






Typ artykułu: eksperymentalny

<https://doi.org/10.7494/miag.2024.2.558.21>

# Bateryjna ładowarka LHD z niezależnym napędem kół

Wojciech Korski<sup>1</sup> , Wojciech Horak<sup>2</sup> , Łukasz Bołoz<sup>2</sup> , Roman Niestroj<sup>3</sup> ,  
Artur Kozłowski<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice, Polska

<sup>2</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków, Polska

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Gliwice, Polska

✉ wojciech.korski@emag.lukasiewicz.gov.pl (W.K.), horak@agh.edu.pl (W.H.),  
boloz@agh.edu.pl (Ł.B., autor do korespondencji), roman.niestroj@polsl.pl (R.N.),  
artur.kozlowski@emag.lukasiewicz.gov.pl (A.K.)

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono budowę oraz rozwiązania konstrukcyjne układów zasilania i napędowego ładowarki LHD z innowacyjnym układem przeniesienia napędu typu *in-wheel drive*. Przedmiotowa ładowarka jest pojazdem typu BEV z wymiennym magazynem energii. Przeznaczona jest do pracy w warunkach podziemnych kopalni niezagrożonych wybuchem, zwłaszcza kopalni rud metali. Opracowana konstrukcja zawiera cztery niezależne, elektryczne układy napędowe usytuowane w zabudowie kół jezdnych. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, umożliwiających oszacowanie wymaganej mocy napędowej i zapotrzebowania na energię elektryczną w różnych reżimach i warunkach pracy ładowarki. Wyniki obliczeń wykorzystano do określenia parametrów podzespołów układów napędowych oraz pojemności baterii akumulatorów.

**Słowa kluczowe:** samojezdne maszyny górnicze, ładowarki LHD, napęd elektryczny, zasilanie bateryjne, BEV

## BEV in-wheel drive LHD loader

**Abstract.** The paper presents the construction and the applied design solutions of a prototype, light LHD loader with an innovative in-wheel drive propulsion system. The subject machine is a BEV vehicle with a exchangeable energy storage. It is designed to work in underground mines with no explosion hazard, especially in metal ore mines. The developed structure includes four independent electric drive systems, integrated in the drive nodes, located in the construction of the road wheels. The paper presents the results of simulations used to estimate the required propulsion power and the demand for electric energy in various work regimes and operating conditions. The results of the calculations were used to determine the parameters of the electric drive system components as well as the battery energy/capacity. Additionally, the required parameters of the liquid cooling system for the in-node motors and motor inverters were estimated.

**Keywords:** self-propelled mining machines, LHD loaders, electric propulsion, battery power, supply, BEV

© 2024 Autor(-rzy). Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowa (CC BY 4.0)

