



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.15>

Efektywność rekuperacji elektrycznej lokomotywy akumulatorowej „ELECTRA” ze zmiennym rozstawem kół

Rafał Setlak – Politechnika Śląska

Paweł Lasek – Politechnika Śląska

Wojciech Zieleźny – Urządzenia i Konstrukcje S. A.

Szymon Paczena – Urządzenia i Konstrukcje S. A.

Streszczenie: W rozdziale opisano model matematyczny lokomotywy elektrycznej posiadającej dwie osie napędowe z silnikami indukcyjnymi CELMA Inducta dSg 180L4-EP. Model symulacyjny pozwolił na wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych lokomotywy poruszającej się w różnych warunkach (tor poziomy, wzniesienie, upad oraz przy zastosowaniu różnych składów: osobowy i towarowy o różnych masach). Obliczenia wykonano w celu oceny efektywności procesu zwrotu energii hamowania do zasobnika akumulatorowego lokomotywy, jako czynnik możliwy do wykorzystania z punktu widzenia ekonomiki użytkowania lokomotywy elektrycznej.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, pojazd elektryczny, transport górniczy, rekuperacja energii, modelowanie matematyczne

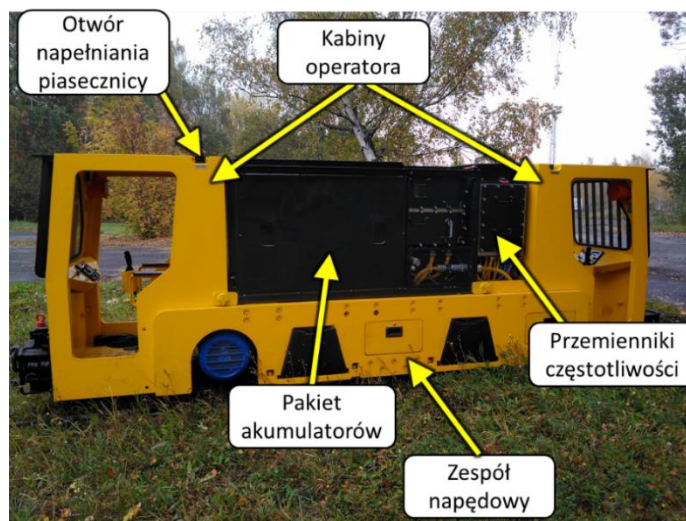
Energy recuperation efficiency in ELECTRA battery electric locomotive with variable track width

Abstract: The chapter describes the developed mathematical model of a battery electric locomotive with two axes powered by CELMCA Inducta dSg 180L4-EP inductive motors. The model allowed for obtaining traction characteristics of the locomotive traveling in different operating conditions (horizontal, upward and downward track, at various types of a train: personnel and cargo with different load). Calculations enabled to estimate the effectiveness of regenerative braking, which can be reused in the locomotive.

Keywords: electric drive, electric vehicle, mining transport, energy recuperation, mathematic modelling

1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy było określenie efektywności hamowania rekuperacyjnego elektrycznej lokomotywy akumulatorowej „Electra” (rys. 1), która ma zastosowanie głównie w kopalniach węgla kamiennego. Hamowanie i rekuperacja energii z jednej strony zmniejsza koszty eksploatacyjne dla użytkowników lokomotywy z drugiej strony wymaga zastosowania odpowiednich algorytmów sterowania prądem ładowania (przy różnych obciążeniach wynikających z długości i stopnia zapełnienia składu), tak aby nie powodować przyspieszonego starzenia elektrochemicznego zasobnika energii. Zmienny rozstaw kół pozwala przenosić jedną lokomotywę między różnymi poziomami kopalni, zamiast użytkować kilka lokomotyw dedykowanych do stosowanych rozstawów szyn, co dodatkowo obniża koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Zbudowany model matematyczny lokomotywy, przyjęte modele przekształtnika i zasobnika, zastosowane scenariusze tras i różnych składów oraz wykonane za pomocą nich symulacje miały dać odpowiedź: w jakim stopniu możliwe jest odzyskanie energii włożonej do rozpędzenia lokomotywy wraz ze składem o zadanej masie. Zmienny rozstaw kół nie miał wpływu na wyniki rekuperacji energii. Niniejsza praca jest kontynuacją badań przedstawionych w [1].



