

Układy zasilania i algorytmy sterowania elektrycznych podziemnych maszyn górniczych zasilanych bateryjnie

Artur Kozłowski, Łukasz Bołoz, Tomasz Szurlej

1. Wprowadzenie

Pojęcie napędu spalinowego czy elektrycznego maszyn roboczych dotyczy kompletnych jednostek napędowych, czyli uzyskania w efekcie energii mechanicznej, którą możemy wykorzystać do napędu układu jezdnego maszyny i napędu układów roboczych. Silniki – tak spalinowe, jak i elektryczne – są znane i z powodzeniem stosowane od lat w maszynach stacjonarnych oraz mobilnych. Jednak silniki elektryczne nie zużywają tlenu i nie wydzielają spalin, co korzystnie wpływa na środowisko oraz zdrowie człowieka [1]. Nie generują aż tyle hałasu, a przy tym charakteryzują się sprawnością na poziomie ponad 90%, a nawet około 98%, przez co generują znacznie mniej ciepła, a do tego elektryczna jednostka napędowa jest mniej skomplikowana [2]. Stąd tam, gdzie można zastosować zasilanie sieciowe, napęd elektryczny wygrywa. W przypadku pojazdów, maszyn mobilnych czy pracujących w dużej odległości od źródła zasilania energią elektryczną zwyczajowo stosuje się napęd spalinowy. Jeżeli jednak chcemy zastosować zasilanie bateryjne, nazywane w skrócie napędem baterijnym, to pojawiają się dodatkowe poważne problemy. Dostyc istotną wadą zasilania baterijnego jest ograniczony zasięg czy też ograniczony czas pracy maszyny, w szczególności, gdy uwzględnimy długi czas ładowania. Zastosowanie dodatkowych układów zasilanych elektrycznie, jak oświetlenie, klimatyzacja czy układy sterowania, diagnostyki i kontroli, dodatkowo skraca czas pracy. Stąd w przypadku takich maszyn kluczowe jest zarządzanie i kontrola stanu baterii oraz optymalizacja systemów nadzorujących pracę baterii [3]. W przypadku górnictwa podziemnego nie występuje jedynie problem

zmniejszenia czasu pracy z powodu niskich temperatur. Oprócz aspektów technicznych niezwykle ważne są również względy ekonomiczne związane z kosztem zakupu, jak również eksploatacji baterii [4, 5].

Bardzo ważnymi czynnikami związanymi z podziemną eksploatacją rud metali są koszty wentylacji wyrobisk, niwelowania negatywnego wpływu substancji powstałych ze spalania paliw płynnych przez wykorzystywane maszyny na zdrowie pracującej tam załogi. W celu ograniczenia kosztów oraz poprawy warunków pracy załogi wskazane jest zastępowanie silników wysokoprężnych silnikami elektrycznymi zasilanymi sieciowo oraz bateryjnie. Tendencja taka obserwowana jest w wielu krajach na całym świecie, przy czym prekursorem jest Kanada [2, 6]. Dotyczy to w szczególności samojezdnych maszyn górniczych, takich jak wozy wierzące, kotwiące, ładowarki LHD oraz wozy odstawcze. Należy jednak podkreślić, że użytkownik oczekuje, że maszyna z napędem elektrycznym będzie posiadać takie same parametry i właściwości funkcjonalne, jak maszyna napędzana silnikiem spalinowym. Jest to poważne wyzwanie, ponieważ pomimo że napęd elektryczny jest znany i szeroko stosowany również w maszynach górniczych, to jednak kwestia zasilania baterijnego jest nadal czymś nowym. Dodatkowo należy podkreślić, że trudność wynika zwłaszcza ze specyficznych warunków górnictwa podziemnego i związanych z nimi wymagań.

W przypadku wozów wierzących, kotwiących oraz pomocniczych proces roboczy realizowany jest przez pewien czas w jednym miejscu, stąd najczęściej stosowane są rozwiązania pozwalające

Streszczenie: W przedmiotowym artykule omówiono prace, w wyniku których powstały dwie samojezdne elektryczne maszyny górnicze zasilane bateryjnie, przeznaczone do pracy w warunkach polskiej kopalni rud miedzi. Obecnie w górnictwie światowym obserwuje się rosnące zainteresowanie maszynami elektrycznymi zasilanymi bateryjnie, które zastępują rozwiązania napędzane silnikami spalinowymi. W wyniku współpracy firmy Mine Master, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG oraz AGH w Krakowie zrealizowano szereg prac, które pozwoliły w rezultacie na wyprodukowanie dwóch zupełnie nowych maszyn. W celu opracowania wymagań i założeń do projektowanych układów napędowych z zasilaniem baterijnym przeprowadzono badania dołowe istniejących maszyn spalinowych. Wykorzystując wyniki tych badań, opracowano układy zasilania oraz algorytmy sterowania, które zostały zweryfikowane w środowisku wirtualnym, a następnie na stanowisku badawczym. Algorytmy pozwalają na sterowanie maszynami podczas ładowania i rozładowywania baterii, w trybie pracy oraz jazdy, a także uwzględniają odzysk energii hamowania. Algorytmy uwzględniają również niepożądane sytuacje, jak wahania napięcia zasilania czy ograniczenie mocy ładowania. Finalnie układy zasilania wraz z algorytmami sterowania zostały zaimplementowane i sprawdzone w wyprodukowanych maszynach bateryjnych podczas prób ruchowych.