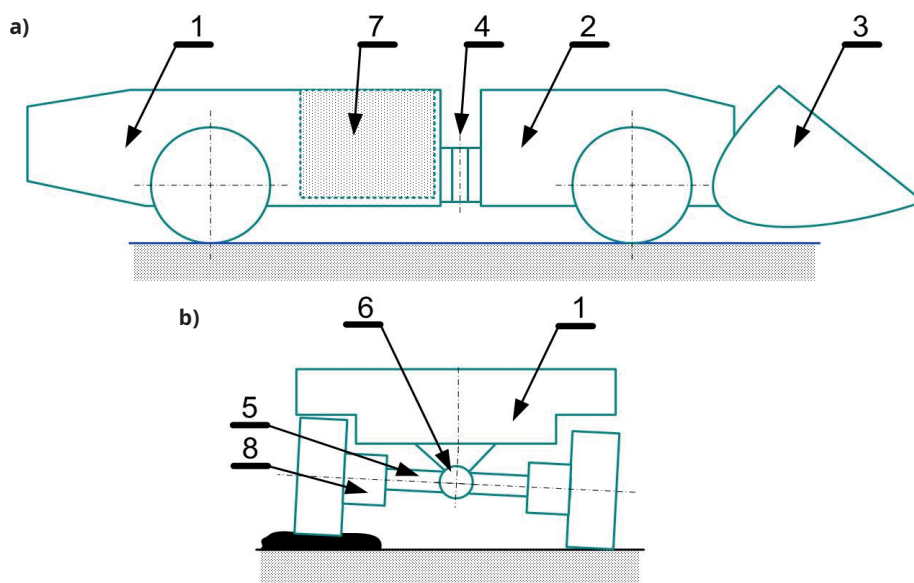
<https://www.miag.agh.edu.pl/>

ISSN 2449-6421

## 1. Wprowadzenie

Ładowarki LHD (*load, haul, dump*), będące kołowo-oponowymi ładowarkami łyżkowymi wysypującymi czołowo, wykorzystywane są do przenoszenia rozdrobnionego urobku w kopalniach. Pojazdy tego typu poruszają się wzdłuż tunelu kopalnianego, który zazwyczaj ma długość kilkuset metrów, transportując urobek z przodka do punktu przeładunkowego. W stosunku do typowych ładowarek czołowych wyróżnia je niewielka wysokość oraz duża wydajność, ponadto charakteryzują się dużą zwrotnością. Mała wysokość ładowarki zapewnia możliwość dotarcia do miejsc w kopalni z bardzo niskim stropem. Ładowarki LHD są jednymi z najczęściej wykorzystywanych maszyn górniczych w podziemnych kopalniach prowadzących eksploatację systemem komorowo-filarowym, w szczególności gdy dostęp jest trudny lub niebezpieczny.

Jednym z najważniejszych elementów ładowarek LHD (rys. 1a) jest ciągnik (1), połączony z platformą (2) za pomocą przegubu (4) o osi pionowej. Przegubowe połączenie ciągnika (1) i platformy (2) wraz z siłownikami hydraulicznymi odpowiada za skręt maszyny. Do platformy (2) przymocowana jest łyżka robocza (3). Między ciągnikiem (1) a kołyską (5) znajduje się przegub (6) o osi poziomej (rys. 1b). Przegubowo połączona kołyska (5) odpowiada za możliwość przejazdu przez nierówności. Zespoły napędowe (8) zamontowano w bezpośrednim pobliżu kół jezdnych, natomiast baterię (7) zlokalizowano w środkowej części ładowarki.



**Rys. 1.** Schemat budowy przegubowej ładowarki LHD:  
a) widok ogólny maszyny; b) widok na kołyskę ciągnika

Ze względu na specyfikę miejsca użytkowania ładowarek LHD korzystne jest dążenie do ograniczenia emisyjności tego typu pojazdów. W związku z tym jeden z etapów rozwoju konstrukcji ładowarek LHD polega na zastąpieniu konwencjonalnych, spaliniowych układów napędowych przez układy z silnikami elektrycznymi. Dodatkową korzyścią wynikającą z zastosowania napędów elektrycznych jest uproszczenie konstrukcji maszyny i idące za tym zwiększenie trwałości i niezawodności ładowarki, także ze względu na mniej skomplikowaną diagnostykę układów z napędami elektrycznymi.

Obiekt badawczy to lekka bateryjna ładowarka LHD o oznaczeniu EV-LKP1, będąca przedmiotem projektu realizowanego w kooperacji Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG oraz firmy Bumech S.A.

Ładowarka EV-LKP1 jest pojazdem typu BEV (*battery electric vehicle*), przy czym wymienny magazyn energii (*battery swap*) usytuowany jest w środkowej części maszyny.

ny roboczej (poz. 7, rys. 1b). Zastosowanie wymiennego magazynu energii jest ważnym aspektem eksploatacji omawianej ładowarki. Możliwość szybkiej wymiany baterii w przypadku jej rozładowania wiąże się z krótką przerwą techniczną, po czym maszyna jest gotowa do dalszej pracy. Konstrukcja układu napędowego ładowarki umożliwia odzysk energii w trakcie hamowania oraz zjazdu ze wzniesienia, co ma przekładać się na wydłużenie czasu pracy pomiędzy kolejnymi wymianami baterii.