Rys. 1. Widok zbudowanej lokomotywy elektrycznej „Electra” ze zmiennym rozstawem kół, za [1]

2. Model matematyczny napędu

Na poruszającą się lokomotywę działają siły napędowe, oporowe oraz reakcyjne. Siła napędowa w lokomotywie Electra wytwarzana jest przez dwa silniki indukcyjne CELMA Inducta dSg 180L4-EP (dane znamionowe podano w [7]). Silniki zasilane są poprzez dwa falowniki napięcia z akumulatorowego zasobnika energii znajdującego się w lokomotywie. Zakładano, że akumulatory na początku każdej trasy posiadały SOC=1. Jako metodę sterowania napędu zastosowane zostało sterowanie skalarne zapewniające łagodne warunki rozruchu lokomotywy [2]. Jako, że dopuszczalne prędkości poruszania się składu są niskie (≤ 5 m/s dla składu towarowego oraz $\leq 3,5$ m/s dla składu osobowego [3]), to głównymi siłami oporów ruchu są opory toczenia stalowych kół po stalowych szynach. Składnikami oporów ruchu są także składowe wynikające z nachylenia toru. Opory aerodynamiczne są zanedbywalnie małe w stosunku do oporów toczenia w zakresie dopuszczalnych prędkości. W modelu opisującym dynamikę pojazdu pominięte zostały także inne siły tj. siły reakcyjne działające na układ zawieszenia ze względu na złożoność modelowania procesów drgań mechanicznych w pojeździe oraz ich wpływu na dynamikę lokomotywy [4, 5] oraz pomijalny wpływ na proces rekuperacji energii hamowania. Zależność wykorzystaną do opisu oporów ruchu przedstawia wzór:

$$F = k_j m g [C_{rr} \cos(\varphi) + \sin(\varphi)] \quad (1)$$

gdzie:

F – suma oporów toczenia i siły zsuwającej, N,

k_j – współczynnik mas wirujących (1,06),

m – masa składu, kg,

g – przyspieszenie ziemskie (9,81), m/s²,

C_{rr} – współczynnik oporów toczenia stal-stal (0,009),

φ – kąt nachylenia, rad,

Przyspieszenie lokomotywy wynika z bilansu działających sił (2) w wyniku czego poprzez całkowanie przyspieszenia uzyskuje się prędkość lokomotywy ze składem (3).

$$a = \frac{F_d - F}{m} \quad (2)$$

$$v = \int a dt \quad (3)$$

gdzie:

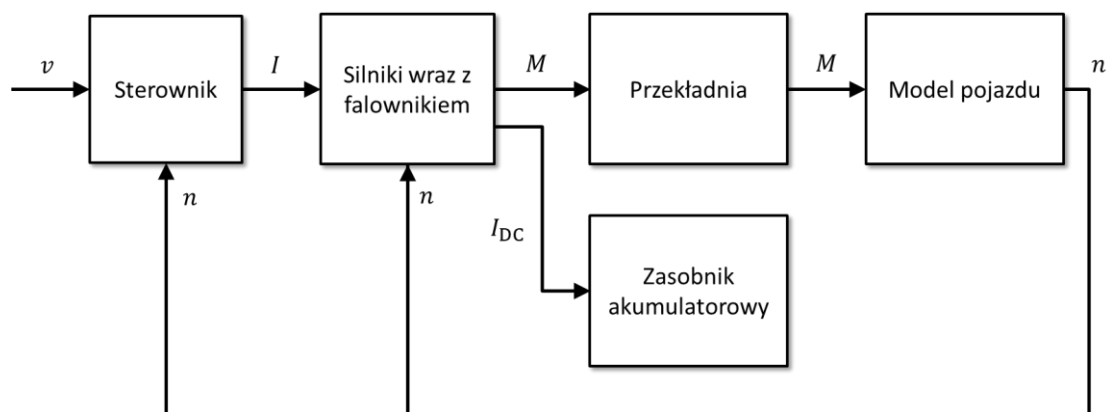
a – przyspieszenie pojazdu, m/s^2 ,

F_d – siła napędowa, N,

v – prędkość liniowa, m/s.

