotywy spągowej przewidzianej do pracy w podziemnych zakładach górniczych,

Streszczenie: Zakłady górnicze węgla kamiennego posiadają na wyposażeniu wiele odmian maszyn transportowych, tj. lokomotywy spągowe, ciągniki podwieszane czy przenośniki. Ze względu na źródło zasilania energią dzieli się je na spalinowe oraz elektryczne. Te drugie, z uwagi na sposób dostarczania energii elektrycznej, dzielą się na: akumulatorowe, przewodowe oraz zasilane z trakcji elektrycznej. Koszty eksploatacji różnych niezależnych maszyn górniczych zasilanych energią elektryczną są wysokie. Dlatego uzasadnione jest wdrożenie rozwiązań umożliwiających zasilanie maszyny zarówno z trakcji elektrycznej, jak i z baterii akumulatorów. Zastosowanie takiego uniwersalnego napędu pozwoli na efektywne wykorzystanie maszyn transportowych w miejscach, gdzie nie ma trakcji elektrycznej.

W artykule przedstawiono wyniki pracy realizowanej w ITG KOMAG nad trakcyjno-akumulatorowym układem napędu elektrycznego lokomotywy spągowej, przewidzianej do pracy w podziemnych zakładach górniczych, w wyrobiskach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Scharakteryzowano infrastrukturę kopalnianej sieci trakcyjnej oraz dokonano przeglądu stosowanych rozwiązań układów napędowych trakcyjno-akumulatorowych. Przedstawiono model układu napędowego oraz omówiono wyniki obliczeń modelu składu pociągu uzyskanych podczas badań symulacyjnych w środowisku Matlab-Simulink. W modelu zastosowano silnik elektryczny z magnesami trwałymi, baterię akumulatorów oraz falownik.

Słowa kluczowe: górnictwo, transport, lokomotywa, napęd elektryczny

🇬🇧 TRACTION-BATTERY DRIVE OF THE ELECTRIC MINE LOCOMOTIVE

Abstract: Hard coal mining plants have different transportation machines such as floor-mounted locomotives, suspended drive trains or conveyors. Depending on power supply system they are divided into diesel ones and electric ones. The last ones are divided into battery ones, cable ones and those supplied from electric traction. Operational costs of mining machines power supplied from different sources of electric energy are high. That is why implementation of the solutions enabling power supply of the machines both from electric traction and from the batteries is justified. Use of such versatile drives enables effective operation of transporting machines in those places where there is no electric traction.

Results of KOMAG project on traction-battery electric drives of floor-mounted locomotive intended for operation in underground mine workings in a potentially explosive atmosphere (methane and/or coal dust explosion hazard) are presented. Infrastructure of mine electric traction network is characterized and solutions of traction-battery electric drives are reviewed. Model of driving system is presented and the results of calculations of train model during simulation tests in Matlab-Simulink software environment are discussed. Electric motor with permanent magnets, pack of batteries and converter were used in the model.

Keywords: mining industry, transport, locomotive, electric drive

w wyrobiskach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego [2, 3]. Scharakteryzowano infrastrukturę kopalnianej sieci trakcyjnej oraz dokonano przeglądu stosowanych rozwiązań trakcyjno-akumulatorowych układów napędowych. Opisano model symulacyjny układu napędowego oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań w środowisku Matlab-Simulink. W badaniach wykorzystano modele silnika elektrycznego z magnesami trwałymi, baterii akumulatorów oraz falownika.

2. Infrastruktura kopalnianej sieci trakcyjnej

Sieci elektryczne trakcji przewodowej stosuje się w podziemnych wyrobiskach kopalń niezagrażonych wybuchem pyłu węglowego oraz w podziemnych wyrobiskach ze stopniem „a” niebezpieczeństwa wybuchu metanu. Sieć elektryczna trakcji przewodowej składa się z sieci zasilającej, sieci górnej oraz dolnej [7]. Sieć zasilająca jest to układ kabli lub przewodów łączących sieć górną i sieć dolną. Sieć górna to część sieci trakcyjnej rozpięta nad torem, służąca do zasilania odbiorników trakcyjnych. Natomiast sieć dolna to część sieci trakcyjnej składająca się z szyn jezdnych, elektrycznie połączonych podłużnie i poprzecznie oraz ewentualnie z linią powrotną. Wartość napięcia znamionowego w sieci elektrycznej trakcji przewodowej w polskich kopalniach wynosi 250 V DC [5].