Do budowy magazynu energii wykorzystano baterię akumulatorów litowo-jonowych o stosunkowo dużej pojemności, zapewniającej zadowalającą długotrwałość pracy maszyny. Wydajność prądowa magazynu energii została tak dobrana, żeby układ napędowy maszyny mógł zapewnić jej konkurencyjne osiągi. W procesie projektowania duży nacisk położono na bezpieczeństwo cel litowo-jonowych oraz bezpieczeństwo funkcjonalne magazynu energii. Cel ten osiągnięto między innymi dzięki zastosowaniu hierarchicznego układu monitorowania i zarządzania pracą zespołu wraz z zestawem czujników oraz aktywnym układem zarządzania temperaturą.

Na tle istniejących rozwiązań o zbliżonej ładowności, projektowana ładowarka wyróżnia się zastosowaniem indywidualnego napędu elektrycznego w każdym kole (*in-wheel drive*) (poz. 8, rys. 1b). Każdy z czterech napędów (silników z falownikami i przekładniami) tworzy oddzielny zespół napędowy zapewniający uzyskanie zakładanych warunków jazdy, jak i hamowania ładowarki. Wyposażony jest w indywidualny układ sterowania i kontroli warunków pracy, jak również układ chłodzenia.

## 2. Przegląd literatury

W ostatnich latach zaobserwować można przyspieszony rozwój konstrukcji maszyn górniczych, w tym ładowarek LHD, zwłaszcza w kierunku zasilania bateryjnego, systemów wspomagania, zdalnego sterowania oraz autonomii pracy (Bołoz, 2021). Przy czym projektowanie maszyn dla górnictwa podziemnego wymaga stosowania nowoczesnych metod, które pozwalają na spełnienie wymagań użytkowników przy uwzględnieniu niezwykle trudnych warunków pracy (Eger et al., 2008a; Eger et al., 2008b).

W przypadku pracy maszyn w zamkniętych przestrzeniach, z ograniczonym dopływem powietrza, silniki elektryczne mogą być skuteczną alternatywą dla silników spalinowych. W takich warunkach brak zużycia tlenu oraz emisji spalin przez jednostkę napędową może stanowić szczególnie pożądaną właściwość (Fugiel et al., 2017; Hartman et al., 1987). Dodatkową korzyścią wynikającą z zastosowania napędów elektrycznych jest ich wysoka sprawność (zbliżona do 90%), co przekłada się na ograniczenie emisji ciepła do otoczenia przez maszynę.

Wyzwania przy projektowaniu współczesnych maszyn przeznaczonych do pracy pod ziemią obejmują również aspekty związane z bezpieczeństwem i higieną pracy, w tym coraz częściej poruszanego problemu nadmiernego hałasu (Biały et al., 2021). W tym również widoczna jest istotna przewaga napędów elektrycznych. Ponadto elektryczna jednostka napędowa jest mniej skomplikowana (Bołoz, 2021; Priyadarshini Nayak, 2023) od układów spalinowych, co wpływa na zwiększanie niezawodności i trwałości maszyny.

W kopalni dochód jest bezpośrednio uzależniony od tempa wydobycia. O tempie wydobycia decydują przede wszystkim takie parametry, jak: załadunek, odstawa i zwałowanie, a także wiercenie, strzelanie, obudowywanie itp. (Priyadarshini Nayak, 2023). Im większa liczba powtórzeń tego cyklu, tym wyższa jest wydajność transportu. Z tego względu, a także z uwagi na bezpieczeństwo, pożądane jest zautomatyzowanie pojazdów LHD (Dragt et al., 2005; Ye et al., 2022). Trend ten jest zbieżny z kierunkiem rozwoju ładowarek LHD polegającym na zastosowaniu napędów elektrycznych, które ze względu na swoją specyfikę umożliwiają opracowywanie złożonych systemów kontroli, sterowania i monitorowania parametrów pracy.

