

Samojezdne maszyny górnicze zasilane bateryjnie

Battery powered underground mining machines



*Dr inż. Artur Kozłowski**



*Dr inż. Łukasz Bołoz**)*



*Mgr inż. Andrzej Czajkowski***)*



*Mgr inż. Lesław Ostapów***)*

Treść: W przedmiotowym artykule przedstawiono 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 bateryjnym przeprowadzono badania dołowe istniejących maszyn spalinowych. Wykorzystując wyniki tych badań, opracowano układy zasilania oraz algorytmy sterowania, które zostały zweryfikowane w środowisku wirtualnym. Następnie opracowano i wykonano laboratoryjne stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono walidację układów zasilania i algorytmów sterowania. Podczas badań sprawdzono wszystkie możliwe sytuacje, w których bateria jest rozładowywana w wyniku jazdy lub pracy oraz ładowana z sieci kopalnianej lub energią odzyskaną podczas hamowania. Na stanowisku badawczym zasymulowano również niepożądane sytuacje, jak wahania napięcia zasilania czy ograniczenie mocy ładowania. Uzyskano pozytywne wyniki testów. Finalnie układy zasilania wraz z algorytmami sterowania zostały zaimplementowane i sprawdzone w wyprodukowanych maszynach bateryjnych, podczas prób ruchowych.

Abstract: This article discusses the work which resulted in the development of two battery-powered self-propelled electric mining machines intended for operation in the conditions of a Polish copper ore mine. Currently, the global mining industry is seeing a growing interest in battery-powered electric machines, which are replacing solutions powered by internal combustion engines. The cooperation of Mine Master, Łukasiewicz Research Network - Institute of Innovative Technologies EMAG and AGH University of Science and Technology allowed carrying out a number of works which resulted in the production of two completely new machines. In order to develop the requirements and assumptions for the designed battery-powered propulsion systems, underground tests of the existing combustion machines were carried out. Based on the results of these tests, power supply systems and control algorithms were developed and verified in a virtual environment. Next, a laboratory test stand for validating power supply systems and control algorithms was developed and constructed. The tests were aimed at checking all possible situations in which the battery gets discharged as a result of the machine's ride or operation, and

*) Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

**) AGH, Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu

***) Mine Master Spółka z o.o.

when it is charged from the mine's mains or with energy recovered during braking. Simulations of undesirable situations, such as fluctuations in the supply voltage or charging power limitation, were also carried out at the test stand. Positive test results were obtained. Finally, the power supply systems along with control algorithms were implemented and tested in the produced battery-powered machines during operational trials. The power systems and control algorithms are universal enough to be implemented in two different types of machines.

Słowa kluczowe:

napęd bateryjny, zasilanie bateryjne, samojezdne maszyny górnicze, elektryczne maszyny górnicze, wóz wierzący, wóz kotwiący

Keywords:

battery drive, battery power, supply mining machines, electric mining machines, control algorithms, drilling rig, bolting rig

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 (Fugiel i in. 2017). 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 (Bołoz 2021). 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 bateryjnym, to pojawiają się dodatkowe, poważne problemy. Dostyc istotną wadą zasilania bateryjnego 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 system mechatroniczny dodatkowo skraca czas pracy. Stąd, w przypadku takich maszyn kluczowe jest zarządzanie i kontrola stanu baterii oraz optymalizacja systemów nadzorujących pracę baterii (Guo i in. 2021). 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 (Miao i in. 2019, Wentker i in. 2019).

Bardzo ważnymi czynnikami związanymi z podziemną eksploatacją rud metali są koszty związane z wentylacją wyrobisk oraz negatywny wpływ 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 (Bołoz 2021), (Kozłowski i Bołoz 2021). 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

bateryjnego jest nadal czymś nowym. Dodatkowo należy podkreślić, że trudność wynika zwłaszcza ze specyficznych warunków górnictwa podziemnego i związanych z nimi wymagań.

Napęd elektryczny pojazdów i maszyn roboczych zasilanych z sieci wykorzystywany jest w przemyśle od wielu lat. Nie chodzi jedynie o tramwaje, pociągi, maszyny stacjonarne czy żurawie lub suwnice, ale takie maszyny robocze które poruszają się jednak w ograniczonym obszarze lub z niewielką prędkością, albo też transportowane są do różnych miejsc pracy i możliwe jest doprowadzenie do nich energii elektrycznej kablem lub pantografem, przez co praktycznie nie ma znaczenia moc czy czas pracy. Jako wybrane przykłady wymienić można semimobilny zestaw kruszący Metso Nordberg NW 80, autonomiczny ciągnik rolniczy John Deere ze zwijakiem kablowym, koparkę linową CAT 7495, koparkę Hitachi ZE85 czy wozidło Hitachi EH4000AC3 zasilane z pantografu podczas jazdy. Są to oczywiście jedynie wybrane przykłady elektrycznych maszyn roboczych. Również w górnictwie podziemnym, tam gdzie to możliwe, stosowane są maszyny elektryczne zasilane z sieci kopalnianej. Wyzwaniem są oczywiście maszyny mobilne, w przeciwieństwie do maszyn stacjonarnych, takie jak przenośniki taśmowe, wentylatory czy choćby punkty przesypowe, czyli tak zwane kraty. Typowymi elektrycznymi i zasilanymi maszynami górnictwa podziemnego są również kombajny ścianowe i chodnikowe czy ładowarki wąskoprzodkowe, które poruszają się w ograniczonym obszarze. Natomiast spośród typowych mobilnych elektrycznych maszyn znane są wozidła czy ładowarki, w których zastosowano zasilanie sieciowe, przez co wyposażone są w zwijak kabla. Jako przykłady wymienić można miniładowarkę L150E firmy Aramine przeznaczoną do wąskich wyrobisk, ładowarkę LH514E firmy Sandvik, czy też ładowarkę Scooptram EST1030 firmy Epiroc oraz wozidło HC12BE firmy Philips. Elektryczne maszyny robocze zasilane wyłącznie z baterii stosowane są szeroko w różnych branżach. Najbardziej znane są samochody osobowe czy ciężarowe albo coraz szerzej stosowane autobusy elektryczne, ale w przypadku tych maszyn mamy zupełnie inne warunki pracy i praktycznie jedynie układ jezdny bez wymagających układów roboczych. Jednak wśród roboczych, ciężkich maszyn, realizujących różne procesy wskazać można również te bateryjne, jak maszyny budowlane, zwłaszcza koparki lub maszyny rolne, w tym traktory.