W kopalniach stosuje się również torowiska dla trakcji niezelektryfikowanej. Tory linii niezelektryfikowanej, odgałęzione od szyn sieci dolnej (zelektryfikowanej), stanowią ich przedłużenie i są odizolowane od nich za pomocą dwóch złączy izolujących. Odstęp między złączami izolującymi powinien być większy niż długość pociągu wjeżdżającego na tor linii niezelektryfikowanej. Złącze izolujące powinno również skutecznie zapobiegać przepływowi prądu i przenoszeniu się potencjałów z sieci dolnej do torów linii niezelektryfikowanej [7].

W zakładach górniczych, które stosują lokomotywy akumulatorowe, ładowanie baterii odbywa się w specjalnych pomieszczeniach (ładowniach). Wymagania dotyczące pomieszczeń ładowni baterii akumulatorów trakcyjnych okreś-

lono w [6]. Napięcia znamionowe zasilania urządzeń elektrycznych ładowni baterii akumulatorów określono w [5].

3. Przegląd rozwiązań lokomotyw górniczych

W polskim górnictwie jedyną eksploatowaną lokomotywą dołową z trakcyjno-akumulatorowym układem zasilania była lokomotywa typu Lda-20. W latach 1966–1969 firma Konstal z Chorzowa wyprodukowała około 40 sztuk takich lokomotyw. Lokomotywy te przewidziane były do pracy na torowiskach o rozstawie 900 mm.

W światowym górnictwie znalazły zastosowanie lokomotywy akumulatorowo-przewodowe firm SIEMENS oraz ABB. Na rys. 1 a przedstawiono lokomotywę akumulatorowo-przewodową w wykonaniu podwójnym firmy SIEMENS. Odbierak prądu umieszczono na skrzyni baterii akumulatorów. Lokomotywa może pracować również w układzie pojedynczym.

Natomiast na rys. 1 b przedstawiono lokomotywę akumulatorowo-przewodową firmy ABB. Jest to lokomotywa jednokabinowa, odbierak prądu również umieszczono na skrzyni baterii akumulatorów. Sterowanie jazdą tej lokomotywy odbywa się za pośrednictwem przekształtników tyrystorowych.

Zarówno w lokomotywach firmy SIEMENS, jak i ABB do ich napędu stosowano silniki szeregowo-prądu stałego, zaś układ baterii akumulatorów zbudowano w oparciu o klasyczne ogniwa kwasowo-ołowiowe, znane w polskich rozwiązaniach lokomotyw akumulatorowych typu Lea. Zestaw ogniwa kwasowo-ołowiowych umieszczono w osłonie ognioszczelnej.

Firmą produkującą lokomotywy dla górnictwa z trakcyjno-akumulatorowym układem zasilania jest również firma Clayton (Wielka Brytania). Jej lokomotywy (rys. 2) mogą być zasilane z przewodu napowietrznej linii trakcyjnej lub z tzw. zelektryfikowanej trzeciej szyny.

Firma Clayton w swojej ofercie posiada zakres lokomotyw trakcyjno-akumulatorowych o masach od 4 do 40 ton z różnymi typami silników. W lokomotywach firmy Clayton do napędu zastosowano elektryczne silniki asynchroniczne.

reklama

reklama

Zastosowanie w maszynie zasilanej prądem stałym silników prądu przemiennego było uznawane ówczesznie za dużą innowacyjność i wymagało rozwiązania szeregu problemów w układzie sterowania. Jako źródło zasilania stosowano w dalszym ciągu ogniwa kwasowo-ołowiowe umieszczone w przeciwybuchowej skrzyni akumulatorowej.