Zasilanie bateryjne maszyn stanowi wyzwanie konstrukcyjne i ekonomiczne (Burd et al., 2021). W akumulatorowych pojazdach elektrycznych zasięg (bądź czas pracy) zależy od pojemności elektrycznej magazynu. Większa pojemność akumulatora wiąże się z większą masą pojazdu, co ma skutek odwrotny do zamierzonego. Istotne jest odpowiednie

wyważenie tych aspektów w maszynach typu LHD, uwzględniające przede wszystkim planowane użytkowanie maszyny i organizację pracy użytkownika. Aspekt ekonomiczny wyrażany jest tu zarówno w efektywności transportu (transport pustej pojemności magazynu energii), jak i koszcie samych akumulatorów. Wymienne magazyny energii wymagają odpowiedniej konstrukcji mechanicznej, współgrającej gabarytowo z resztą pojazdu oraz uwzględnienia sposobu mocowania i wymiany (potencjalnie także opracowania dedykowanych systemów na samej maszynie).

Pojazdy akumulatorowo-elektryczne (BEV) z napędem na cztery koła, napędzane wieloma silnikami umieszczonymi na różnych osiach, zyskują na popularności szczególnie w grupie pojazdów użytkowych, oferując znakomitą dynamikę i bezpieczeństwo. Stwarzają one nowe możliwości odnośnie do kontroli trakcji oraz zastosowania układów przeciwblokujących (typu ABS) (Ivanov et al., 2015; Nasri et al., 2016). Kluczowe w takim rozwiązaniu jest odpowiednie rozdzielanie przepływu energii pomiędzy źródłem zasilania a poszczególnymi zespołami napędowymi – dotyczy to zarówno kwestii realizacji napędu, jak i hamowania (Cui et al., 2023; Xu et al., 2016).

Wśród dostępnych na rynku rozwiązań konstrukcyjnych ładowarek LHD wyposażonych w zasilanie bateryjne, o ładowności zbliżonej do przypadku omawianego w niniejszym opracowaniu, można wskazać na wóz dostawczy Artisan A4 o ładowności 4 ton, wyposażony w baterie o pojemnościach 88–133 kWh i sumarycznej mocy napędowej 250 kW. Innym rozwiązaniem jest ładowarka LH518B firmy Sandvik, o ładowności 18 ton, wyposażona w trzy silniki elektryczne ( $2 \times 180$  kW na przedniej osi oraz jeden silnik 180 kW na tylnej osi), zasilane baterią o pojemności 353 kWh. Zbliżona, ale o nieco mniejszej pojemności roboczej, jest ładowarka Scooptram ST14 (Epiroc). Charakteryzuje się ładownością 14 ton, wyposażona w jeden silnik do napędu jazdy o mocy 200 kW oraz 160 kW do napędu układów hydrauliki. Ładowarka ta zasilana jest baterią o pojemności 300 kWh. Należy zaznaczyć, że żadne z tych rozwiązań nie wpisuje się w pełni w koncepcję konstrukcji napędu typu *in-wheel drive* (Bołoz, 2021).