Słowa kluczowe: napęd baterijny, zasilanie bateryjne, samojezdne maszyny górnicze, elektryczne maszyny górnicze, algorytmy sterowania

na doładowanie baterii w miejscu pracy. Natomiast wozy odstawcze i ładowarki LHD znajdują się przez większość czasu w ruchu, stąd stosowane są systemy szybkiej wymiany baterii połączone z szybkim ładowaniem lub szybkie ładowanie bez wymiany baterii. Dodatkowo dla wszystkich rodzajów maszyn bateryjnych dosyć często stosowany jest odzysk energii hamowania, która doładowuje baterie [2]. Odzysk energii hamowania stosowany jest nie tylko w samojezdnym maszynach górniczych na podwoziu kołowo-oponowym, ale również w kolejkach spągowych kołowo-szynowych w górnictwie węglowym [7].

Wyniki badań symulacyjnych wskazują jednak na przewagę szybkiego ładowania zwłaszcza w perspektywie kilkuletniej eksploatacji. W jednym z opracowań [8] autorzy wykazali, że przy pięcioletniej eksploatacji z punktu widzenia efektywności i kosztów eksploatacji maszyn korzystniejsze jest stosowanie szybkiego ładowania. Stąd słusze jest zastosowanie ładowarki zabudowanej na maszynie z możliwością doładowania w miejscu pracy z dostępnej sieci oraz z funkcją odzysku energii hamowania. Dodatkowo maszyna może być szybko ładowana za pomocą zewnętrznych ładowarek o dużej mocy.

Projektowanie maszyn dla górnictwa podziemnego wymaga stosowania nowoczesnych metod, które pozwalają na spełnienie wymagań użytkowników przy uwzględnieniu niezwykle trudnych warunków pracy [9, 10]. Zasilanie bateryjne maszyn stanowi dodatkowe wyzwanie konstrukcyjne i ekonomiczne [11]. Wyzwania przy projektowaniu współczesnych maszyn przeznaczonych do pracy pod ziemią obejmują również aspekty związane z bezpieczeństwem i higieną pracy, w tym coraz częściej poruszany problem nadmiernego hałasu [12], ale również dotyczą szybko rozwijającej się robotyzacji i automatyzacji [13] oraz cyfryzacji [14, 15].

Prace zrealizowane przy współpracy firmy Mine Master, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Techniki Innowacyjnych EMAG oraz AGH w Krakowie zostały wykorzystane podczas projektowania dwóch samojezdnym maszyn górniczych, a mianowicie wozu wierzącego i wozu kotwiącego. Samojezdne wozy

wierzące i kotwiące realizują procesy wiercenia i kotwienia, które należą do podstawowych procesów urabiania stosowanych w systemie komorowo-filarowym. W przypadku tych maszyn procesy te determinują zapotrzebowanie na moc układów roboczych. Proces kotwienia jest niezbędny i pozwala na kontrolowanie stateczności wyrobiska. Wiercenie występuje tak w przypadku wozów wierzących, jak i kotwiących. Energochłonność oraz efektywność procesu wiercenia zależy od wielu czynników, zwłaszcza od sposobu wiercenia, średnicy otworu, rodzaju i stanu narzędzia oraz własności fizykomechanicznych urabianej skały [16, 17].

Obie maszyny zostały wyprodukowane i przetestowane. Przeprowadzono badania stanowiskowe oraz próby ruchowe, podczas których testowano zwłaszcza własności użytkowe zasilania baterijnego. W wyniku tych prób i badań potwierdzono poprawność opracowanych układów siłowych oraz algorytmów pracy [18]. Dane techniczne oraz dodatkowe informacje można znaleźć w katalogu na stronie producenta, firmy Mine Master [19]. Należy wyraźnie podkreślić, że są to pierwsze na świecie maszyny, które są przeznaczone do wyrobisk niskich. Wóz wierzący Face Master FM 1,7LE charakteryzuje się wysokością 1,65 m (rys. 1), natomiast wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE 1,8 m (rys. 2). Obie maszyny posiadają możliwość manewrowania w wyrobiskach o szerokości 4,5 m w systemie komorowo-filarowym. Należy podkreślić, że maszyny te zostały wyposażone w zabudowane ładowarki baterii, co pozwala na bezpośrednie ładowanie z sieci kopalnianej. Rozwiązania firm konkurencyjnych wymagają wyrobisk znacznie przekraczających 2 metry, a nierzadko prawie 3 metry.