W górnictwie podziemnym, ze względu na bardzo trudne warunki pracy oraz wysokie wymagania, maszyny zasilane bateryjnie zaczęto projektować i stosować stosunkowo późno, najwięcej dzieje się od około trzech lat. Obecnie kilku producentów posiada wybrane rozwiązania maszyn bateryjnych, które przeznaczone są do pracy w różnych warunkach:

- Aramine – miniładowarka L140B (Aramine 2021),
- Artisan Vehicles (od 2019 należy do Sandvik) ładowarka A4 i A10, wóz odstawczy Z50 (Artisan Vehicles 2021),

- Epiroc (do 2018 Atlas Copco) – wozy wierzące Boomer M2 i E2, wozy kotwiące Boltec M i E, ładowarka Scooptram ST14, wóz odstawczy Minetruck MT42, wiertnice Easer L, Simba M4, M6 i E7 (Epiroc 2021),
- Komatsu (do 2017 Joy Global) – kilkanaście modeli wozów odstawczych (Komatsu 2021a),
- MacLean Engineering – ponad dwadzieścia modeli maszyn pomocniczych (MacLean Engineering 2021),
- Normet – kilka maszyn pomocniczych (Normet 2021),
- Phillips Machine – wozy odstawcze (Phillips Machine 2021),
- Sandvik – ładowarka LH518B, wóz wierzący DD422iE, spycharka LZ101LE (Sandvik 2021).

Natomiast takie globalne firmy jak Komatsu oraz CAT zapowiadają wprowadzenie na rynek w najbliższym czasie maszyn bateryjnych takich jak wozy wierzące i kotwiące (Komatsu 2021b) oraz ładowarkę LHD (CAT 2021).

Konkurencyjnymi rozwiązaniami dla samojezdnych maszyn górniczych zasilanych bateryjnie są wozy wierzące i kotwiące firmy Sandvik i Epiroc. Firma Sandvik posiada jeden wóz wierzący DD422iE (rys. 1). Natomiast firma Epiroc

posiada w ofercie dwa bateryjne wozy wierzące Boomer E2 Battery i Boomer M2 Battery oraz dwa wozy kotwiące Boltec E Battery i Boltec M Battery. Wóz wierzący E2 jest większy od M2 (rys. 2), a wóz kotwiący E jest większy od M (rys. 3). Jednak wszystkie pięć wymienionych modeli wymagają wyrobiska o wysokości co najmniej 3 m (Artisan Vehicles 2021, Epiroc 2021).

W przypadku wozów wierzących, kotwiących oraz pomocniczych proces roboczy realizowany jest przez pewien czas w jednym miejscu, stąd najczęściej stosowane są rozwiązania pozwalające 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 (Bołoz 2021). Odzysk energii hamowania stosowany jest nie tylko w samojezdnych maszynach górniczych na podwoziu kołowo-oponowym, ale również w kolejkach spągowych kołowo-szynowych w górnictwie węglowym (Polnik i in. 2020).



Rys. 1. Wóz wierzący DD422iE firmy Sandvik (Artisan Vehicles 2021)

Fig. 1. Drilling rig DD422iE from Sandvik (Artisan Vehicles 2021)



Rys. 2. Wóz wierzący Boomer M2 Battery firmy Epiroc (Epiroc 2021)

Fig. 2. Drilling rig Boomer M2 Battery by Epiroc (Epiroc 2021)



Rys. 3. Wóz kotwiący Boltec M Battery firmy Epiroc (Epiroc 2021)

Fig. 3. Bolting rig Boltec M Battery by Epiroc (Epiroc 2021)

Wyniki badań symulacyjnych wskazują jednak na przewagę szybkiego ładowania zwłaszcza w perspektywie kilkuletniej eksploatacji. W jednym z opracowań (Rafi i in. 2020) autorzy wykazali, że przy pięcioletniej eksploatacji z punktu widzenia efektywności i kosztów eksploatacji maszyn korzystniejsze jest stosowanie szybkiego ładowania. Stąd słusznym 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 (Bołoz i Castaneda 2018, Bołoz 2020). Zasilanie bateryjne maszyn stanowi dodatkowe wyzwanie konstrukcyjne i ekonomiczne (Burd i in. 2020). 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 (Biały i in. 2021), ale również dotyczą szybko rozwijającej się robotyzacji i automatyzacji (Bołoz i Biały 2020) oraz cyfryzacji (Kozłowski i Wojtas 2017, Wojtas i in. 2017).

2. Parametry maszyn z zasilaniem bateryjnym

W wyniku współpracy firmy Mine Master, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG oraz AGH w Krakowie opracowano dwie samojedne maszyny górnicze (Kozłowski i Bołoz 2021), a mianowicie wóz wierzący Face Master FM 1,7LE (rys. 4) i wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE (rys. 5). Samojedne wozy wierzące i kotwiące realizują procesy wiercenia i kotwienia, które są jednymi z podstawowych procesów urabiania stosowanych w systemie komorowo-filarowym w górnictwie rudnym.

Producentem tych maszyn jest firma Mine Master Spółka z o.o. z siedzibą w Wilkowie. W tabeli 1 oraz tabeli 2 zestawiono najważniejsze parametry techniczne obu maszyn. Należy wyraźnie podkreślić, że są to pierwsze na świecie maszyny zasilane bateryjnie, z zabudowanymi ładowarkami, które są przeznaczone do wyrobisk niskich. Wóz wierzący charakteryzuje się wysokością 1,65 m, natomiast wóz kotwiący 1,8 m. Obie maszyny posiadają możliwość manewrowania w wyrobiskach o szerokości 4,5 m w systemie komorowo-filarowym. Zabudowane ładowarki baterii pozwalają na bezpośrednie ładowanie z sieci kopalnianej.

Oba wozy są typowymi maszynami BEV (*battery electric vehicle*) wyposażonymi w pakiet 5 baterii HV (*high voltage*) o pojemności 190 Ah i energii 123,5 kWh przy napięciu nominalnym 650 V. Wozy te napędzane są przez jeden silnik synchroniczny z magnesem trwałymi PMSM o mocy 133 kW. Silnik napędza zmiennik momentu, agregat hydrauliczny oraz sprężarkę klimatyzacji. Maszyny dostosowane są do pracy w sieciach elektroenergetycznych typu IT o napięciu znamionowym 3x500V, 3x690V oraz 3x1000V o częstotliwości znamionowej 50 Hz.