### 3. Metody badawcze

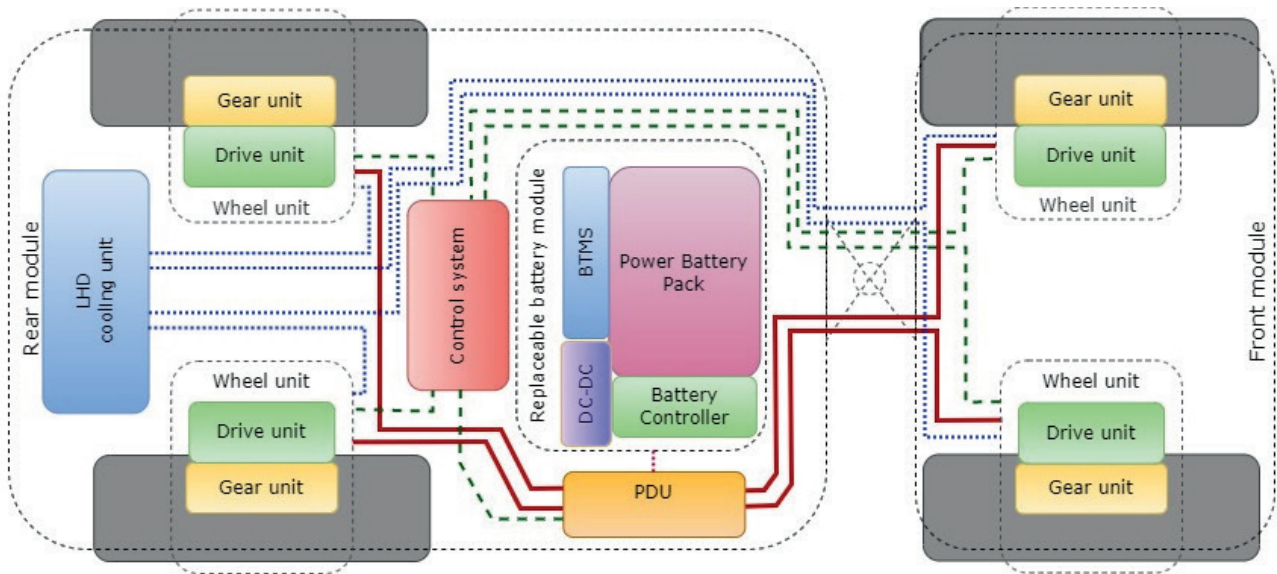
Celem prac było opracowanie modelu obliczeniowego do doboru wymaganych parametrów układu napędowego nowej ładowarki LHD typu BEV. Sprecyzowano szereg założeń, a następnie model fizyczny zapisano w postaci modelu matematycznego. Obiektem badań jest unikatowa ładowarka LHD, która jest obecnie w fazie projektowania, dlatego nie ma możliwości wykorzystania badań empirycznych. Obliczenia pozwoliły na dobranie kluczowych podzespołów węzłów napędowych, określono także graniczne warunki użytkowania projektowanej ładowarki. W celu ułatwienia interpretacji wyników oraz ze względu na typowo praktyczny charakter modelu we wszystkich obliczeniach posłużono się masą wyrażoną w kilogramach (Korski et al., 2023).

### 4. Budowa i parametry ładowarki LHD

Opracowanie ładowarki LHD wymagało rozwiązania szeregu zagadnień badawczych dotyczących jej konstrukcji, układu napędowego oraz układu zasilania z magazynem energii.

#### 4.1. Koncepcja układu napędowego ładowarki

Baterijna ładowarka LHD należy do średniej wielkości urządzeń tego typu, charakteryzuje się masą własną około 14 000 kg, natomiast pojemność łyżki umożliwia załadunek o wadze 4000–5000 kg. Schemat ideowy układu zasilania oraz napędowego ładowarki przedstawiono na rysunku 2.

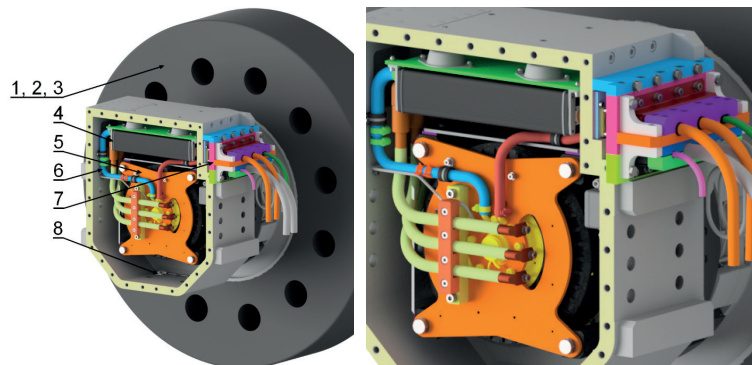


Rys. 2. Schemat układu zasilania i napędowego ładowarki LHD (Korski et al., 2023)

Zastosowanie czterech niezależnych silników – po jednym zabudowanym wraz z każdym z kół napędowych – wpłynęło na znaczne uproszczenie konstrukcji ładowarki pod względem mechanicznym. Przeniesienie napędu odbywa się w stosunkowo krótkim łańcuchu kinematycznym – takie rozwiązanie może być korzystne ze względu na podniesienie niezawodności maszyny. Każdy z zespołów napędowych stanowi oddzielny moduł, w którego skład wchodzi: silnik elektryczny BLDC wraz z falownikiem oraz przekładnia redukująca, wyposażona w hamulec mechaniczny. Niezależność każdego z zespołów napędowych stwarza możliwość eksploatacji ładowarki również w przypadku wystąpienia awarii jednego lub kilku układów.