Tematyka górniczych maszyn bateryjnych w ostatnich latach jest szeroko poruszana na różnych konferencjach oraz w czasopiśmie naukowych. Producenci oferują coraz nowsze rozwiązania górniczych maszyn elektrycznych zasilanych bateryjnie, przeznaczonych do określonych warunków pracy [20]. Maszyny te, ze względu na konieczność ładowania, muszą być dostosowane do sieci energoelektrycznej przyszłego

Rys. 1. Samojezdny wóz wierzący Face Master FM 1,7LE firmy Mine Master



Rys. 2. Samojezdny wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE firmy Mine Master



użytkownika. Szczegółowe informacje dotyczące nastaw i parametrów układów zasilania i algorytmów sterowania nadal pozostają *know how* ich producentów. Ogólne algorytmy sterowania dla typowego cyklu rozładowania i ładowania baterii znaleźć można w wielu opracowaniach, w różnych wariantach. Zwłaszcza w ostatnich latach prowadzone są badania nad nowoczesnymi regulatorami i sztuczną inteligencją. Jednak dostępne pozycje literaturowe dotyczą maszyn pracujących na powierzchni, zwłaszcza pojazdów, jednak z różnych względów tylko niektóre typy baterii, układy zasilania oraz komponenty mogą zostać zastosowane w warunkach kopalni podziemnych [18].

2. Układ siłowy wozu wierzącego i kotwiącego

Dla każdej nowo projektowanej maszyny dla górnictwa podziemnego konieczne jest określenie wymagań na podstawie warunków pracy oraz oczekiwań użytkownika. Ma to szczególne znaczenie w przypadku zupełnie nowego rozwiązania, jakim są samojezdne elektryczne maszyny górnicze zasilane bateryjnie. Dla każdej kopalni warunki pracy oraz wymagania użytkowników są inne.

W związku z tym w pierwszym etapie prac przeprowadzono badania dołowe, które polegały na rejestracji wybranych parametrów maszyn. Zarejestrowane i przeanalizowane dane, wraz z zebranymi uwagami i wymaganiami przyszłego użytkownika maszyn, posłużyły do opracowania założeń i wytycznych do projektowanego układu siłowego wraz z algorytmami sterowania. Następnie opracowano układy siłowe i algorytmy sterowania, które zostały sprawdzone podczas badań symulacyjnych w środowisku PLC. Podczas realizacji badań rozpatrzono właściwości różnych rodzajów akumulatorów oraz budowę i parametry układów zarządzających ich pracą. Opracowane w ramach opisanych badań algorytmy sterowania uwzględniają wymagania wynikające z harmonogramu eksploatacji maszyn z wyróżnieniem podstawowych cykli, jak postój, jazda, praca, oraz przyjętej koncepcji układu napędowego. W celu przeprowadzenia dalszych badań zaprojektowano i wykonano stanowisko laboratoryjne pozwalające na symulowanie obciążenia maszyny i rozładowywania baterii, ładowania baterii z sieci oraz odzysku energii hamowania. Badania przeprowadzono dla wszystkich możliwych kombinacji

parametrów. Oprócz typowych sytuacji analizowano sytuacje, w których następuje odzysk energii hamowania dla baterii w pełni naładowanej czy równoczesne ładowanie baterii oraz pracy układów roboczych maszyny. Przeprowadzona walidacja potwierdziła poprawność opracowanych układów siłowych i algorytmów sterowania, które zostały wykorzystane w samojezdnym wozie wierzącym oraz samojezdnym wozie kotwiącym. Badania ruchowe wyprodukowanych maszyn również potwierdziły poprawność układów siłowych i algorytmów sterowania.

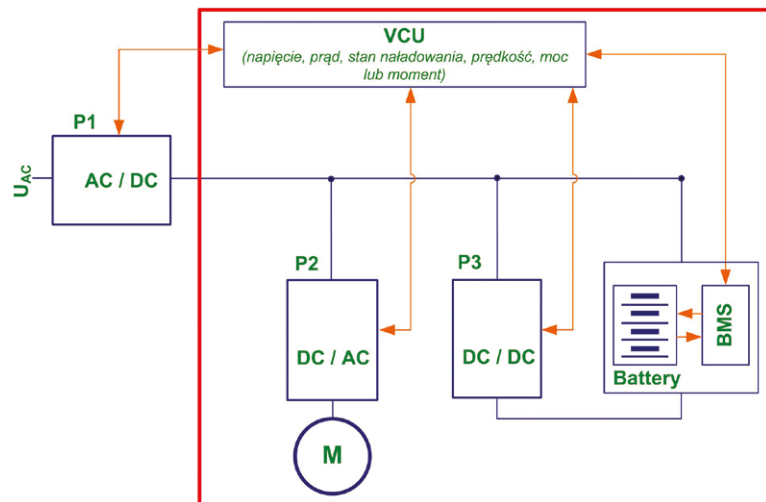
W projektowanej maszynie jednym z ważniejszych układów jest siłowy układ elektryczny. To od elektrycznego układu zasilania zależy mobilność maszyny, a co za tym idzie – jej parametry robocze i użytkowe. Elektryczny obwód główny (silnoprądowy) zaprojektowano tak, aby dla wozu wierzącego i kotwiącego miał taką samą konfigurację. Różnice występujące będą jedynie w wielkości silnika głównego, baterii czy też w układach hydrauliki. Uwzględniając założenia wynikające z funkcjonalności maszyn w wersji spalinowej, zaprojektowano układ siłowy, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 3.