4. Model trakcyjno-akumulatorowego układu zasilania lokomotywy górniczej

W 2016 roku w Instytucie KOMAG rozpoczęto prace nad opracowaniem trakcyjno-akumulatorowego układu zasilania napędu lokomotywy spągowej przewidzianej do pracy w podziemnych zakładach górniczych, w wyrobiskach

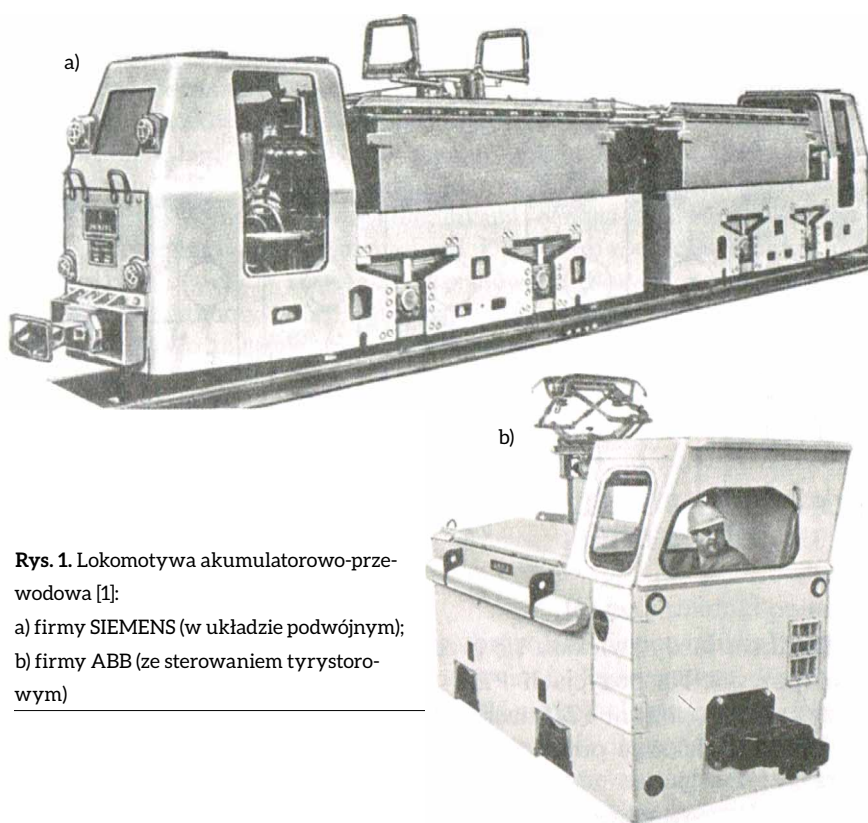
potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Idea trakcyjno-akumulatorowego układu zasilania napędu elektrycznego opiera się na połączeniu zastosowanych rozwiązań w lokomotywie trakcyjnej Ld-31EM [9] i lokomotywie akumulatorowej typu Lea. Głównym założeniem rozwiązania jest to, że energia elektryczna odzyskiwana w trakcie hamowania elektrycznego lokomotywy zostaje wykorzystana do ładowania baterii ogniów a nie jest tracona w opornikach hamowania, jak to ma miejsce obecnie w lokomotywach trakcyjnych. Na rys. 3 przedstawiono elektryczny schemat blokowy układu zasilania układu napędowego.

W układzie zastosowano nowoczesne moduły energoelektroniczne (MP1, MP2) współpracujące z wysokosprawnymi, bezszczotkowymi silnikami elektrycznymi z magnesami trwałymi (M1, M2). Jako źródło zasilania, poza elektryczną siecią trakcyjną dostarczaną poprzez odbierak prądu (OP) oraz moduł zasilania (MZ), zastosowano moduł baterii (MB), oparty na technologii ogniów litowych [10].