#### 4.2. Budowa i parametry węzłów napędowych

Koncepcja budowy układu trakcyjnego projektowanej ładowarki LHD zakłada zastosowanie czterech niezależnych zespołów napędowych zintegrowanych z kołami jezdny (rys. 3). Przyjęto założenie opracowania projektu zgodnie z wytycznymi COTS (*commercial off-the-shelf*), zatem wszystkie podzespoły projektowanego układu dobrano jako rozwiązania handlowe.

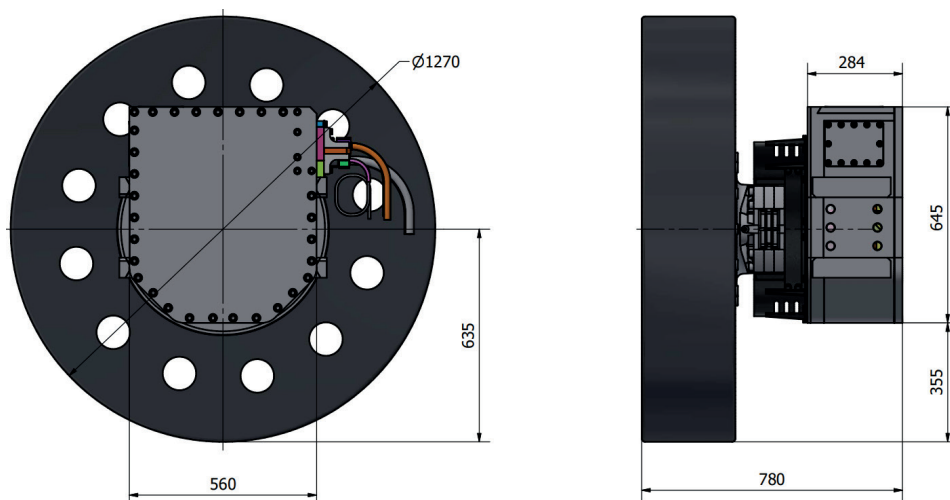


Rys. 3. Model rozmieszczenia podzespołów zespołu napędowego z powiększeniem wnętrza napędu: 1 – silnik, 2, 4, 5 – przekładnia z hamulcem postojowym i manewrowym, 3 – falownik, 6 – układ chłodzenia, 7 – czujniki warunków w komorze silnika, 8 – panel przyłączeniowy

Każdy z zespołów napędowych stanowi autonomiczną strukturę wyposażoną w bezszczotkowy silnik z magnesami trwałymi, charakteryzujący się nominalnym momentem obrotowym  $M_{nom} = 450 \text{ Nm}$ , co w połączeniu z przekładnią o przełożeniu  $i = 25$ , pozwala uzyskać nominalny moment napędowy na każdym kole wynoszący ponad  $M_{k,nom} = 11 \text{ kNm}$ . Natomiast moment maksymalny to  $22 \text{ kNm}$ , a wynika on z dopuszczalnego obciążenia przekładni. Opracowany zespół napędowy pozwala na uzyskanie maksymalnej prędkości jazdy ładowarki  $V_{LHD,max} = 32,7 \text{ km/h}$ .

W każdym z węzłów napędowych zintegrowano indywidualny falownik zasilający silnik. Zarówno silnik, jak i falownik, ze względu na zabudowę w zamkniętej przestrzeni, wymagają chłodzenia cieczą. Czynniki chłodniczy w pierwszej kolejności przechodzi przez falownik, a następnie przez silnik, po czym ciecz opuszcza węzeł napędowy poprzez panel przyłączeniowy i jest przekazywana do zewnętrznego wymiennika ciepła.

Ze względu na prototypowy charakter projektowanego układu w każdym z zespołów przewidziano zastosowanie czujników warunków pracy, tj. temperatury, wilgotności i obecności cieczy w komorze zespołu napędowego. Na rysunku 4 przedstawiono wymiary zespołu napędowego.