3. Badania dołowe maszyn z napędem spalinowym

Prace projektowe maszyn zasilanych bateryjnie poprzedzono badaniami dołowymi. Badania te przeprowadzono dla dwóch maszyn spalinowych, których parametry użytkowe były zbliżone do planowanych maszyn z zasilaniem bateryjnym (Kozłowski i Bołoz 2021). Do badań wykorzystano wóz kotwiący Roof Master RM 1,8 (rys. 6a) oraz wóz wierzący Face Master FM 1,7. Badania przeprowadzono w kopalni KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Polkowice-Sieroszowice. Podczas jazdy maszyn rejestrowano parametry układu napędowego, natomiast podczas pracy – parametry procesu roboczego oraz ciśnienia w układzie hydraulicznym organów roboczych (rys. 6b). Dane rejestrowano podczas realizacji



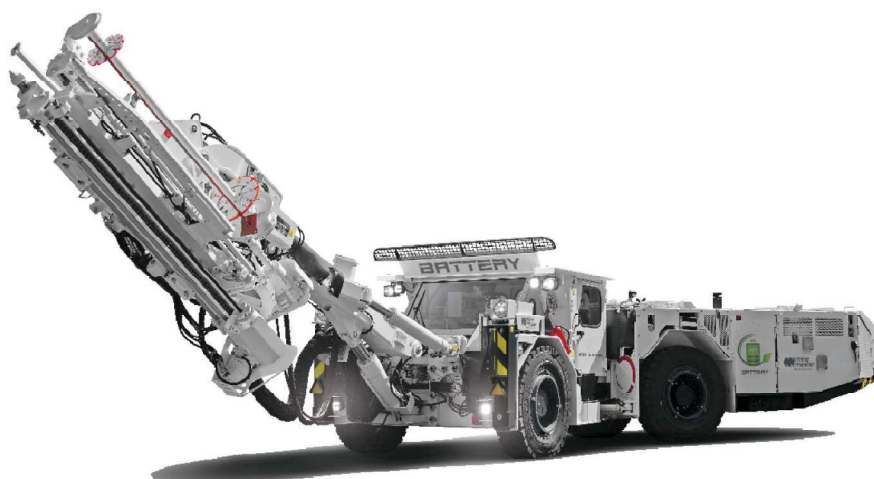
Rys. 4. Samojedny wóz wierzący Face Master FM 1,7LE (Mine Master 2021)

Fig. 4. Underground drilling rig Face Master FM 1,7LE (Mine Master 2021)

Tabela 1. Parametry wozu wierzącego Face Master FM 1,7LE (Mine Master 2021)

Table. 1. Technical characteristics of drilling rig Face Master FM 1,7LE (Mine Master 2021)

Parametr	wartość / jednostka	
Długość wozu	14 050 ±200 mm	
Wysokość wozu	min	1 700 ±30 mm
	max	1 850 ±30 mm
Szerokość wozu	2 580 ±50 mm	
Rozstaw osi kół	3 650 ±50 mm	
Prześwit nad spągami	350 ±25 mm	
Kąt najazdu ciągnika	12°	
Kąt najazdu platformy	25°	
Kąt skrętu wozu	±44°	
Kąt przechyłu platformy względem ciągnika	±15o ±2°	
Masa wozu	22 500 ± 500 kg	
Prędkość jazdy	max 13 km/h	



Rys. 5. Samojezdny wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE (Mine Master 2021)

Fig. 5. Underground bolting rig Face Master FM 1,7LE (Mine Master 2021)

Tabela 2. Parametry wozu kotwiącego Roof Master RM 1,8KE (Mine Master 2021)

Table 2. Technical characteristics of bolting rig Roof Master RM 1,8KE (Mine Master 2021)

Parametr	wartość / jednostka	
Długość wozu	13 600 ±200 mm	
Wysokość wozu	min	1 800 ±30 mm
	max	2 070 ±30 mm
Szerokość wozu	2 450 ±50 mm	
Rozstaw osi kół	3 500 mm	
Prześwit nad spągkiem	330 mm	
Kąt najazdu ciągnika	12°	
Kąt najazdu platformy	27°	
Kąt skrętu wozu	±42°	
Kąt przechyłu platformy względem ciągnika	±11°	
Masa wozu	24 590 ± 500 kg	
Prędkość jazdy	max 13 km/h	

procesu wiercenia i kotwienia oraz przejazdów do kolejnych miejsc pracy jak i do komory remontowej.

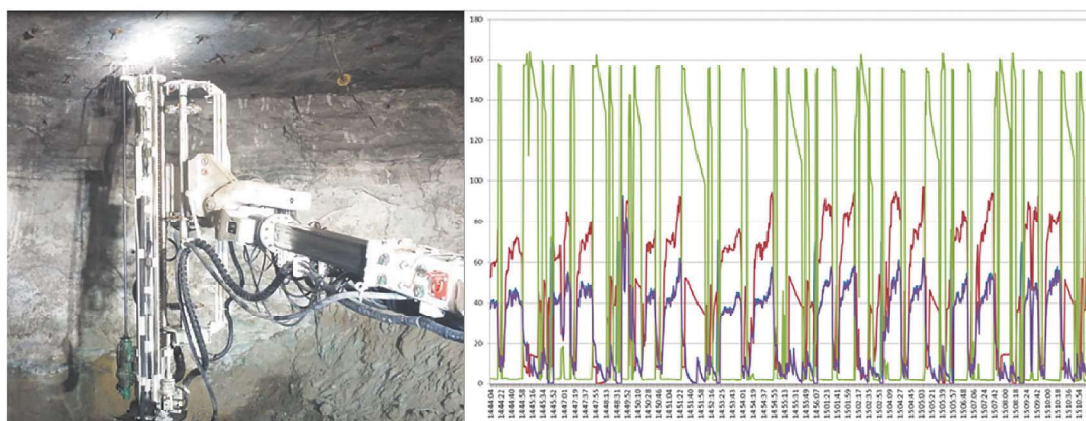
Na rysunku 6 przedstawiono wybrane zdjęcie z realizacji badań oraz przykładowy wykres przebiegów ciśnień w czasie.

Na podstawie analiz wyników badań oraz wymagań użytkownika określono:

- typowe harmonogramy eksploatacji maszyn,
- rzeczywiste parametry sieci zasilającej,
- prędkość poruszania się maszyn z uwzględnieniem nachylenia i jakości podłoża,

- profil trasy pokonywanej przez maszyny,
- opory ruchu dla różnych tras i warunków spągowych,
- zapotrzebowanie mocy dla poszczególnych faz i warunków eksploatacji.