Model symulacyjny lokomotywy zrealizowany został w środowisku Matlab/Simulink, a jego uproszczony schemat blokowy został przedstawiony na rysunku 2. Model ten opracowano za pomocą podsystemów reprezentowanych jako przetworniki energii. Model ten używano podczas doboru komponentów do napędu lokomotywy „Electra” oraz walidacji dobranych elementów układu napędowego. W modelu falownika nie uwzględniano szczegółowych zjawisk zachodzących podczas przekształcania energii (np. przełączenia tranzystorów) ponieważ wymagałoby to znacznie większej rozdzielczości (rzędu mikrosekund) czasowej w stosunku do całej dynamiki lokomotywy (rzędu sekund), a z punktu widzenia postawionego pytania o efektywność zwrotu energii nie jest to konieczne. Szczegółowy model może zostać zrealizowany niezależnie od symulowanego napędu uwzględniającego dynamikę składu z obciążeniem o odpowiednich wartościach wynikających z przeprowadzonych symulacji z wykorzystaniem niniejszego modelu.

Wielkością wejściową układu podczas symulacji była prędkość v , z jaką skład ma się poruszać oraz prędkość obrotowa kół lub lokomotywy w celu wyznaczenia uchybu regulacji za którą odpowiedzialny byłby operator. Wielkość ta przetwarzana jest przez sterownik co symuluje działania operatora lokomotywy. Wielkością wyjściową ze sterownika jest prąd niezbędny do dostarczenia odpowiedniej energii do silników napędowych. Przy sterowaniu skalarnym można założyć, że moment wytwarzany przez układ falownik-silnik jest proporcjonalny do tego prądu $M \sim I$. Układ ten musi mieć również dostarczoną informację o prędkości obrotowej silnika wynikającej z aktualnej prędkości składu w celu wyznaczenia punktu pracy silnika i tym samym strat w niej występujących. Straty w falowniku można przyjąć w przybliżeniu jako stałe i wynoszące około 5% mocy układu. Drugą wielkością wyjściową jest wartość prądu pobieranego z zasobnika energii.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy zrealizowanego modelu symulacyjnego układu napędowego

Szczegółowy sposób w jaki zostały wyznaczone straty w układzie falownik-silnik oraz opis matematyczny zasobnika energii został przedstawiony w publikacji [1]. Napięcie zasobnika jest wielkością znaną i zależną od pobieranego prądu oraz głębokości rozładowania. Kierunek przepływu mocy był uwzględniany w układzie przetwarzania energii i strat – moc wyjściowa falownika podczas pracy napędowej układu określona jest zależnością (5a), natomiast dla pracy podczas hamowania odzyskowego (5b). Przy pracy z odzyskiem energii, zadany prąd oraz prąd zasobnika przyjmują wartość ujemną.

$$P_{DC} = U_{DC}I_{DC} \quad (4)$$

$$P_{fal} = P_{DC} - \Delta P_{fal} \quad (5a)$$

$$P_{DC} = P_{fal} - \Delta P_{fal} \quad (5b)$$

gdzie:

P_{DC} – moc (DC) zasobnika energii, W,

U_{DC} – napięcie zasobnika energii, V,

I_{DC} – prąd zasobnika energii, A,

P_{fal} – moc AC falownika, W,

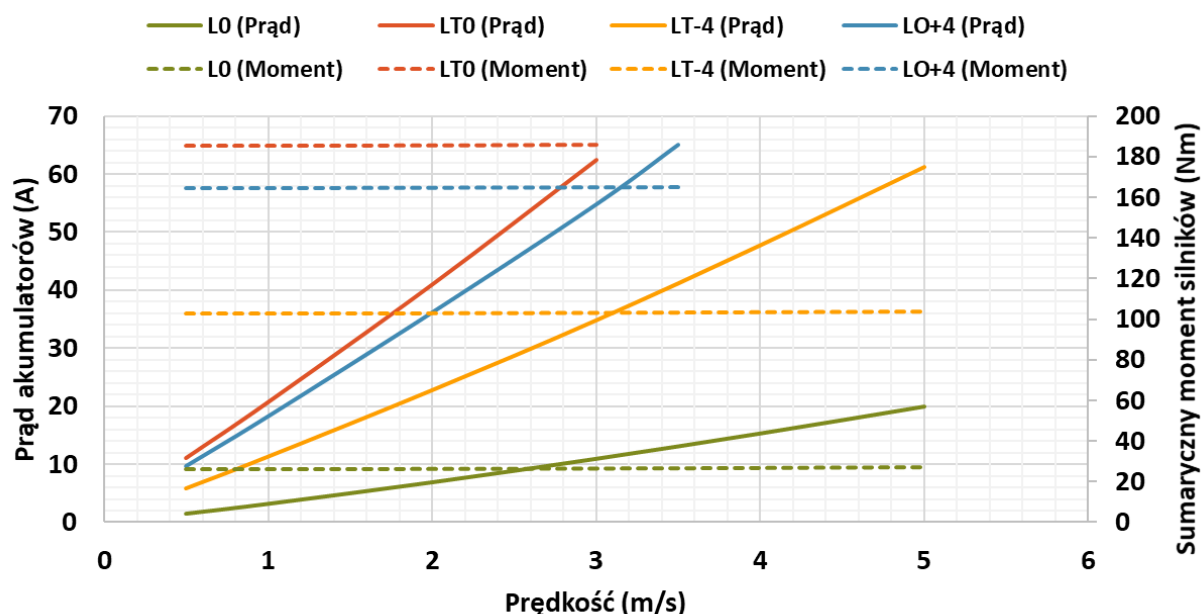
ΔP_{fal} – straty w falowniku, W.

3. Wyniki symulacji

Opisywany model symulacyjny umożliwił zbadanie zarówno stanów dynamicznych, jak i statycznych dla warunków ustalonych tj. stała prędkość i stałe obciążenie. Za pomocą opracowanego modelu wyznaczono charakterystyki trakcyjne, czyli krzywe opisujące stan układu w zależności od prędkości poruszania się w stanie ustalonym z daną prędkością na różnych konfiguracjach tras i przy różnych obciążeniach [3]:

- L0 – lokomotywa bez składu poruszająca się po trasie poziomej ($v_{max} = 5$ m/s);
- LT0 – skład towarowy pełny (76,6 t) poruszający się po równym terenie ($v_{max} = 5$ m/s);
- LT-4 – skład towarowy pełny (76,6 t) poruszający się po upadzie -4‰ ($v_{max} = 5$ m/s);
- LO+4 – skład osobowy pełny (47,1 t) poruszający się po wzniosie +4‰ ($v_{max} = 3,5$ m/s);

Przyjęte w obliczeniach trasy i obciążenia stanowią skrajne przypadki warunków pracy w jakich może pracować lokomotywa w kopalni u jednego z użytkujących ją klientów. Wyznaczone charakterystyki umożliwiają określenie punktów pracy napędu oraz zapotrzebowania na moc, w tym możliwości rekuperacji energii podczas hamowania odzyskowego. Przy wyznaczaniu charakterystyk umieszczonych na rysunkach 3 i 4 uwzględnione zostały jedynie stany ustalone, zaś na rysunkach 5 i 6 stany dynamiczne.