Rys. 4. Wymiary gabarytowe zespołu napędowego

Istotnym ograniczeniem konstrukcyjnym jest konieczność zachowania odpowiedniego prześwitu pod osiami ładowarki, a także ograniczona przestrzeń w kierunku osiowym oraz wzdłużnym maszyny. Z tego względu korzystne jest zastosowanie silnika typu *axial-flux*, co pozwala na kompaktową zabudowę napędów. Umieszczenie falownika w górnej części zespołu napędowego umożliwiło uzyskanie pod osiami ładowarki prześwitu o wysokości 355 mm.

### 4.3. Parametry magazynu energii

Wymaganą pojemność magazynu energii do zasilania układu napędowego oszacowano na podstawie przyjętego cyklogramu pracy. Rozważono jazdę po terenie płaskim oraz nachylnym pod kątem  $\alpha = 2^\circ$ , przy dwóch zestawach prędkości,  $v_{low} = 10 \text{ km/h}$  oraz  $3 \text{ km/h}$ ,  $v_{high} = 15 \text{ km/h}$  oraz  $5 \text{ km/h}$ . Przy czym wyższa prędkość odpowiada jeździe bez urobku, a niższa – jeździe z pełnym obciążeniem. Dodatkowo każdy ze scenariuszy testowano przy czterech wartościach współczynnika oporów toczenia  $f = 0,1-0,5$ . Wartość  $f = 0,1$  odpowiada toczeniu się kół po prostej, a  $0,5$  bardzo wysokim oporom jazdy (grząski teren). W analizach uwzględniono dane wybranych cel różnego typu, dostępnych komercyjnie. Założono, że dla przyjętej masy całkowitej magazynu energii (2000 kg) masa samych cel nie powinna przekroczyć 1500 kg. Ponadto ustalono, że objętość cel nie powinna przekroczyć  $1 \text{ m}^3$ , co wynika z przyjętych rozmiarów maksymalnych magazynu energii oraz koniecz-

ności przeznaczenia odpowiedniej przestrzeni na osprzęt elektryczny i system zarządzania temperaturą baterii akumulatorów. Kryteria masy i objętości jednocześnie spełniają tylko cele NMC, które są powszechnie stosowane w elektromobilności. Gwarantują one także akceptowalny poziom bezpieczeństwa oraz akceptowalną żywotność. Wymagania operacyjne dla cel NMC sprowadzają się do zapewnienia im systemu BMS (*battery management system*) oraz systemu zarządzania temperaturą BTMS (*battery thermal management system*).

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę możliwości opracowania układu napędowego lekkiej ładowarki LHD, BEV, wyposażonej w system *in-wheel drive*. Zastosowanie czterech niezależnych węzłów napędowych stanowi innowacyjne rozwiązanie wśród dostępnych ładowarek o podobnych właściwościach użytkowych.

Ze względu na brak danych benchmarkowych oraz ogólnodostępnych, reprezentatywnych modeli pracy układów napędowych pojazdów typu LHD, pozwalających odpowiednio obliczyć zapotrzebowanie na moc do zasilania tego typu pojazdu, przeprowadzono obliczenia szacunkowe. Kierowano się przy tym zasadą pozostawania po bezpiecznej stronie modelu, tzn. przyjęte warunki pracy oraz uproszczenia stosowane w modelach obliczeniowych dobrane były w ten sposób, żeby w każdym przypadku zapewnić możliwość jazdy ładowarki.

Realizacja projektu ładowarki wyposażonej w cztery niezależne układy napędowe, zabudowane w bezpośredniej bliskości kół jezdnych, stanowi istotne wyzwanie konstrukcyjne. Jest to związane m.in. ze znacznym ograniczeniem dostępnej przestrzeni zabudowy układów, potrzebą zapewnienia wymaganych warunków cieplnych układów napędowych oraz dystrybucją mocy elektrycznej na pojeździe (trudności związane z ułożeniem przewodów zasilających oraz chłodzenia, wynikające z ich dużej sztywności i konieczności doprowadzenia w bezpośrednie otoczenie każdego z kół).

