

Paweł Lasek, Rafał Setlak, Politechnika Śląska, Gliwice
Wojciech Zieleźny, Szymon Kupczak, Urządzenia i Konstrukcje S. A., Żory

ELEKTRYCZNA LOKOMOTYWA AKUMULATOROWA "ELECTRA" ZE ZMIENNYM ROZSTAWEM KÓŁ

„ELECTRA” - THE ELECTRIC BATTERY LOCOMOTIVE WITH VARIABLE TRACK WIDTH

Streszczenie: W artykule przedstawiony został model symulacyjny elektrycznej lokomotywy górniczej zasilanej z zasobnika akumulatorowego. Opisane zostały modele matematyczne podzespołów pojazdu szynowego, w tym model silnika elektrycznego, akumulatorów kwasowo-ołowiowych, uproszczony model przyczepności oraz oporów toczenia. Pokazano wybrane wyniki symulacji zachowania się układu napędowego zasilanego z akumulatorów w różnych stanach pracy w prostym cyklu jezdny.

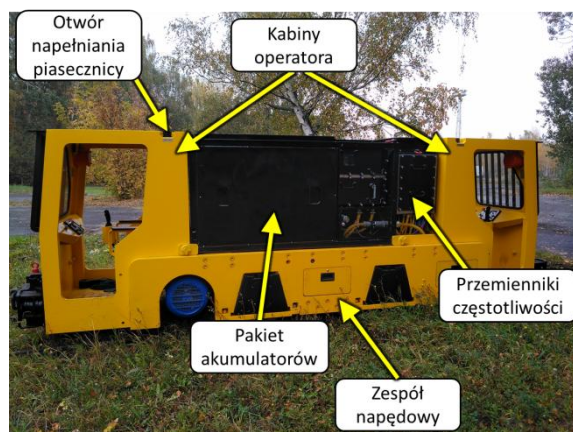
Abstract: The following paper presents a simulation model of a electric battery locomotive dedicated for mining. The mathematical models of a rail vehicle has been shown, with a analytical models describing an electric motor drivetrain, including battery system, traction and rolling losses. A set of key data for design and validation has been obtained in a simple drive cycle.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, pojazd elektryczny, akumulatory kwasowo-ołowiowe

Keywords: electric drive, electric vehicle, lead-acid battery

1. Wstęp

Przedmiotem analiz była górnicza lokomotywa z napędem elektrycznym z zasobnika akumulatorowego. Lokomotywa została wdrożona do pracy w kopalniach węgla kamiennego do przewozu osób i towarów (Rys. 1).



Rys. 1. Elektryczna lokomotywa „Electra” ze zmiennym rozstawem kół

Na etapie projektowania pojazdu dokonano szeregu założeń warunkujących parametry trakcyjne wynikających z obowiązujących norm i przepisów prawnych [1]:

- maksymalne nachylenie torowiska nie przekracza 5‰ (jazda na pusto-wznios, jazda na pełno-upad),

- dla transportu osobowego prędkość maksymalna nie większa niż 3,5m/s, maksymalna droga hamowania nie dłuższa niż 40m,
- dla transportu towarowego (np. kamień, sprzęt, maszyny, węgiel) prędkość maksymalna nie większa niż 5m/s, maksymalna droga hamowania nie dłuższa niż 80m.

Celem symulacji było określenie stanów energetycznych i elektrycznych układu napędowego, w szczególności akumulatorów w różnych stanach zużycia lub nierównomierności naładowania lub uszkodzeń ogniw. Istotne było także poznanie stanów cieplnych silników Ponadto wyznaczono bilans energii elektrycznej pobieranej z baterii akumulatorów podczas rozruchu i podczas jazdy z różnym obciążeniem i przy różnych strategiach sterowania w tym rekuperacji podczas hamowania odzyskowego.

2. Modele matematyczne

2.1 Model lokomotywy i wagonów

Ze względu na niskie prędkości poruszania się lokomotywy oraz dużą masę własną i wagonów, głównymi oporami ruchu pojazdu są opory toczenia wywołane naciskiem kół na szyny. Założono masy symulowanych elementów składu i lokomotywy:

- lokomotywa: 10800 kg;
- wagon osobowy (WO M2) pusty: 1800 kg;
- wagon osobowy (WO M2) pełny: 3300 kg;
- wagon towarowy (średni nieresorowany) pusty: 1200 kg;
- wagon towarowy (średni nieresorowany) pełny: 4700 kg;

Przyjęto całkowite masy składów (przyjęte w symulacjach ilości wagonów wynikają z geometrii szluz w kopalniach klientów):

- lokomotywa i 14 wagonów osobowych pustych: 30,6 t;
- lokomotywa i 14 wagonów osobowych pełnych: 47,1 t;
- lokomotywa i 11 wagonów towarowych pustych: 27,6 t;
- lokomotywa i 11 wagonów towarowych pełnych: 76,6 t;

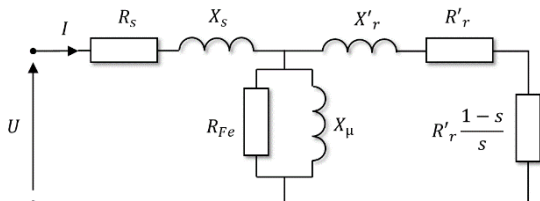
Opory toczenia i wynikające z nachylenia terenu wyznaczono wykorzystując równanie (1) [2].