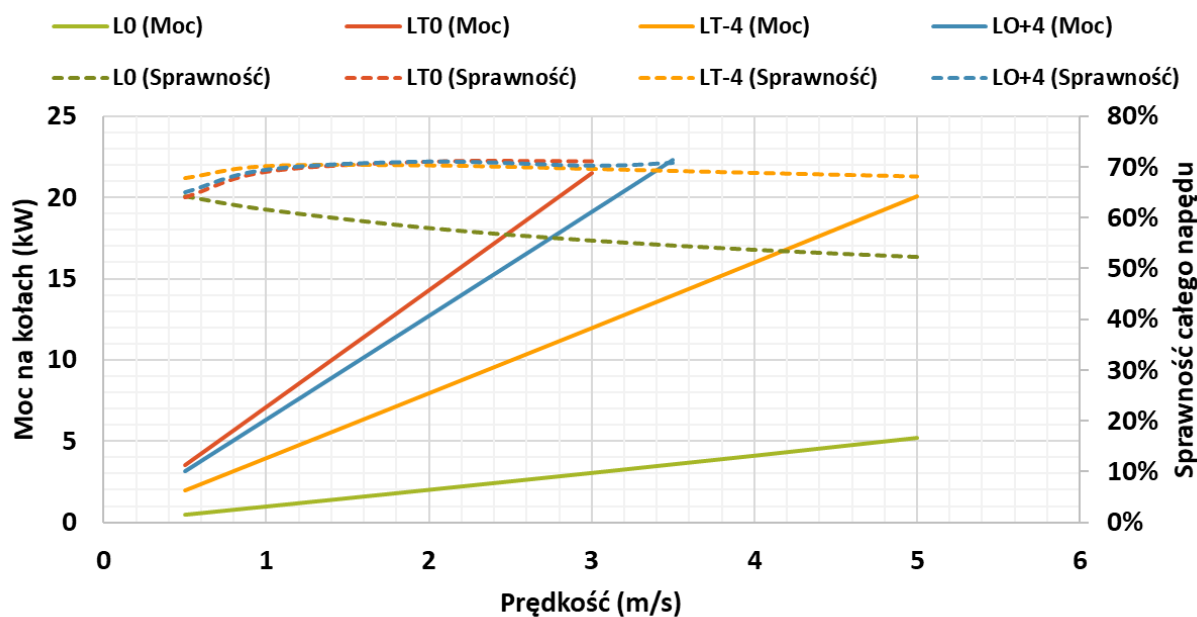


Rys. 3. Obliczone charakterystyki zapotrzebowania na prąd akumulatorów i sumaryczny moment silników w zależności od prędkości w stanie ustalonym

Na rysunku 3, dla analizowanych składów, pokazano wyniki obliczeń zapotrzebowania energetycznego (rozumiane jako wartość pobieranego prądu przy zadanej wartości napięcia na zasobniku) do realizacji zadanej pracy przewozowej oraz sumaryczny moment obu silników w pozwalający na osiągnięcie zadanych przez operatora prędkości jazdy. Charakterystyka LT0 pokazuje, że skład był w stanie uzyskać prędkości 3 m/s, pomimo dopuszczalnej dla tego typu składu maksymalnej prędkości 5 m/s. Dla tak dobranych warunków pracy osiągnięcie prędkości maksymalnej było nieosiągalne ze względu na ograniczenia mocy układu napędowego. Możliwe jest natomiast uzyskanie prędkości maksymalnej podczas poruszania się po upadzie (LT-4). Jest to także widoczne w wartości pobieranego prądu z akumulatorów. Wyniki symulacji pokazały, że składy osobowe są w stanie osiągnąć maksymalne dopuszczalne dla nich prędkości.