Układ składa się z trzech przekształtników P1, P2 i P3. Przekształtnik P1 służy do połączenia sieci AC (*Alternative Current*) z szyną prądu stałego DC (*Direct Current*) na maszynie. Dla standardowych parametrów sieci prostownik będzie pracował w trybie pasywnym, który polega na prostowaniu napięcia. Poprawę pracy w trybie aktywnym osiąga się przez włączenie na wejście falownika filtra LC (*inductor-capacitor*). Do ładowania baterii służy przekształtnik P3, zaś przekształtnik P2 służy do zasilania i regulacji silnika głównego napędu M. Sterowanie odbywa się z VCU (*Vehicle Control Unit*), w ramach którego program sterujący maszyną zapisany jest w sterowniku PLC (*Programmable Logic Controller*).

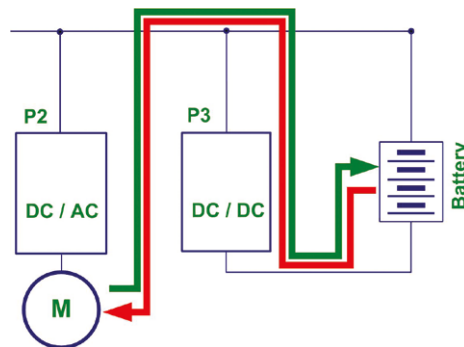
W czasie jazdy wykorzystany zostaje przekształtnik P2. Przekształtnik P3 podłączony do baterii wykorzystuje aplikację DC/DC i pracuje w trybie napięciowym VCM (*Voltage Control Mode*) z opcją utrzymywania napięcia po stronie szyny DC. Przekształtnik P2 zasilający silnik napędowy pracuje wtedy w trybie DC/AC. Schemat układu podczas jazdy maszyny przedstawiono na rys. 3 (czerwona ramka). Podczas jazdy silnik pobiera energię tylko z baterii. Istotną zaletą jest zwrot energii do baterii podczas jazdy w dół.

Ładowanie baterii oraz praca odbywają się zgodnie z układem przedstawionym na rys. 3. Dzięki zabudowanej ładowarce baterii na maszynie ładowanie odbywa się bezpośrednio z sieci kopalnianej. Praca obu maszyn w wyrobisku, czyli wiercenie i kotwienie, zawsze prowadzone są przy maszynie podłączonej do sieci kopalnianej. W praktyce jednak zdarzają się zaniki napięcia ze stacji zasilającej, co skutkuje przerwą pracy maszyny. Aby zapobiec tym przerwom, możliwe jest zasilanie układu hydraulicznego z baterii. W przypadku bardzo trudnych warunków występujących podczas wiercenia skał trudno urabialnych możliwa jest praca z zasilaniem bateryjnym ze zwiększoną mocą na silniku głównym.

Zgodnie z założeniami jazda odbywa się z zasilaniem bateryjnym. Moc pobierana przez silnik jest mocą pobraną z baterii, pomniejszoną o straty w przekształtnikach. Rozpływ mocy w czasie jazdy pokazany został na rys. 4 (czerwona linia).



Rys. 3. Schemat ideowy układu siłowego maszyny



Rys. 4. Schemat rozplywu mocy w czasie jazdy maszyny (czerwona) oraz hamowania (zielona)

W przypadku jazdy energia będzie przepływała zawsze od baterii do silnika głównego. W analizowanych przypadkach schematy rozplywu mocy opracowano z pominięciem strat pochodzących od przekształtników. Straty zamieniane są w ciepło i odprowadzane przez układ chłodzenia.

Hamowanie jest ważnym elementem jazdy maszyny wpływającym na bezpieczeństwo. Główną rolę w tym procesie odgrywa hamowanie hamulcami dynamicznymi z opcją hamowania silnikiem głównym ze zwrotem energii do baterii. Ładowanie baterii musi być zawsze zakończone pewną rezerwą, aby było miejsce w baterii na przyjęcie energii pochodzącej z hamowania. Rozpływ mocy w czasie hamowania pokazano na rys. 4 (zielona linia). Przepływ mocy następuje z silnika do baterii.

Ładowanie baterii odbywa się w pobliżu stacji zasilającej lub w komorze

remontowej. Ładowanie następuje poprzez przekształtnik P1 i P3. Energia ładowania z sieci magazynowana jest w baterii. Na rys. 5 (ciemnozielona linia) przedstawiono rozpływ mocy w czasie ładowania.

Po dojeździe maszyny na stanowisko pracy możliwe jest doładowywanie baterii w czasie pomiędzy wykonywaniem kolejnych otworów lub zabudową kolejnych kotew czy też w czasie realizacji procesów pomocniczych. Pozwala to bardziej efektywnie wykorzystać czas pracy maszyny. Nadrzędny układ sterowania kontroluje sumaryczny prąd pobierany z sieci. Rozpływ mocy przedstawiono na rys. 5 (jasnozielona linia).

3. Algorytmy sterowania

Następnie opracowano algorytmy sterowania układem energoelektronicznym w czasie jazdy i pracy maszyny z uwzględnieniem różnych kombinacji.