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

gdzie: $k_j = 1,06$ – współczynnik mas wirujących; m – masa całkowita; $C_{rr} = 0,009$ – współczynnik oporów toczenia koło-szlina (stal-stal); φ – kąt nachylenia drogi - upad; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie

2.2. Model układu napędowego

Lokomotywa „Electra” posiada dwa niezależne jednoosiowe wózki jezdne. Model symulacyjny pojazdu został wykonany w sposób uniwersalny [2][3] pozwalający na zmianę jednostki napędowej na inną. Napęd osi stanowi silnik indukcyjny dSg 180L4-EP na oś. W oparciu o dane katalogowe wyznaczono parametry schematu zastępczego maszyny (rys 2).



Rys. 2. Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej

Silniki zasilane są z falowników napięcia i sterowane częstotliwościowo. Wykorzystując schemat zastępczy silnika, wyznaczona została analitycznie mapa sprawności napędu dla silnika zasilanego z falownika napięcia. Na mapie sprawności uwzględniony został obszar do-

puszczalnych momentów i prędkości obrotowych silnika, w tym pracę z prędkościami powyżej znamionowej. Straty całkowite w uzwojeniach wyznaczono jako straty Joule’a (2).

$$\Delta P_{Cu} = mR I^2 \quad (2)$$

Straty w rdzeniu maszyny ze względu na zmienną częstotliwość, a tym samym prędkość obrotową wyznaczono wykorzystując zależność (3). Wykorzystanie równania (3) do wyznaczenia strat w żelazie wynika z braku dostępności do hamowni oraz danych zastosowanej stali do wykonania pakietów blach. Ponadto mapa sprawności wyznaczana w oparciu o punkty na charakterystyce mechanicznej, korzystniejsze jest sformułowanie równania wykorzystując te dane.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fen} \left(\frac{n}{n_n}\right)^{1,4} \quad (3)$$

Straty mechaniczne w napędzie przyjęto w uproszczony sposób jako 1% strat znamionowych, zależnych liniowo od prędkości obrotowej (4).

$$\Delta P_m = 0,01 \cdot \Delta P_n \frac{n}{n_n} \quad (4)$$

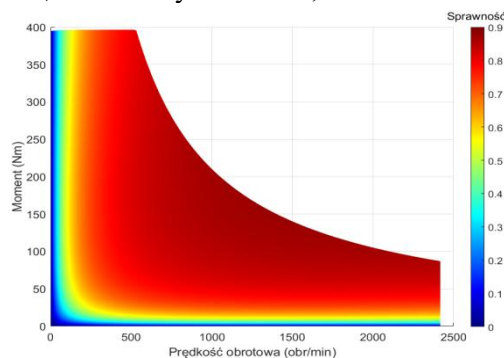
Straty całkowite stanowią sumę wszystkich strat (5). Znając moment i prędkość obrotową maszyny oraz straty w niej występujące, wyznaczona została sprawność dla każdego punktu pracy (6). Mapa sprawności przedstawiona została na Rysunku 3.

$$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + \Delta P} \quad (6)$$

gdzie: $m = 3$ – liczba faz silnika;

R_z – rezystancja zastępcza; I – prąd fazowy silnika; ΔP_{Fen} – znamionowe straty w rdzeniu; n – prędkość obrotowa; n_n – znamionowa prędkość obrotowa; ΔP_n – straty całkowite znamionowe; ΔP – straty całkowite;



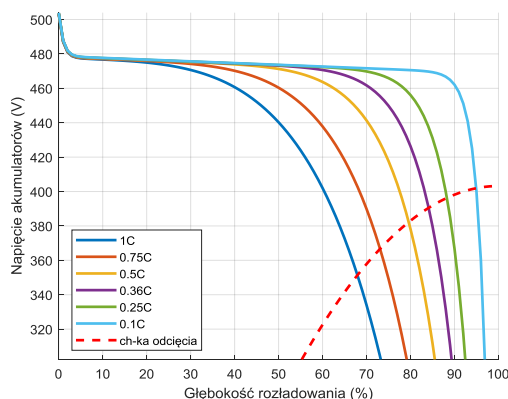
Rys. 3. Mapa sprawności układu silnika zasilanego z falownika sterowanego częstotliwościowo

2.3. Zasobnik akumulatorowy

Lokomotywa wykorzystuje 42 sztuki akumulatorów trakcyjnych Pb-PbO₂ EnerSys PowerSafe 12V190F połączone szeregowo. Ze względu na dynamikę pracy, wysokie zapotrzebowanie na prąd w stanach dynamiczny konieczne było opisanie charakterystyk w zależności od głębokości rozładowania i pobieranego prądu.