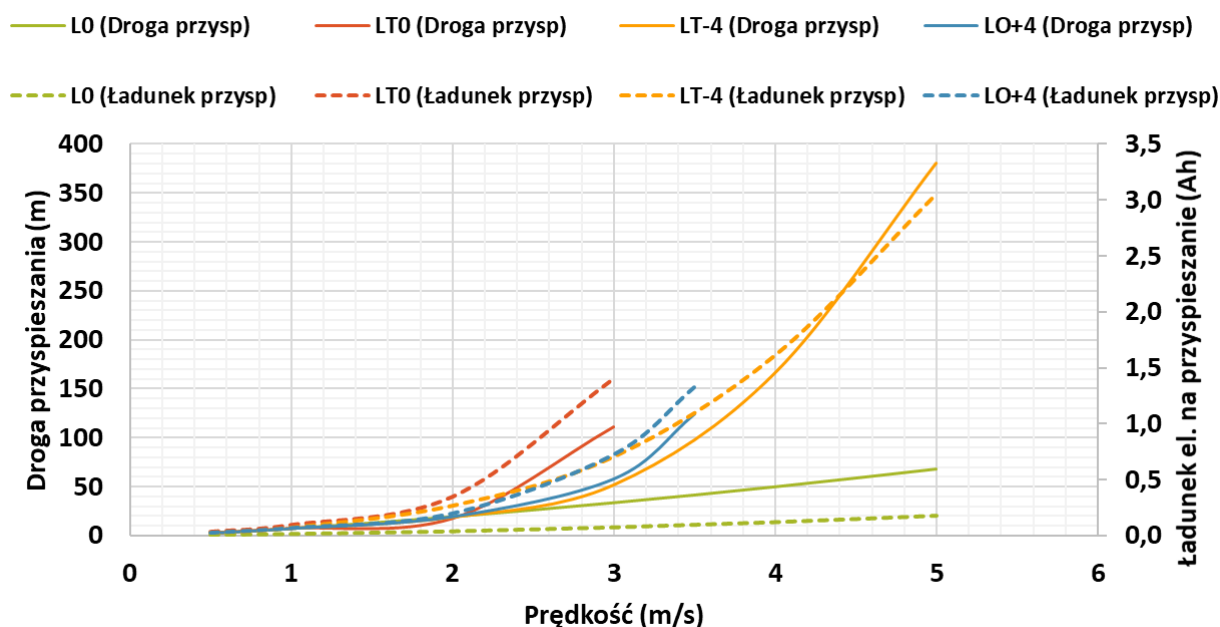
Ostatecznie wyznaczono także całkowitą moc na kołach oraz sprawność układu napędowego z uwzględnieniem strat w zasobniku energii (rys. 4). Maksymalna obliczona sprawność napędu wynosi 70% w ustalonym stanie pracy i występuje dla przedziału prędkości od 1 do 3 m/s w stanach obciążenia silnika dużymi momentami. Podczas jazdy samej lokomotywy (L0) sprawność jest niższa ze względu na mniejszą wartość rozwijanego momentu. Wadą wynikającą z zastosowania silnika indukcyjnego klatkowego jest obecność relatywnie wysokiej wartości prądu biernego niezbędnego do wytworzenia strumienia magnetycznego, niezależnie od obciążenia maszyny, a wynoszącego około połowę prądu znamionowego. Wybór takiej maszyny do lokomotywy podyktowany był niskimi kosztami takich silników oraz wysoką odpornością na trudne warunki eksploatacyjne w kopalniach.

Ważnymi wielkościami, z punktu widzenia operatora lokomotywy, są droga rozpędzania oraz hamowania z uwzględnieniem tarcia [6] zrealizowane w taki sposób, aby nie zerwać przyczepności kół napędowych/hamujących.