Podstawowym założeniem dla układu elektrycznego lokomotywy jest zgodność z wymaganiami dla urządzeń stosowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, wynikającymi z [4] oraz norm zharmonizowanych. Układ elektryczny jest przystosowany do pracy w podziemnych zakładach górniczych, w wyrobiskach niemietanowych i metanowych ze stopniem „a”, „b” lub „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy A lub B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Według [4] i norm zharmonizowanych, układ elektryczny powinien spełniać następujące wymagania:

- posiadać obudowy zapewniające stopień ochrony przed dostępem osób do części niebezpiecznych, przed wnikiem obcych ciał stałych oraz przed szkodliwymi skutkami wnikającej wody, nie niższy niż IP54;
- zapewniać ochronę przed dotykiem bezpośrednim poprzez umieszczenie aparatury elektrycznej w odpowiednich obudowach;
- zapewniać ochronę przed dotykiem pośrednim, poprzez zastosowanie

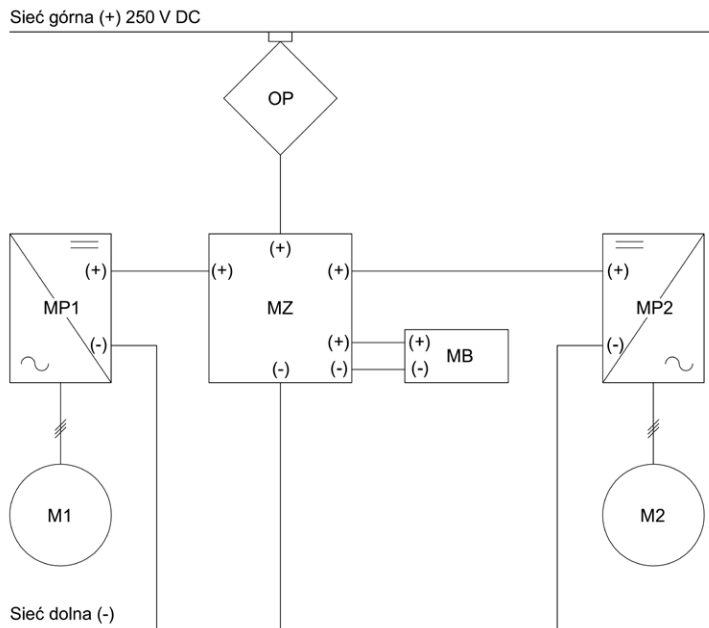


Rys. 1. Lokomotywa akumulatorowo-przewodowa [1]:

- a) firmy SIEMENS (w układzie podwójnym);
b) firmy ABB (ze sterowaniem tyrystorowym)



Rys. 2. Lokomotywa górnicza firmy Clayton [11]



Rys. 3. Elektryczny schemat blokowy [2]: OP – odbierak prądu; MZ – moduł zasilania; MP1, MP2 – moduł przekształtnika energoelektronicznego; MB – moduł baterii; M1, M2 – silniki napędowe

zabezpieczeń przed skutkami zwarcia, przeciążeń;

- posiadać obwody sterowania i sygnalowe;
- pracować w temperaturze otoczenia od -20°C do 40°C , przy wilgotności względnej do 95%;
- zapewniać rezystancję izolacji nie mniejszą niż $10\text{ M}\Omega$;
- posiadać właściwe odstępstwa izolacyjne powierzchniowe i w powietrzu.

5. Model symulacyjny

Model symulacyjny układu zasilania wykonano w środowisku Matlab-Simulink w oparciu o schemat blokowy przedstawiony na rys. 3. Do budowy modelu

Tabela 1. Dane wejściowe modelu symulacyjnego układu napędowego [3]

Napięcie znamionowe zasilania	250 V DC
Maksymalna prędkość jazdy	5 m/s
Maksymalna siła pociągowa	30 kN
Moc silników napędowych	2 x 40 kW
Przekładnia	12,1
Średnica kół	730 mm
Masa lokomotywy	12 t
Pojemność akumulatorów	100 Ah
Obciążenie lokomotywy (wozy typu Granby)	20 szt
Nachylenie trasy	0,4 %

symulacyjnego przyjęto dane wejściowe zaprezentowane w tabeli 1.

Przyjęto, że model symulacyjny lokomotywy zasilany będzie z kopalnianej trakcji elektrycznej o napięciu znamionowym 250 V DC. W układzie napędowym zastosowano dwa bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi o mocy 40 kW, zasilane z osobnych przekształtników energoelektronicznych.