Wykonane analizy pozwoliły na opracowanie szczegółowej koncepcji samojezdnego wozu z równoważnym napędem elektrycznym, którego źródłem zasilania jest bateria akumulatorów. Opracowano układ zasilania maszyn oraz algorytmy sterowania, które następnie poddano badaniom laboratoryjnym.



Rys. 6. Realizacja badań dołowych w kopalni KGHM: a. spalinowy wóz kotwiący Roof Master RM 1,8, b. zarejestrowane przebiegi ciśnień w układzie hydraulicznym wieżyczki

Fig. 6. Underground tests in the KGHM mine: a. Roof Master RM 1.8 diesel bolting rig, b. recorded pressure courses in the turret hydraulic system

4. Badania walidacyjne

Dla opracowanych układów zasilania oraz algorytmów sterowania przeprowadzono laboratoryjne badania walidacyjne (Kozłowski i Bołoz 2021). Badania elektrycznego układu napędowego jazdy i pracy samojezdnego wozu wierzącego oraz samojezdnego wozu kotwiącego przeprowadzono na specjalnym stanowisku, w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 7. Czerwoną ramką zaznaczono elementy, które zastosowano w celu zasymulowania obciążenia silnika napędowego i nie stanowią one układu zasilania maszyny. W układzie wykorzystano platformę badawczą silników z magnesami trwałymi PMSM (*Permanent-Magnet Synchronous Motor*), wyposażoną w dwa, sprzęgnięte ze sobą, silniki synchroniczne, przekształtnik częstotliwości AC/AC z prostownikiem aktywnym, umożliwiającym zwrot energii do sieci zasilającej, sterownik logiczny PLC, aparaturę łączeniową, pomiarową i pulpit operatorski z wyświetlaczem. Stanowisko z silnikami oraz pulpitem operatorskim przedstawiono na rysunku 8.

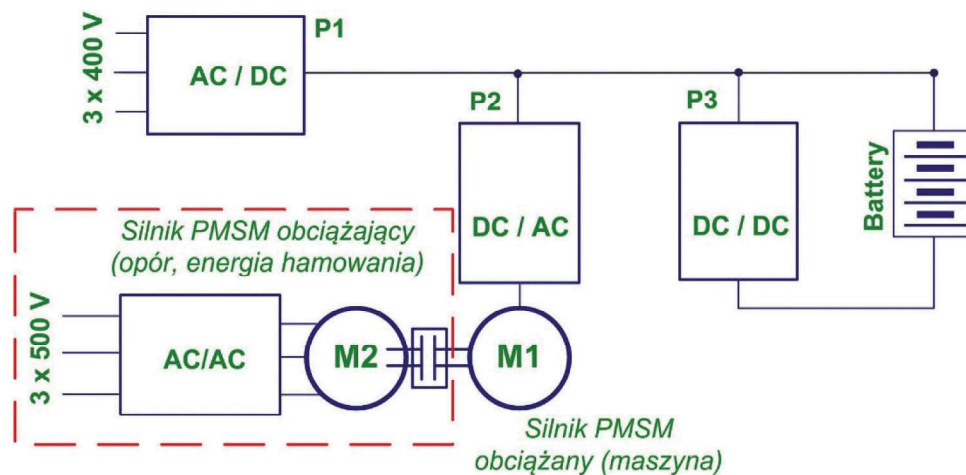
Zasadniczym elementem walidowanego układu była magistrala szynowa prądu stałego DC. Do magistrali przyłączony został przekształtnik AC/DC (prostownik diodowy P1), zasilany napięciem 3×500 V z regulatora indukcyjnego. Przekształtnik P3 DC/DC łączy magistralę z baterią akumulatorów. Przekształtnik P2 DC/AC sterujący głównym silnikiem napędowym, czyli silnikiem M1.

W celu sprawdzenia zachowania układu podczas wahań napięcia sieci, przekształtnik AC/DC (prostownik diodowy), zasilony został napięciem 3×500 V z regulatora indukcyjnego,

umożliwiającego zmiany tego napięcia w zakresie szerszym niż przewidywany zakres tolerancji $0,85 \div 1,2 U_N$. Magistrala DC może być zasilana podczas postoju/pracy i w zależności od połączenia z siecią zasilającą, z przekształtnika AC/DC lub przez przekształtnik DC/DC z głównej baterii akumulatorów.

Ze względu na konieczność sprawdzenia zachowania układu przy różnych wartościach napięć baterii i podczas wahań napięcia sieci, na stanowisku zabudowano sprzęgnięty z silnikiem maszyny M1 silnik M2, który stanowi maszynę obciążającą. Obciążenie silnika głównego wytwarzane przez silnik M2 może być regulowane za pomocą sterującego tym silnikiem przekształtnika AC/AC, przy czym wartość i zwrot momentu, dla dowolnej wartości i zwrotu prędkości obrotowej, może być regulowana w pełnym zakresie, od wartości dodatnich do ujemnych. Czyli silnik M2 może zarówno obciążać, jak i napędzać silnik M1, co pozwala reprezentować (symulować) jazdę po upadzie, a zatem hamowanie silnikiem. Podczas jazdy po terenie poziomym bądź po wzniosie, maszyna M1 pracuje jako silnik napędowy, pobierając energię poprzez przekształtnik DC/AC i magistralę prądu stałego z baterii akumulatorów. Podczas wiercenia bądź kotwienia pojazd jest przyłączony do sieci zasilającej 3×500 V i maszyna M1 pracuje wtedy również jako silnik napędowy, jednak pobierając energię poprzez przekształtnik DC/AC i magistralę prądu stałego, w tym przypadku z tej sieci zasilającej. Energia elektryczna wytwarzana w silniku obciążającym jest poprzez przekształtnik AC/AC zwracana do sieci zasilającej. Jest to najbardziej typowy rodzaj pracy układu napędowego pojazdu.

Próba rozładowania baterii odpowiadała w rzeczywistym układzie jeździe długotrwałej ze stałym obciążeniem.