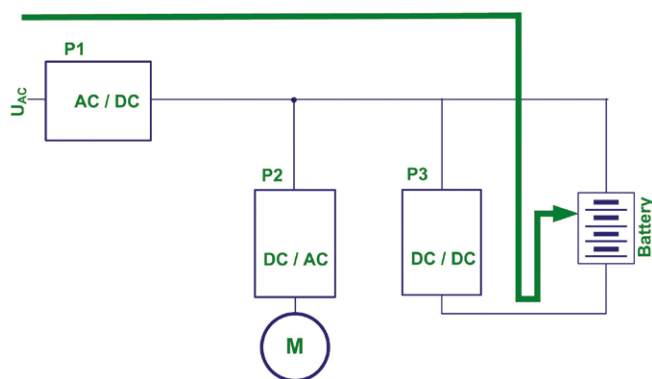
Ze względu na podobną budowę siłowych obwodów elektrycznych wozu wierzącego oraz kotwiącego opracowano wspólne algorytmy dla obydwu typów maszyn.

Przekształtniki P1, P2 oraz P3 skonfigurowano w zależności od wybranego trybu pracy. Odpowiednia konfiguracja zapewnia poprawną pracę maszyny z uwzględnieniem zastosowania odpowiednich ograniczeń, co gwarantuje bezpieczną eksploatację zasilanych urządzeń. Szczególną uwagę zwrócono na konfigurację przekształtników współpracujących z baterią akumulatorów. Skonfigurowano również układ nadzoru, aby nie dopuścić do głębokiego rozładowania baterii oraz aby zapewnić optymalne warunki ładowania, zadawane przez układ nadzoru baterii BMS (*Battery Management System*). W zależności od trybu pracy lub jazdy odpowiednie przekształtniki są blokowane lub konfigurowane. Po wybraniu odpowiedniego trybu pracy maszyny konfiguracja urządzeń odbywa się automatycznie przez sterownik PLC komunikujący się magistralą transmisyjną CAN (*Controller Area Network*).

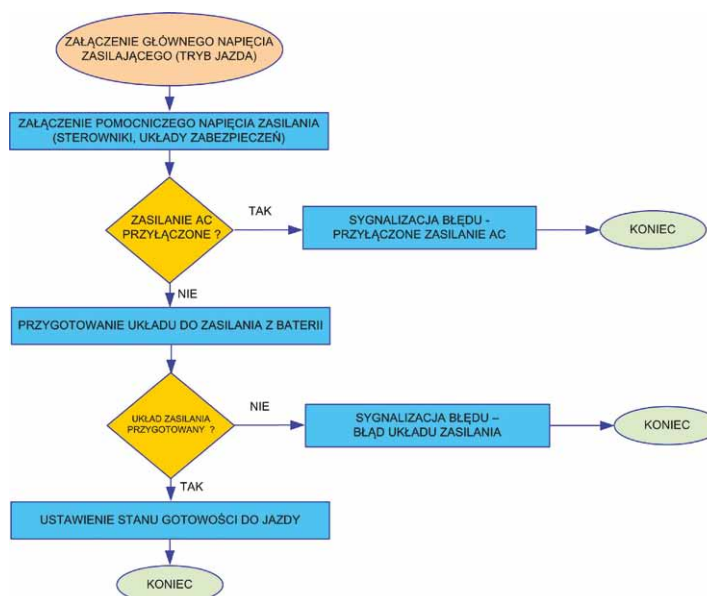
3.1. Algorytmy załączania napięcia zasilania

Załączenie napięcia zasilania odbywa się według dwóch algorytmów, w zależności od trybu pracy lub jazdy. Główne napięcie zasilania to napięcie szyny DC dla zasilania baterią oraz napięcie AC w przypadku, gdy realizowany jest tryb pracy (wiercenie lub kotwienie). Przed załączeniem napięć głównych załączane jest napięcie pomocnicze zasilające obwody sterowników PLC oraz układów zabezpieczeń. Przekształtniki są konfigurowane przed załączeniem zasilania głównego.

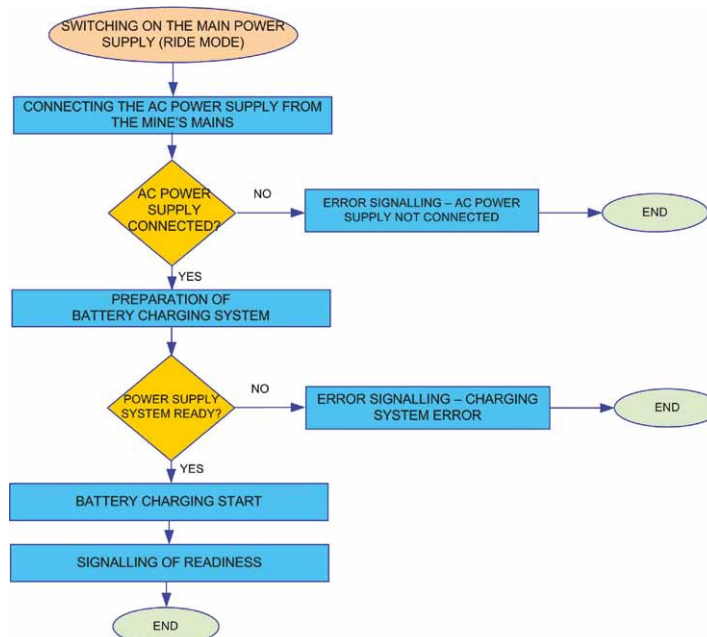
Algorytm sterujący procesem załączania napięcia w czasie jazdy przedstawiono na rys. 6. W czasie jazdy maszyny jako źródło zasilania wykorzystywana jest bateria akumulatorów. Zgodnie z algorytmem sterowania układ sprawdza po kolei wszystkie systemy i przygotowuje układ do pracy. W trybie tym maszyna nie może być podłączona za pomocą kabla do źródła napięcia AC, kabel zasilający nie może być rozwinięty, a układ zasilania musi