Model silnika elektrycznego zbudowano w oparciu o blok Simulinka. Sygnałem wejściowym był moment obciążenia wynikający z oporów ruchu jadącej lokomotywy. Moc wyjściowa silnika została przemnożona przez 2, symulując w ten sposób dwa silniki, które wykorzystano do budowy koncepcyjnej lokomotywy.

Do budowy modelu baterii akumulatorów wykorzystano blok Simulinka reprezentujący akumulator, który odpowiednio sparametryzowano. Sygnałami wejściowymi do baterii była moc chwilowa układu napędowego. Sygnałami wyjściowymi była wartość napięcia baterii, prądu oraz informacja o poziomie naładowania.

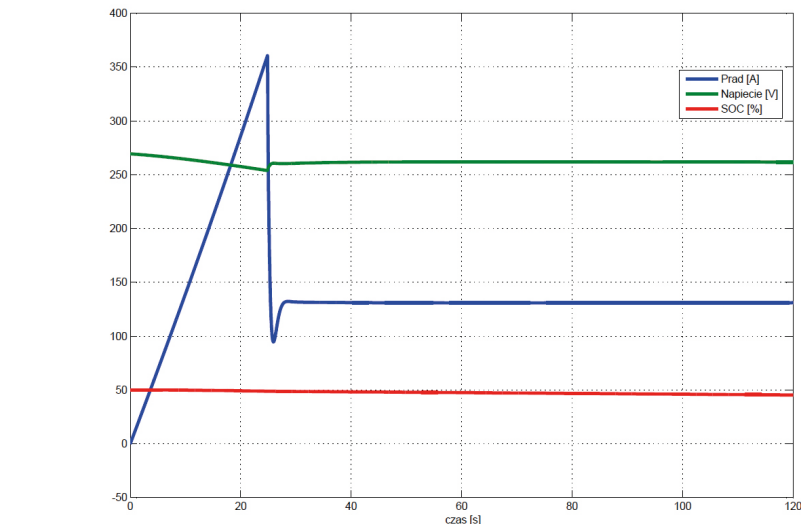
Model falownika zbudowano na podstawie struktury układu sterowania wektorowego połowo zorientowanego, ze sterowaniem bezpośrednim DFOC (ang. *Direct Field Oriented Control*).

reklama

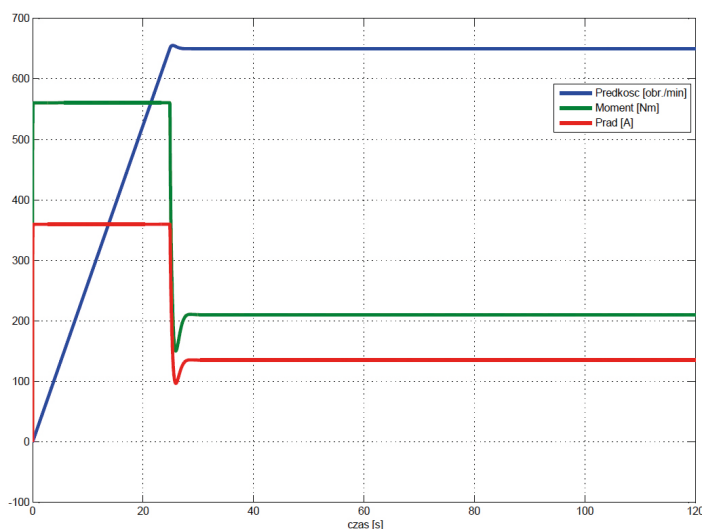
Zasada działania zamodelowanego układu sterowania połowo zorientowanego silnikiem PMSM polega na ciągłym pomiarze sygnałów sprzężenia zwrotnego (wartości prądów i_a , i_b , i_c oraz położenia kąta wirnika θ). Wielkością wejściową układu sterowania jest zadana prędkość (V_{zad}). Aktualna wartość prędkości obrotowej silnika napędowego VSE wyznaczana jest na podstawie sygnału pochodzącego z bloku silnika. Różnica prędkości zadanej w stosunku prędkości do silnika podawana jest na wejścia regulatora prędkości typu PI. Regulator ten służy do wyznaczenia wartości prądu i_{dz} . Poprzez pomiar prądów (i_a , i_b , i_c) wykonywana jest transformacja Clark, która umożliwia przejście z układu trójfazowego na dwufazowy (i_α , i_β). Następnie, przy wykorzystaniu informacji o położeniu kąta wirnika (θ) z bloku silnika, wykonywana jest transformacja Parka, dzięki której możliwe jest przejście na układ współrzędnych wirujący. W ten sposób otrzymano wartości prądów (i_d , i_q). W kolejnym kroku wartości prądów zadanych (i_{dz} , i_{qz}) przyrównywano do wartości prądów obliczonych (i_d , i_q), a ich wyniki podawano na regulatory prądu typu PI, które wyznaczały nowe wartości napięć (U_q , U_d). Wartości tych napięć, przy równoczesnym wykorzystaniu informacji o położeniu wirnika θ , poddawano odwrotnej transformacji Parka, w wyniku której otrzymano wartości napięć (U_α , U_β). Na podstawie obliczonych wartości napięć (U_α , U_β), za pomocą odwrotnej transformacji Clark, generowano napięcia (U_a , U_b , U_c), które posłużyły do sterowania tranzystorami mocy falownika.