Rys. 7. Układ pomiarowy do badań walidacyjnych elektrycznego napędu jazdy i pracy

Fig. 7. Measuring system for validation tests of the electric drive in the riding and operation mode



Rys. 8. Stanowisko do badania układu napędowego

Fig. 8. Stand for testing the drive system

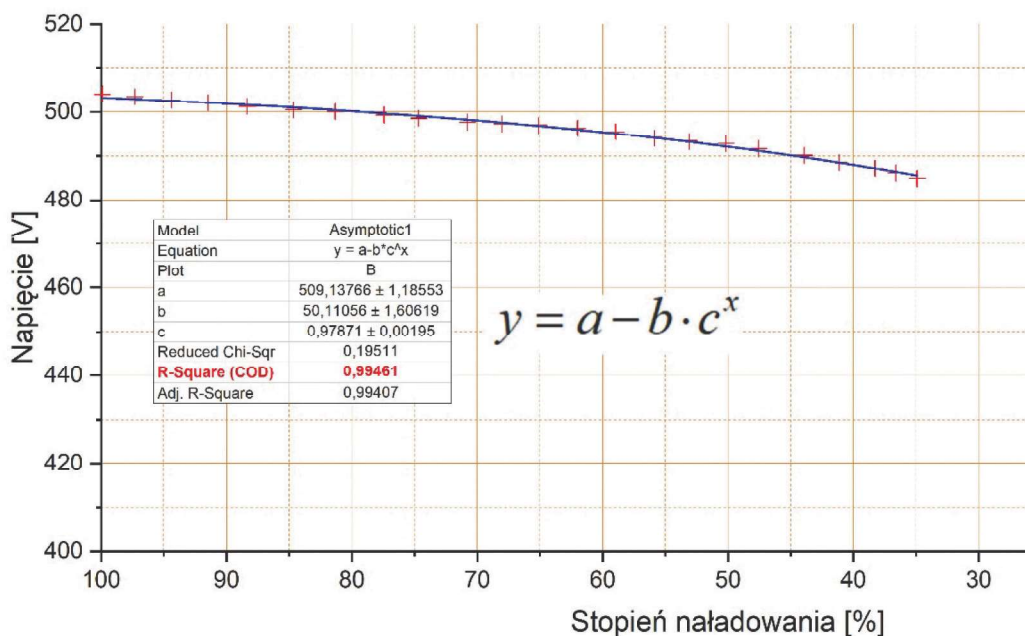
Dodatkowo sprawdzono, jak zmienia się napięcie na zaciskach baterii wraz ze stopniem rozładowania oraz pobranym ładunkiem. Do testów wykorzystano baterie złożoną z sześciu połączonych szeregowo modułów o następujących parametrach:

- napięcie znamionowe: 499 V,
- pojemność znamionowa: 58,8 Ah,
- energia znamionowa: 30 kWh,
- napięcie maksymalne: 562 V,
- napięcie minimalne: 390 V,
- maksymalny dynamiczny prąd rozładowania: 120 A,
- maksymalny dynamiczny prąd ładowania: 60 A,
- ciągła moc rozładowania: 60 kW,
- ciągła moc ładowania: 30 kW.

Rozładowania baterii przez napęd obciążający dokonano w układzie: bateria > przekształtnik P3 > przekształtnik P2 > silnik napędowy maszyny M1 > silnik obciążający M2 > zwrot energii do sieci 3x500 V.

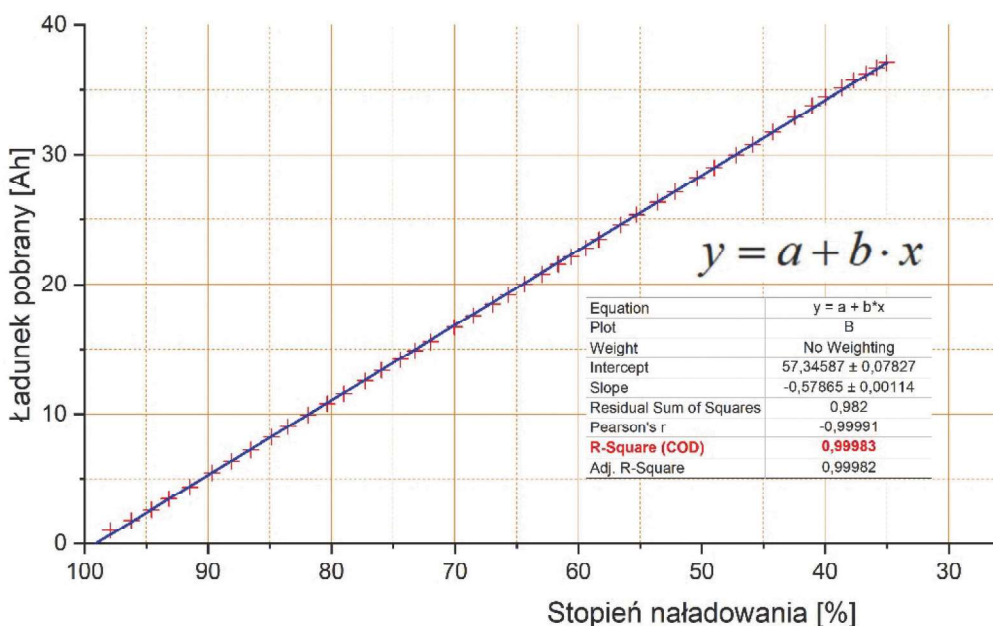
Baterię rozładowywano z mocą wynoszącą około 30 kW (połowa mocy rozładowywania) do wartości 35% dostępnej energii. Dalsze rozładowywanie było blokowane przez układ

nadzoru baterii (BMS). Zmiana napięcia przy 35% naładowania wynosiła 3 % (spadek). Uzyskane podczas badań charakterystyki rozładowania baterii przedstawiono na rysunku 9, rysunku 10 i rysunku 11. Dla przebiegu napięcia baterii w funkcji stopnia naładowania oraz w funkcji czasu rozładowania przeprowadzono dopasowanie funkcji nieliniowej. Natomiast dla przebiegu ładunku pobranego w funkcji stopnia naładowania przeprowadzono dopasowanie funkcji liniowej. Uzyskane wzory funkcji naniesiono na wykresy. Dla każdego przypadku współczynnik determinacji R^2 (COD - *coefficient of determination*) przekroczył znacznie 0,99, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu. Zgodnie z uzyskanymi przebiegami oraz wyznaczonymi wzorami, podczas badań napięcie spadło z 504 V do 486 V. Spadek stopnia naładowania do 35% spowodował spadek napięcia o ponad 3%. Rozładowanie baterii z poziomu 100% do 35% spowodowało pobranie ładunku 37 Ah w czasie około 42 minut. Według uzyskanej charakterystyki całkowite rozładowanie baterii nastąpi po 135 minutach.