Rys. 5. Schemat rozplywu mocy w czasie ładowania maszyny



Rys. 6. Algorytm procedury załączania napięcia zasilania w trybie jazdy



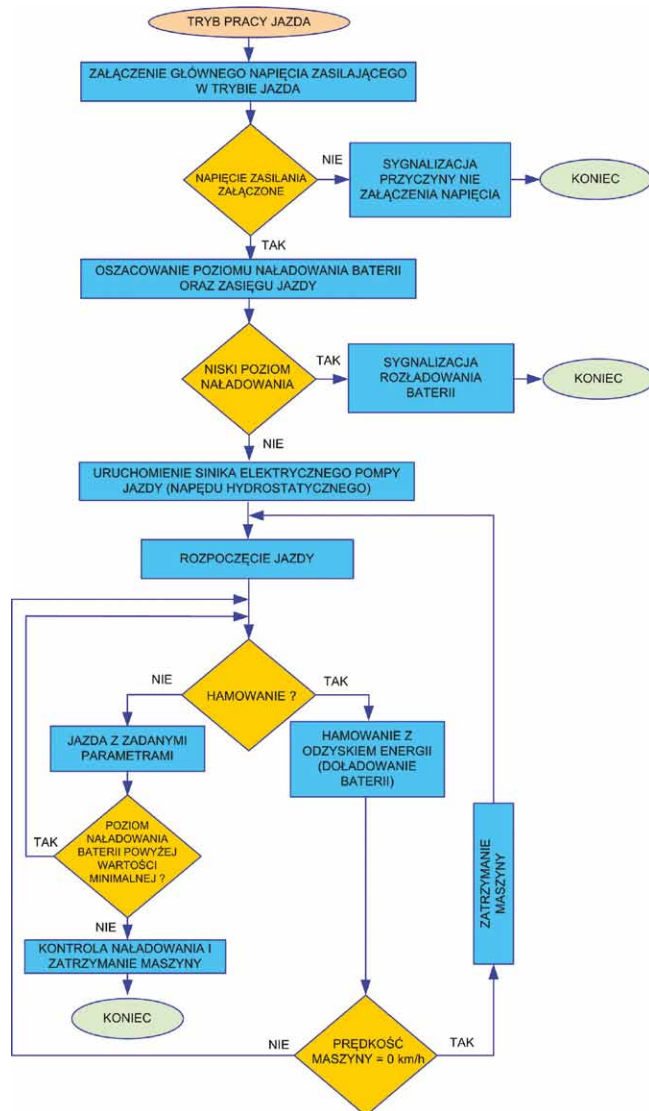
Rys. 7. Algorytm procedury załączania napięcia zasilania w trybie pracy

działać prawidłowo. Zanim nastąpi jazda, układ zasilania baterii musi zostać przygotowany.

Algorytm sterujący procesem załączenia napięcia w trybie pracy przedstawiono na rys. 7. W trybie pracy, po załączeniu napięcia pomocniczego, przekształtniki (P1, P2, P3) skonfigurowane są do pracy. W czasie pracy maszyny (wiercenie, kotwienie) jako źródło zasilania wykorzystywana jest kopalniana sieć AC. Podobnie jak w przypadku jazdy, układ zasilania jest najpierw przygotowywany i sprawdzana jest poprawność jego działania. W kolejnym kroku następuje przyłączenie baterii i do obwodu załączany jest przekształtnik P1 oraz P3. W tym momencie układ elektryczny jest przygotowany do pracy.

3.2. Algorytmy sterowania układem energoelektronicznym maszyny

Algorytm sterujący układem energoelektronicznym również wybierany jest w zależności od trybu pracy lub jazdy. Algorytm w czasie jazdy przedstawiono na rys. 8. W trybie jazdy, po załączeniu napięcia, układ elektryczny jest przygotowany do jazdy. Przekształtniki (P2, P3) skonfigurowane są do jazdy. Przed rozpoczęciem jazdy układ sterowania maszyną sprawdza stan naładowania baterii akumulatorów. W przypadku całkowicie rozładowanej baterii jazda nie jest możliwa. Po otrzymaniu rozkazu jazdy układ sterowania uruchamia