Podczas badań symulowano:

- przejazd lokomotywy zasilanej z akumulatora z pustymi wozami, po wzniosie;
- przejazd lokomotywy zasilanej z akumulatora z pełnymi wozami, po upadzie;
- przełączenie zasilania z trakcji na baterię akumulatorów;
- przejazd lokomotywy zasilanej z trakcji przewodowej z pustymi wozami, po wzniosie;
- przejazd lokomotywy zasilanej z trakcji przewodowej z pełnymi wozami, po upadzie;
- rozładowywanie baterii.



Rys. 4. Przebiegi prądu, napięcia oraz stopnia rozładowania akumulatora dla jazdy lokomotywy z pełnymi wozami po upadzie 0,4%, zasilanej z akumulatora [3]



Rys. 5. Przebiegi prądu, momentu oraz prędkości obrotowej silnika dla jazdy lokomotywy z pełnymi wozami po upadzie 0,4%, zasilanej z akumulatora [3]

W czasie symulacji rejestrowano wartości: prądu, napięcia i stan naładowania baterii akumulatorów oraz prądu, momentu i prędkości obrotowej pojedynczego silnika napędowego.

Maksymalny prąd silnika ograniczono przez nastawy falownika do wartości 360 A (prąd znamionowy silnika). Wartość skuteczną prądu podczas rozruchu wynosiła 360 A. Można zatem stwierdzić, że regulator typu PI, sterujący ograniczeniem prądowym silnika, został zamodelowany prawidłowo. Zgodnie z [8] dla prądu znamionowego 360 A moment silnika powinien

wynosić 560 Nm. Tę wartość momentu uzyskano podczas rozruchu. Zatem model silnika również został poprawnie zamodelowany. Również model układu przełączania zasilania lokomotywy z trakcji na baterię akumulatorów działał prawidłowo.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono przykładowe, wybrane przebiegi uzyskane podczas badań symulacyjnych.

Wyniki badań symulacyjnych [3] wykazały, że silnik napędowy lokomotywy z pełnymi wozami rozpędza się do prędkości znamionowej w czasie 25 sekund, natomiast z pustymi w czasie

18 sekund. Prąd lokomotywy z pełnymi wozami wynosi 130 A, natomiast z pustymi 205 A. Różnica ta wynikała przede wszystkim z nachylenia, po jakim poruszała się lokomotywa. Czas jazdy lokomotywy zasilanej z baterii akumulatorów wynosił maksymalnie 40 min dla transportu z wozami pełnymi po upadzie 0,4% i 25 minut z wozami pustymi po nachyleniu 0,4%.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki pracy realizowanej w ITG KOMAG nad opracowaniem trakcyjno-akumulatoremowego układu napędu elektrycznego lokomotywy spągowej, przewidzianej do pracy w podziemnych zakładach górniczych, w wyrobiskach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych modelu trakcyjno-akumulatoremowego układu napędu elektrycznego, wyposażonego w silniki z magnesami trwałymi wraz ze składem wozów kopalnianych, z uwzględnieniem zamodelowanej trasy jazdy odzwierciedlającej warunki rzeczywiste. Badania przeprowadzono w programie Matlab-Simulink.