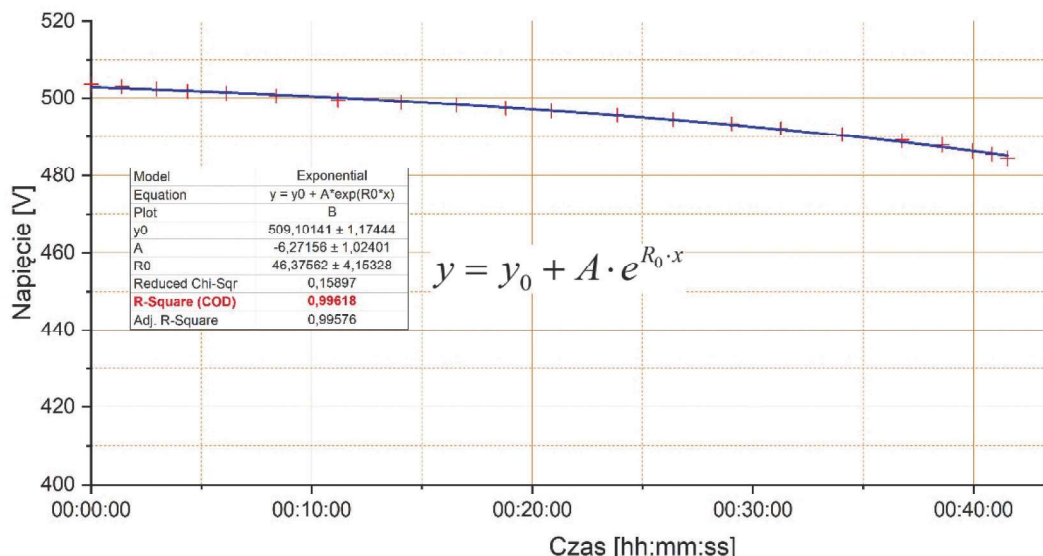
Rys. 9. Rozładowanie baterii - napięcie baterii w funkcji stopnia naładowania

Fig. 9. Battery discharge - battery voltage as a function of the state of charge



Rys. 10. Rozładowywanie baterii - ładunek pobrany w funkcji stopnia naładowania

Fig. 10. Battery discharge - load as a function of the state of charge



Rys. 11. Rozładowywanie baterii - napięcie baterii w funkcji czasu rozładowania
 Fig. 11. Battery discharge - battery voltage versus discharge time

Następnie przeprowadzono próby ładowania baterii akumulatorów. Przekształtnik ładujący P3 umożliwia pełną kontrolę nad prądem i napięciem ładowania. Podstawowym jednak warunkiem uzyskania pełnej wymaganej dynamiki ładowania jest, aby napięcie magistrali szynowej DC było większe od napięcia baterii.

Zgodnie z opracowaną i przedstawioną konfiguracją przeprowadzono próby ładowania w dwóch trybach:

- trybie zadawania napięcia na baterii (Energy storage) z ustawieniem ograniczenia maksymalnego prądu ładowania,
- trybie zadawania prądu ładowania z ustawianiem ograniczenia napięcia maksymalnego na baterii.

Dla trybu zadawania napięcia na baterii jako zadane napięcie ustawiono napięcie w pełni naładowanej baterii: $U_{zad} = U_{bat,max} = 540$ V oraz jako ograniczenie prądu ładowania, prąd maksymalny ładowania $I_{max,lad} = 60$ A. Ładowanie w tym trybie odbywało się prądem zadawanym przez układ nadzoru baterii BMS, do chwili osiągnięcia przez baterię stanu pełnego naładowania (100%). O poziomie naładowania informuje układ BMS użytej do prób baterii.

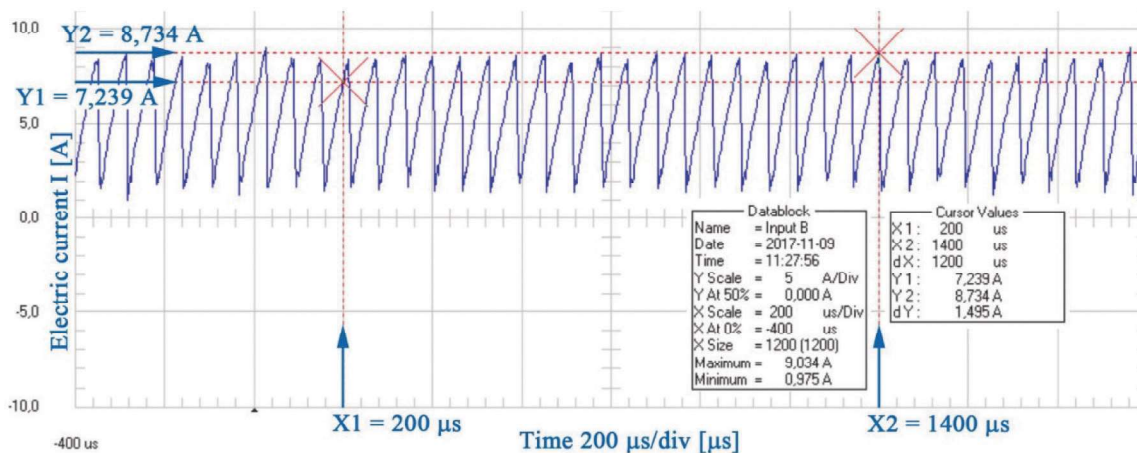
Dla trybu zadawania prądu ładowania ustawiono jako zadany prąd maksymalny prąd ładowania $I_{zad} = I_{max,lad} = 60$

A, a jako ograniczenia napięcia, maksymalne napięcie na baterii $U_{bat,max} = 540$ V. Ładowanie w tym trybie odbywało się również prądem zadawanym przez układ nadzoru baterii BMS aż do poziomu 100%.

Na podstawie badań stwierdzono, że obydwa tryby są w tym wypadku ze sobą tożsame. Wynika to z faktu, że ładowanie odbywa się z parametrami zadanymi przez układ BMS baterii, który stanowi w jednostkę nadrzędną dla przekształtnika ładowania. Stąd zadane w przekształtniku wartości parametrów ładowania traktowane są każdorazowo jako parametry dopuszczalne, czyli graniczne, których BMS nie przekracza.

Na rysunku 12 przedstawiono przebieg prądu ładowania baterii. Aby obniżyć wahania prądu wokół wartości średniej zaleca się użycie dławika o większej indukcyjności. Do prób wykorzystano dławik o indukcyjności 0,3 mH.