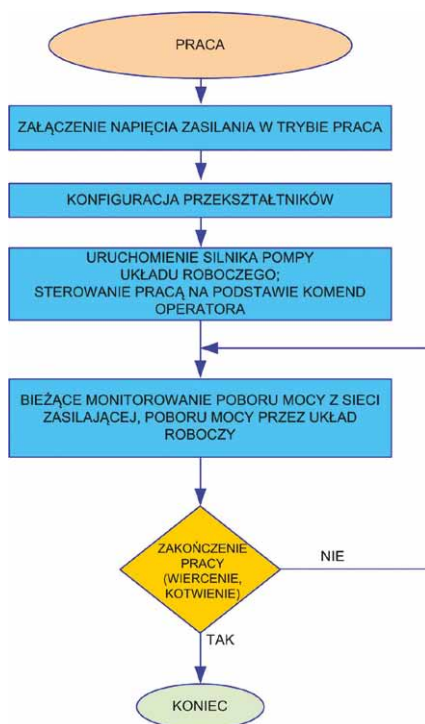
Rys. 8. Algorytm sterujący układem energoelektronicznym w czasie jazdy

silnik elektryczny napędu jazdy. W czasie jazdy nadrzędny układ sterowania w PLC kontroluje w sposób ciągły stan rozładowania baterii. Układ na bieżąco informuje operatora o stanie rozładowania baterii akumulatorów. W przypadku osiągnięcia rozładowania krytycznego należy zatrzymać maszynę, w przeciwnym wypadku układ nadzoru baterii (BMS) rozłączy baterię. Dalsza jazda może być kontynuowana po naładowaniu baterii co najmniej do wartości minimalnej. Hamowanie maszyny w większości przypadków odbywa się ze zwrotem energii do baterii. W sytuacji awaryjnej, kiedy bateria akumulatorów zostanie rozłączona lub silnik zostanie zatrzymany przez awarię falownika, nadrzędny układ sterowania rozpoczyna hamowanie awaryjne z wykorzystaniem hamulców mechanicznych. Dalsza jazda (załączenie silnika głównego) odbywa się po uzyskaniu gotowości do jazdy, czyli po ustąpieniu przyczyny awaryjnego zatrzymania i skasowaniu błędów.

Algorytm sterowania układem energoelektrycznym w czasie pracy przedstawiono na rys. 9. Po załączeniu napięcia, zgodnie z opisaną wcześniej procedurą, układ elektryczny jest przygotowany do pracy. Przekształtniki (P1, P2, P3) konfigurowane są do pracy. W trybie pracy stan naładowania baterii jest stale kontrolowany przez sterownik nadrzędnego układu sterowania. Po otrzymaniu przez nadrzędny układ sterowania żądania pracy następuje załączenie silnika pompy układu roboczego. Od chwili załączenia napięcia zasilania stan rezystancji izolacji jest stale kontrolowany. W przypadku wykrycia obniżenia rezystancji należy wyłączyć napięcie zasilające maszynę.

Podsumowanie

Wszędzie tam, gdzie stosowane są maszyny napędzane silnikami spalinowymi, poszukuje się możliwości ich zastąpienia maszynami elektrycznymi. Obecnie najbardziej rozwijane są maszyny zasilane bateryjnie (BEV), jednak prowadzone są również prace nad napędami elektrycznymi, dla których źródłem zasilania będą wodorowe paliwa ogniowe (FCEV). W przypadku wielu maszyn roboczych oraz pojazdów zasilanie sieciowe nie pozwala na pełną funkcjonalność, stąd konieczne



Rys. 9. Algorytm sterujący układem energoelektrycznym w czasie pracy

jest stosowanie zasilania bateryjnego. Dla każdej maszyny roboczej kluczowe jest, aby jej wersja zasilana bateryjnie spełniała te same wymagania, co wersja spalinowa. Stąd każdorazowo konieczne jest określenie wymagań w docelowym miejscu pracy, w aspekcie zasilania bateryjnego. Górnictwo podziemne charakteryzuje się trudnymi warunkami pracy oraz wymaganiami, które nie pozwalają implementować rozwiązań stosowanych w innych branżach. Warunki w kopalniach podziemnych są tak zróżnicowane, że nie zawsze istnieje możliwość opracowania uniwersalnych rozwiązań i maszyn.

Celem opisanych w tym artykule prac było wyznaczenie i opisanie stanów pracy maszyny oraz opracowanie takich układów zasilania i algorytmów sterowania, aby możliwa była jej praca we wszystkich występujących w analizowanej kopalni warunkach pracy. Po opisaniu podstawowych stanów pracy maszyny wyznaczone zostały algorytmy sterowania układem energoelektrycznym. Upraszczając zagadnienie, można powiedzieć, że sprowadza się to do stanów ładowania i rozładowania baterii w różnych możliwych warunkach. Omówione szczegółowo

algorytmy załączenia napięcia głównego, jazdy oraz pracy wyznaczają takie sterowanie zastosowanymi przekształtnikami oraz pozostałymi elementami układu elektrycznego, aby możliwa była praca z parametrami elektrycznymi odpowiadającymi danym znamionowym projektowanej maszyny. W dalszej kolejności sprawdzono wyznaczone algorytmy podczas badań symulacyjnych oraz w rzeczywistym układzie elektrycznym. W efekcie przeprowadzonych prac firma Mine Master wyprodukowała samojezdny elektryczny wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE oraz wierzący Face Master FM 1,7LE. Maszyny te są pierwszymi w Polsce zaprojektowanymi i wykonanymi dla warunków KGHM SA w pełni elektrycznymi i zasilanymi bateryjnie maszynami. Obie maszyny posiadają zabudowane ładowarki, które pozwalają na doładowanie z sieci kopalnianej, co jest znaczącym osiągnięciem przy uwzględnieniu ich wysokości oraz szerokości. Maszyny zasilane bateryjnie są nieuniknioną przyszłością górnictwa, która kreowana jest również przez polskie jednostki naukowo-badawcze oraz polskie firmy.