W związku z prototypowym charakterem projektowanego układu zostanie wykonane stanowisko do badania układów napędowych. Zaplanowano także przeprowadzenie prób eksploatacyjnych prototypu ładowarki.

**Finansowanie:** Projekt „Innowacyjny pojazd do załadunku materiałów sypkich EV-LKP1” współfinansowany z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego zgodnie z umową POIR.01.01.01-00-1427/20-00.

## Literatura

- Biały, W., Bołoz, Ł., & Sitko, J. (2021). Mechanical Processing of Hard Coal as a Source of Noise Pollution. Case Study in Poland. *Energies*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/en14051332>
- Bołoz, Ł. (2021). Global Trends in the Development of Battery-Powered Underground Mining Machines. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 4(1), 178–189. <https://doi.org/10.2478/mape-2021-0016>
- Burd, J. T. J., Moore, E. A., Ezzat, H., Kirchain, R., & Roth, R. (2021). Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, 283, 116269. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269>
- Cui, H., Ruan, J., Wu, C., Zhang, K., & Li, T. (2023). Advanced deep deterministic policy gradient based energy management strategy design for dual-motor four-wheel-drive electric vehicle. *Mechanism and Machine Theory*, 179, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105119>
- Dragt, B. J., Camisani-Calzolari, F. R., & Craig, I. K. (2005). Modelling the dynamics of a load-haul-dump vehicle. *IFAC Proceedings Volumes, 16th IFAC World Congress*, 38(1), 49–54. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01390>

- Eger, T., Stevenson, J., Boileau, P.-É., & Salmoni, A. (2008a). Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 1—Analysis of whole-body vibration exposure using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 standards. *International Journal of Industrial Ergonomics, Special Issue: Workplace Vibration Exposure Characterization, Assessment and Ergonomic Interventions*, 38(9), 726–738. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.08.012>
- Eger, T., Stevenson, J., Callaghan, J. P., Grenier, S., & VibRG. (2008b). Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 2—Evaluation of operator driving postures and associated postural loading. *International Journal of Industrial Ergonomics, Special Issue: Workplace Vibration Exposure Characterization, Assessment and Ergonomic Interventions*, 38(9), 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.09.003>
- Fugiel, A., Burchart-Korol, D., Czaplicka-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, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.136>
- Hartman, H. L., Novak, T., & Gregg, A. J. (1987). Health hazards of diesel and electric vehicles in an underground coal mine. *Mining Science and Technology*, 5(2), 131–151. [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(87\)90365-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(87)90365-3)
- Ivanov, V., Savitski, D., & Shyrokau, B. (2015). A Survey of Traction Control and Anti-lock Braking Systems of Full Electric Vehicles With Individually Controlled Electric Motors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(9), 3878–3896. [IEEE Transactions on Vehicular Technology. https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2361860](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2361860)
- Korski, W., Horak, W., Bołoz, Ł., Niestrój, R., & Kozłowski, A. (2023). Lightweight LHD BEV Loader with an Individual Drive for Each Wheel. *Management Systems in Production Engineering*, 31(3), 281–290. <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0031>
- Nasri, A., Gasbaoui, B., & Fayssal, B. M. (2016). Novel Four Wheel Drive Propulsion System Control Using Backstepping Strategy. *Procedia Technology, 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2015, 8-9 October 2015, Tirgu Mures, Romania*, 22, 509–517. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.110>
- Priyadarshini Nayak, N. (2023). LHD-LPDT cycle time optimization of underground metal mine. *Materials Today: Proceedings, 2nd International Conference on Sustainable Materials, Manufacturing and Renewable Technologies 2022*, 72, 2817–2821. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.091>
- Xu, W., Zhao, H., Ren, B., & Chen, H. (2016). A regenerative braking control strategy for electric vehicle with four in-wheel motors. *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, 8671–8676. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554741>
- Ye, W., Shen, W., Qian, Z., & Zheng, J. (2022). Robust longitudinal motion control of underground mining electric vehicles based on fuzzy parameter tuning sliding mode controller. *Computers & Electrical Engineering*, 98, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107683>