Następnie przeprowadzono próby dynamiczne przy zasilaniu z baterii i obciążeniu silnikiem, również zgodnie z opracowanym układem. Próby dynamiczne polegały na zmianach momentu obciążającego silnika napędowego w szerokim zakresie, od wartości nominalnej dodatniej do ujemnej. Czyli silnik M2 może zarówno obciążać, jak i napędzać silnik M1, co symuluje jazdę z odzyskiem przez hamowanie silnikiem. Podczas symulacji jazdy po terenie



Rys. 12. Przebieg prądu ładowania baterii – średni prąd ładowania baterii 5A
 Fig. 12. Battery charging current waveform - average battery charging current 5A

poziomym bądź po wzniosie, silnik *M1* pracuje jako napędowy, pobierający energię poprzez przekształtnik *DC/AC* i magistralę prądu stałego z baterii akumulatorów. W trakcie rozładowywania baterii nie ma możliwości ograniczenia prądu pobieranego z baterii przez przekształtnik *P3*. Istnieje natomiast możliwość ograniczenia prądu przez falownik zasilający silnik. Przeprowadzono próby pracy falownika zasilającego silnik napędowy w następujących trybach:

- regulacji prędkości,
- regulacji momentu,
- regulacji mocy.

Regulacja prędkości – zwiększanie bądź zmniejszanie obciążenia (momentu) podczas pracy napędu w trybie regulacji prędkości powoduje zwiększanie bądź zmniejszanie pobieranego przez układ napędowy prądu i mocy, przy utrzymaniu stałej prędkości obrotowej (do wartości ustawionej w przemienniku maksymalnego prądu/mocy, po przekroczeniu której prędkość zaczyna się zmniejszać).

Regulacja momentu – zwiększanie bądź zmniejszanie obciążenia (momentu) podczas pracy napędu w trybie regulacji momentu powoduje zmniejszanie bądź zwiększanie prędkości obrotowej, do chwili osiągnięcia równowagi momentu napędowego i obciążającego. Zmieniają się również pobierane przez układ napędowy prąd i moc.

Regulacja mocy – podobnie jak powyżej, zwiększanie bądź zmniejszanie obciążenia (momentu) podczas pracy napędu w trybie regulacji mocy powoduje zmniejszanie bądź zwiększanie prędkości obrotowej. Zmieniają się także pobierane przez układ napędowy prąd i moc.

Próby hamowania silnikiem z odzyskiwaniem energii do baterii polegały na zmianie znaku momentu maszyny obciążającej silnik napędowy, w wyniku czego zmienił on swoją funkcję z obciążającego na napędzający, a badany silnik *M1* stał się prądnicą. Moc elektryczna generowana w tym silniku, przez przekształtnik *P2* była przekazywana na szynę magistrali prądu stałego *DC*, a stąd, przez przekształtnik *P3* do baterii akumulatorów *BA*. Płynne przejście momentu maszyny *M2* z obciążającego na napędowy, powodowało płynną zmianę znaku mocy pobieranej z baterii akumulatorowej na moc dostarczaną do tej baterii w pełnym zakresie zmian momentu obciążenia. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że powyższe próby miały na celu sprawdzenie funkcjonalne proponowanego elektrycznego układu napędowego analizowanych maszyn górniczych, a nie sprawdzenie zależności ilościowych, tym bardziej, że badany układ był układem modelowym i nie odzwierciedlał w pełni docelowego układu rzeczywistego.

Próba ograniczenia mocy pobieranej przez układ napędowy miała na celu sprawdzenie możliwości ograniczenia mocy pobieranej przez układ napędowy podczas pracy przy zasilaniu z elektrycznej sieci zasilającej podczas wiercenia lub kotwienia, kiedy moc dostępna z tej sieci jest ograniczona do 65 kW. Próbę przeprowadzono przy zasilaniu sieciowym przez przekształtnik *P1*. Ponieważ przekształtnik *P1* nie ma możliwości ograniczenia pobieranej mocy, ograniczenie to zostało zrealizowane w przekształtniku *P2* zasilającym silnik. Po osiągnięciu przez silnik napędowy mocy dopuszczalnej (wartość ograniczenia) następowało zwiększanie momentu napędowego, przy równoczesnym zmniejszaniu prędkości obrotowej. Jest to korzystna cecha tego typu napędu, ponieważ pozwala zapobiec blokowaniu się narzędzia w górotworze. Jest to jedno ze standardowych ograniczeń w przekształtnikach pracujących jako falowniki i może zostać ustawione w szerokim zakresie. Próbę przeprowadzono dla ograniczenia ustawionego na poziomie 50% mocy znamionowej silnika z wynikiem pozytywnym.

Próba ograniczenia momentu napędowego przez falownik zasilający silnik napędowy miała na celu sprawdzenie

możliwości ograniczenia momentu przez układ napędowy podczas wiercenia, w celu niedopuszczenia do zatrzymania narzędzia w górotworze. Próbę przeprowadzono przy zasilaniu sieciowym przez przekształtnik *P1*, zwiększając moment obciążenia powyżej nastawionego momentu ograniczenia. Także w tym przypadku ograniczenie to zostało zrealizowane w przekształtniku *P2* zasilającym silnik. Jest to również jedno ze standardowych ograniczeń w przekształtnikach pracujących jako falowniki i może zostać ustawione w szerokim zakresie. Próbę przeprowadzono dla ograniczenia ustawionego na poziomie 50% momentu znamionowego. Po przekroczeniu nastawionego momentu ograniczenia, prędkość silnika napędowego zaczęła gwałtownie spadać. Wynik próby ograniczenia momentu napędowego był pozytywny.

Kolejna próba, ograniczenia prądu przez falownik zasilający silnik napędowy miała na celu sprawdzenie możliwości ograniczenia momentu przez układ napędowy podczas pracy (wiercenia), w celu niedopuszczenia do zatrzymania narzędzia w górotworze. Próbę przeprowadzono przy zasilaniu sieciowym przez przekształtnik *P1*. Zwiększanie momentu obciążenia powoduje zwiększanie prądu silnika napędowego. Po osiągnięciu wartości prądu ograniczenia, następuje stabilizacja prądu obciążenia i zmniejszanie prędkości obrotowej, co powinno zapobiec blokowaniu narzędzia. Także w tym przypadku ograniczenie zostało zrealizowane w przekształtniku *P2* zasilającym silnik. Jest to również jedno ze standardowych ograniczeń w przekształtnikach pracujących jako falowniki i może zostać ustawione na dowolnym poziomie. Próbę przeprowadzono dla ograniczenia ustawionego na poziomie 50% prądu znamionowego. Po przekroczeniu nastawionego prądu ograniczenia, prędkość silnika napędowego zaczęła gwałtownie spadać. Wynik próby ograniczenia prądu był pozytywny.

5. 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 ogniwo (FCEV). W przypadku wielu maszyn roboczych oraz pojazdów zasilanie sieciowe nie pozwala na pełną funkcjonalność, stąd konieczne 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.