Finansowanie: Prace zrealizowano w ramach projektu finansowego z NCBiR POIR.01.01.01-00-D011/16 „Nowa generacja modułowych maszyn, wierzącej i kotwiącej, z napędami bateryjnymi, przeznaczonych do pracy w podziemnych kopalniach rud miedzi i surowców mineralnych”.

Podziękowania: Podziękowania dla KGHM Polska Miedź SA za umożliwienie badań dołowych oraz wsparcie podczas ich realizacji.

Literatura

- [1] FUGIEL A., BURCHART-KOROL D., CZAPLIKA-KOLARZ K., SMOLIŃSKI A.: *Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sector of European countries.* „Journal of Cleaner Production” 143/2017.
- [2] BOŁOZ Ł.: *Światowe trendy w rozwoju podziemnych maszyn górniczych z napędami bateryjnymi*, VI Science Sympo-

- sium: *Rozwój i eksploatacja maszyn górnictwa podziemnego surowców mineralnych – efekty współpracy przemysłu i nauki* (online symposium), 23.04.2021.
- [3] GUO YJ., YANG ZL., LIU KL., ZHANG YH., FENG W.: *A compact and optimized neural network approach for battery state-of-charge estimation of energy storage system*. „Energies” 11/2021.
- [4] MIAO Y., HYNAN P., JOUANNE A., YOKOCHI A.: *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements*. „Energies” 12/2019.
- [5] WENTKER M., GREENWOOD M., LEKER J.: *A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials*. „Energies” 12/2019.
- [6] The 100% electric mine – Converting the biggest diesels to electric. Available online: <https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/funding-partnerships/funding-opportunities/current-investments/the-100-electric-mine-converting-the-biggest-diesels-electric/22639> (dostęp 20 lipca 2021).
- [7] POLNIK B., KACZMARCZYK K., NIEDWOROK A., BALTES R., CLAUSEN E.: *Energy Recuperation as One of the Factors Improving the Energy Efficiency of Mining Battery Locomotives*. „Management Systems in Production Engineering” 4/2020.
- [8] RAFI M.A.H., RENNIE R., LARSEN J., BAUMAN J.: *Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines*. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2020.
- [9] BOŁOZ Ł., CASTAÑEDA L.F.: *Computer-Aided Support for the Rapid Creation of Parametric Models of Milling Units for Longwall Shearers*. „Management Systems in Production Engineering” 4/2018.
- [10] BOŁOZ Ł.: *Digital Prototyping on the Example of Selected Self-Propelled Mining Machines. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. 2020.
- [11] BURD J.T.J., MOORE E.A., EZZAT H., KIRCHAIN R., ROTH R.: *Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions*. „Applied Energy” 12/2020.
- [12] BIAŁY W., BOŁOZ Ł., SITKO J.: *Mechanical processing of hard coal as a source of Noise pollution*. „Energies” 14/2021.
- [13] BOŁOZ Ł., BIAŁY W.: *Automation and Robotization of Underground Mining in Poland*. „Applied Science” 10/2020.
- [14] KOZŁOWSKI A., WOJTAS P.: *Systemowe podejście do cyfryzacji w procesach technologicznych w górnictwie*. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, 99/2017.
- [15] WOJTAS P., KOZŁOWSKI A., WOJTAS M.: *Digitization of Polish mining industry by reducing costs and improving safety and quality of finished product*. „Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering” 3/2017.
- [16] BOŁOZ Ł.: *Interpretation of the results of mechanical rock properties testing with respect to mining methods*. „Acta Montanistica Slovaca” 1/2020.
- [17] KOTWICA K., MAŁKOWSKI P.: *Methods of Mechanical Mining of Compact-Rock. A Comparison of Efficiency and Energy Consumption*. „Energies” 12/2019.
- [18] KOZŁOWSKI A., BOŁOZ Ł.: *Design and research on power systems and algorithms for controlling electric underground mining machines powered by batteries*. „Energy” 14/2021.
- [19] Battery Electric Rigs, Mine Master Spółka z o.o., Available online: <https://www.minemaster.eu/battery-electric-rigs> (dostęp 20 lipca 2021).
- [20] WEISS H., WINKLER T., ZIEGERHOFER H.: *Large lithium-ion battery-powered electric vehicles. From idea to reality*, ELEKTRO, Mikulov, Czech Republic, 2018.

 dr inż. Artur Kozłowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG;
dr inż. Łukasz Bołoz, AGH w Krakowie;
inż. Tomasz Szurlej, Mine Master Sp. z o.o.