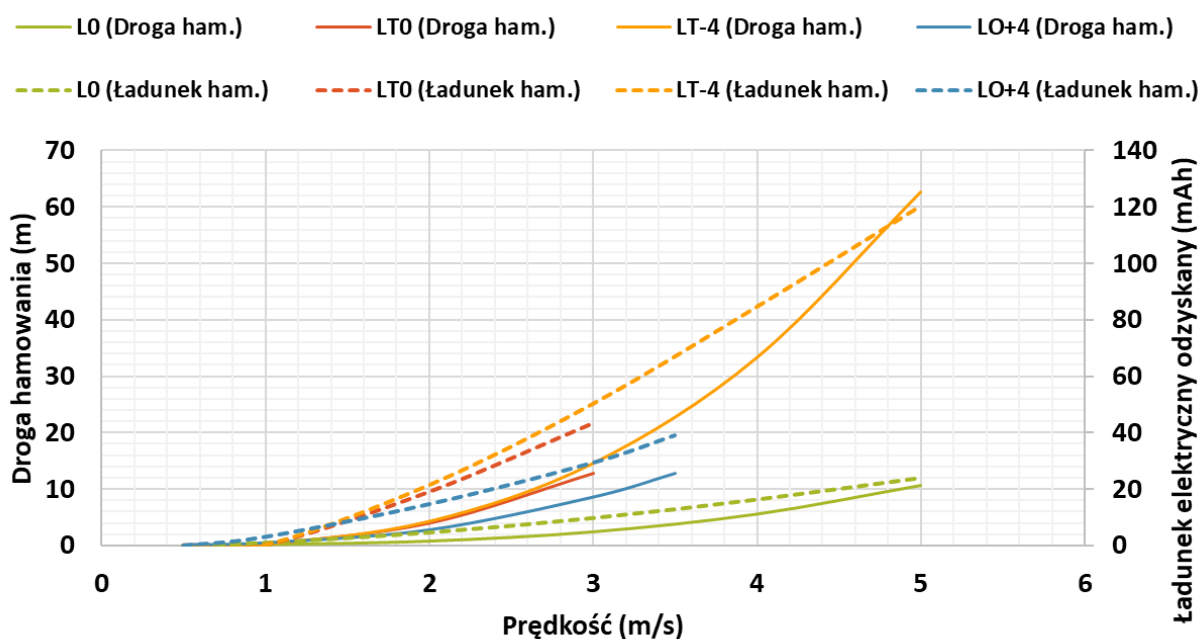


Rys. 4. Wyniki obliczeń zapotrzebowania na moc na kołach oraz całkowita sprawność układu napędowego w zależności od prędkości w stanie ustalonym

Rozpędzanie podczas symulacji odbywało się do osiągnięcia zadanej prędkości składu, natomiast hamowania z ustalonej prędkości aż do zatrzymania. Na charakterystykach przedstawionych na rysunku 5 widoczne są: droga przyspieszania oraz całkowity ładunek elektryczny pobrany z akumulatorów niezbędny do przyspieszenia, natomiast drogę hamowania i odzyskany ładunek elektryczny pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Charakterystyki przebytej drogi i zużyty ładunek elektryczny w zależności od docelowej prędkości



Rys. 6. Charakterystyki drogi hamowania i odzyskany ładunek elektryczny w zależności od prędkości początkowej

Na rysunkach 5 i 6 charakterystyki zostały zestawione razem i przedstawione w taki sposób aby była możliwa ich ocena niezależnie od skali (skalę determinował czas danego cyklu jezdny). Droga rozpędzania składu jest około 5 razy dłuższa niż droga hamowania, natomiast ładunek elektryczny wykorzystany na przyspieszanie jest nawet 30 razy większy niż ładunek odzyskany. Różnice w uzyskiwanych wartościach wynikają z dużej masy składu przekładającej się na opory ruchu opisane równaniem (1). Z charakterystyk pokazanych na rysunkach 5 i 6 można odczytać wartość sprawności procesu rekuperacji energii dla każdej z rozwijanych prędkości danego składu.

4. Podsumowanie

Analiza skuteczności rekuperacji energii w oparciu o opracowany model symulacyjny napędu baterijnego lokomotywy elektrycznej, w analizowanych warunkach ruchu wykazała niską efektywność hamowania odzyskowego wynoszącą około 3%. Wynika to z występowania dużych oporów toczenia spowodowanych wysoką masą całkowitą składu oraz niską sprawnością układu w stanach dynamicznych, zarówno podczas przyspieszania, jak i hamowania. W stanach statycznych możliwe jest osiągnięcie wysokiej sprawności całkowitej układu napędowego dochodzącej do 70% w szerokim zakresie prędkości poruszania się.

Projekt i badania zostały sfinansowane w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0609/17-00 Opracowanie Elektrycznej Lokomotywy Akumulatorowej ze zmiennym rozstawem kół „Electra”.



Literatura

1. Lasek P., Setlak R., Zieleźny W., Kupczak Sz.: „Elektryczna lokomotywa akumulatorowa „Electra” ze zmiennym rozstawem kół”, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne Nr 126, 2/2021
2. Polnik B. „Badania wybranych konfiguracji napędów górniczej lokomotywy akumulatorowej”, Praca Dyplomowa Magisterska, promotor dr inż. Rafał Setlak, Gliwice, 2011 (materiały niepublikowane)
3. § 587 oraz § 589 Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 9 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w ruchu zakładu górniczego (Dz. U. 2017 poz. 321)
4. West, Martin & Bingham, Chris & Schofield N.: “Predictive control for energy management in all/more electric vehicles with multiple energy storage units”, IEMDC'03, 222 - 228 vol.1, 2003
5. Madej J. „Teoria ruchu pojazdów szynowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2012
6. Uyulan, Çağlar & Gokasan, M, Bogosyan, Seta: “Modeling, simulation and slip control of a railway vehicle integrated with traction power supply”. Cogent Engineering, 4, 2017
7. https://www.cantonigroup.com/storage/download/files/27/1732_przeciwwybuchowe-dla-przemyslu-gorniczego.pdf (dostęp: 25.08.2021)