Opracowanie założeń dla projektowanych maszyn wymagało przeprowadzenia badań dołowych maszyn z napędem spalinowym. Wyniki tych badań pozwoliły na wyznaczenie i opisanie stanów pracy maszyny oraz opracowanie układów zasilania i algorytmów sterowania. Następnie sprawdzono wyznaczone algorytmy podczas badań symulacyjnych oraz w rzeczywistym układzie elektrycznym. Układ został zbudowany w oparciu o dostępne aktualnie elementy, lecz jego konfiguracja odpowiadała układowi projektowanych maszyn. Opracowana koncepcja uwzględniająca sposób sterowania została sprawdzona w układzie modelowym o właściwościach zbliżonych do rzeczywistego układu zasilania maszyn docelowych. Sprawdzone i zweryfikowane zostały

stany pracy maszyny takie jak: jazda, hamowanie w czasie jazdy i praca. Walidacja wykazała poprawność i skuteczność układów zasilania i algorytmów sterowania, które zostały następnie zaimplementowane w projektowanych maszynach. Opracowany i przetestowany samojezdny elektryczny wóz kotwiący Roof Master RM 1,8KE oraz wierzący Face Master FM 1,7LE są najlepszym dowodem na poprawność przeprowadzonych prac. Maszyny te są pierwszymi w Polsce, zaprojektowanymi i wykonanymi dla warunków KGHM S.A., 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.

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 dla KGHM Polska Miedź S.A. za umożliwienie oraz wsparcie podczas realizacji badań dołowych.

Literatura

- ARAMINE. 2021 – Aramine battery loader, <https://www.aramine.com/produit/mini-loader-1140b/>, (dostęp 05.10.2021).
- ARTISAN VEHICLES. 2021 – Artisan Vehicles battery machines, <https://www.artisanvehicles.com/>, (dostęp 05.10.2021).
- BIAŁY W., BOŁOZ Ł., SITKO J. 2021 – Mechanical processing of hard coal as a source of Noise pollution. *Energies*, 14(1332), pp. 1-14.
- BOŁOZ Ł. 2020 – Digital Prototyping on the Example of Selected Self-Propelled Mining Machines. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 3(1), pp. 172-183.
- BOŁOZ Ł. 2021 – Światowe trendy w rozwoju podziemnych maszyn górniczych z napędami bateryjnymi, VI Science Symposium (online): Rozwój i eksploatacja maszyn górnictwa podziemnego surowców mineralnych - efekty współpracy przemysłu i nauki.
- BOŁOZ Ł., CASTAÑEDA L.F. 2018 – Computer-Aided Support for the Rapid Creation of Parametric Models of Milling Units for Longwall Shearers. *Manag. Syst. Prod. Eng.*, 26, pp. 193-199.
- BOŁOZ Ł., BIAŁY W. 2020 – Automation and Robotization of Underground Mining in Poland. *Appl. Sci.*, 10(7221), pp. 1-14.
- BURD JTJ., MOORE EA., EZZAT H., KIRCHAIN R., ROTH R. 2020 – Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, 12.
- CAT. 2021 – Cat R1700 XE Features Electric Drive, <https://www.oemoffhighway.com/trends/equipment-launches/mining/press-release/21066468/caterpillar-inc-cat-r1700-xe-features-electric-drive>, (dostęp 05.10.2021).
- EPIROC. 2021 – Epiroc – The zero emission fleet, <https://www.epiroc.com/en-gr/innovation-and-technology/zero-emission>, (dostęp 05.10.2021).
- FUGIEL A., BURCHART-KOROL D., CZAPLIKA-KOLARZ K., SMOLIŃSKI A. 2017 – Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries, *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 159-168.
- GUO YJ., YANG ZL., LIU KL., ZHANG YH., FENG W. 2021 – A compact and optimized neural network approach for battery state-of-charge estimation of energy storage system, *Energies*, 219, pp 1-20.
- KOMATSU. 2021a – Komatsu – Joy Battery Haulers, <https://mining.komatsu/product-details/battery-haulers>, (dostęp 05.10.2021).
- KOMATSU. 2021b – Komatsu – Innovation in hard rock mining from Komatsu, <https://mining.komatsu/blog/details/innovation-in-hard-rock-mining-from-komatsu>, (dostęp 05.10.2021).
- KOZŁOWSKI A., BOŁOZ Ł. 2021 – Design and research on power systems and algorithms for controlling electric underground mining machines powered by batteries, *Energy*, 14(4060).
- KOZŁOWSKI A., WOJTAS P. 2017 – Systemowe podejście do cyfryzacji w procesach technologicznych w górnictwie. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 99, pp. 47-56.
- MACLEAN ENGINEERING. 2021 – MacLean Engineering – EV Series, <https://macleanengineering.com/products/mining/electric-vehicle-series>, (dostęp 05.10.2021).
- MIAO Y., HYNAN P., JOUANNE A., YOKOCHI A. 2019 – Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12, pp. 1-20.
- MINE MASTER. 2021 – Battery Electric Rigs, Mine Master Spółka z o.o., <https://www.minemaster.eu/battery-electric-rigs>, (dostęp 05.20.2021).
- NORMET. 2021 – Normet – Smart Drive, <https://www.normet.com/smart-drive/>, (dostęp 05.10.2021).
- PHILLIPS MACHINE. 2021 – Phillips Machine – battery powered shuttle cars, <http://phillipsglobal.us/oem-equipment-2/>, (dostęp 05.10.2021).
- POLNIK B., KACZMARCZYK K., NIEDWOROK A., BALTES R., CLAUSEN E. 2020 – Energy Recuperation as One of the Factors Improving the Energy Efficiency of Mining Battery Locomotives. *Management Systems in Production Engineering*, 28(4), pp. 253-258.
- RAFI M. A. H., RENNIE R., LARSEN J., BAUMAN J. 2020 – 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, pp. 1081-1087.
- SANDVIK. 2021 – Sandvik – battery electric machines, <https://www.rock-technology.sandvik/en/search?q=battery&filter=searchsection%3Apr> oducts, (dostęp 05.10.2021).
- WENTKER, M.; GREENWOOD, M.; LEKER, J. A 2019 – Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials. *Energies*, 12(504), pp. 1-18.
- WOJTAS P., KOZŁOWSKI A., WOJTAS M. 2017 – Digitization of Polish mining industry by reducing costs and improving safety and quality of finished product, *Mininig - Informatics Automation and Electrical Engineering*, 3(531).

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2021
Artykuł akceptowano do druku – 29.11.2021