W badaniach wykorzystano modele silnika elektrycznego z magnesami trwałymi, baterii akumulatorów oraz falownika. Trakcję elektryczną stanowił blok źródła napięcia stałego 250 V. Jako obciążenie wykorzystano wozy kopalniane typu Granby.

W czasie symulacji rejestrowano wartości prądu, napięcia i stanu naładowania baterii akumulatorów oraz prądu, momentu i prędkości obrotowej pojedynczego silnika napędowego.

Wartość skuteczna prądu podczas ruchu wynosiła 360 A. Prąd lokomotywy z pełnymi wozami wyniósł 130 A (jazda po upadzie), natomiast z pustymi 205 A (jazda po wzniosie). Stwierdzono, że regulator typu PI, sterujący ograniczeniem prądowym silnika, został zamodelowany prawidłowo. Czas jazdy lokomotywy zasilanej z baterii akumulatorów wynosił maksymalnie 40 min dla transportu z wozami pełnymi po upadzie 0,4% i 25 minut z wozami pustymi po nachyleniu 0,4%.


Koncepcję trakcyjno-akumulatoremowego napędu elektrycznego oparto na połączeniu zastosowanych rozwiązań lokomotywy trakcyjnej Ld-31EM i lokomotywy akumulatorowej typu Lea. Głównym założeniem rozwiązania jest to, że energia elektryczna indukowana w trakcie hamowania elektrycznego lokomotywy zostanie spożytkowana na ładowanie baterii ogniwi, nie tracona w rezystorach hamowania, jak to ma miejsce obecnie w górniczych lokomotywach trakcyjnych. Wykorzystanie energii elektrycznej indukowanej w trakcie hamowania elektrycznego na potrzeby doładowywania baterii akumulatorów zwiększy sprawność układu napędowego lokomotywy.

Literatura

- [1] DUDEK W., GRZBIELA C., MACHOWSKI A., MACHOWSKI J.: *Maszyny, urządzenia elektryczne w automatyka w górnictwie*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
- [2] BUDZYŃSKI Z., DEJA P., KONSEK R., POLNIK B.: *Innowacyjny hybrydowy układ napędu elektrycznego – Koncepcja innowacyjnego hybrydowego napędu*

elektrycznego. Praca statutowa ITG KOMAG 2016 (niepublikowana).

- [3] DEJA P., KONSEK R., KURPIEL W., POLNIK B.: *Innowacyjny hybrydowy układ napędu elektrycznego – Badania symulacyjne*. Praca statutowa ITG KOMAG 2016 (niepublikowana).
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
- [5] PN-G-42000:1996 Górnictwo. Elektroenergetyka kopalniana. Napięcia znamionowe.
- [6] PN-G-47071:1997 Górnicze koleje podziemne. Ładownice baterii akumulatorów trakcyjnych. Wymagania.
- [7] PN-G-50090:1997 Ochrona pracy w górnictwie. Sieć elektryczna trakcji przewodowej. Wymagania.
- [8] Dokumentacja techniczno-ruchowa (instrukcja obsługi) Silnik trójfazowy synchroniczny z magnesami trwałymi typu PMP 250L-w.
- [9] Karta katalogowa. Dołowa lokomotywa elektryczna Ld-31EM.
- [10] Karta katalogowa ogniwi litowo-żelazowo-fosforanowych SP-LFP 100AHA.
- [11] Strona internetowa: www.clayton.com.

 mgr inż. Przemysław Deja
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
e-mail: pdeja@komag.eu

artykuł recenzowany