$$U(I, E_{DOD}) = 2 - \exp\left(\frac{I_{ic} I_c}{E_{DOD}}\right) - V_d E_{DOD} - N \cdot R(E_{DOD}) \cdot I - (1 - V_{pc}) + (1 - V_{pc}) e^{-V_{DOD} E_{DOD}} \quad (8)$$

gdzie: $U = 0 \div 1$ – względne napięcie; $I = -I_{max} \div I_{max}$ – względny prąd zasobnika; $E_{DOD} = 0 \div 1$ – głębokość rozładowania zasobnika; $I_c = 1.68$ – maksymalny względny prąd; $I_{ic} = 50$ – względna szybkość opadania charakterystyki wynikająca ze zwiększenia prądu zasobnika; $V_d = 0.1$ względny spadek napięcia wynikający z poziomu rozładowania; $R(E_{DOD})$ – rezystancja zasobnika; $V_{pc} = 0.95$ – względne napięcie robocze akumulatora; $V_{DOD} = 100$ – szybkość opadania początkowej części charakterystyki dla niskiego stanu rozładowania ($E_{DOD} \approx 0$). Po przemnożeniu wartości względnej napięcia przez wartość nominalną napięcia akumulatorów i ich liczbę otrzymuje się wartości obserwowane na zasobniku akumulatorów, co zostało przedstawione na Rysunku 4 dla różnych prądów rozładowania zasobnika.



Rys. 4. Charakterystyka akumulatorów kwasowo-ołowiowych

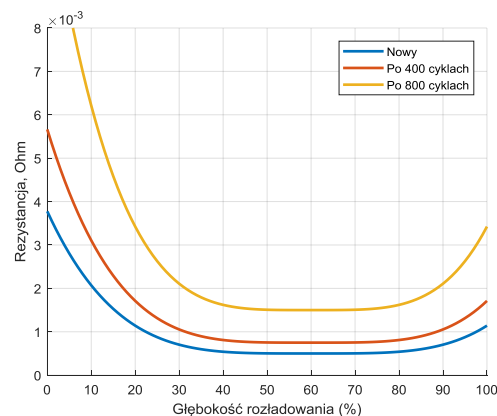
Rezystancja pojedynczego akumulatora R zależna jest od poziomu jego rozładowania E_{DOD} . Rezystancja opisana została za pomocą wzoru analitycznego (9), pozwalającego uwzględnić wpływ starzenia się na wartość rezystancji.

$$R(E_{DOD}) = \quad (9)$$

$$R_{bat} [\cosh[(E_{DOD} - E_{min})^2] - R_{min}]$$

gdzie: R_{bat} – rezystancja akumulatora [Ω]; $R_{min} = 0.99$ – minimalna względna wartość rezystancji akumulatora; $E_{min} = 0.6$ – względny poziom rozładowania przy którym występuje minimum rezystancji.

Wartość R_{bat} zależy od liczby cykli ładowania i rozładowania akumulatora i została przyjęta na drodze pomiarów po określonej liczbie cykli. Dla nowego akumulatora jest równa 0.05Ω , natomiast wraz ze starzeniem się układu wzrosła 1.5 raza po 400 cyklach, oraz 3 razy po 800 cyklach. Charakterystyki rezystancji względem poziomu rozładowania zostały przedstawione na Rysunku 5.



Rys. 5. Zmiana rezystancji akumulatorów w zależności od poziomu rozładowania i liczby cykli

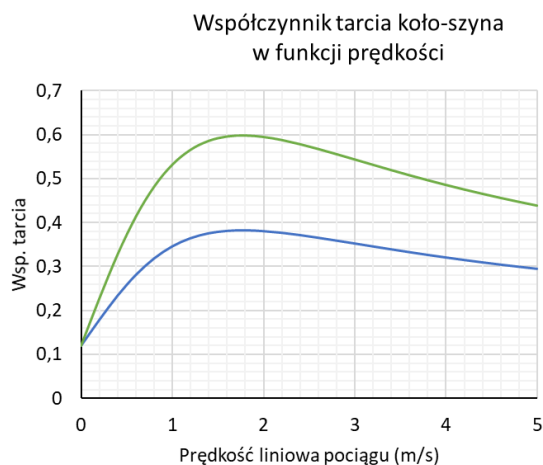
2.4. Symulacja poślizgu kół pojazdu szynowego

W warunkach panujących pod ziemią w kopalniach węgla kamiennego występuje wysoki stopień zapylenia oraz zawilgocenia. Pył węglowy, błoto oraz wilgoć zmieszane osadzają się na torach zmniejszając współczynnik tarcia, który odpowiedzialny jest za przeniesienie napędu na szyny. W celu poprawy tego współczynnika w lokomotywie zainstalowane zostały nowatorskie piasecznice (uzyskano patent **P.424509**). Bazowy współczynnik tarcia dla układu stal-stal dla prędkości początkowej $v = 0 \text{ m/s}$ przyjęto jako 0.12. Dla toru nie pokrytego piaskiem przyjęto $\mu = 0.33$, natomiast dla toru pokrytego suchym piachem $\mu = 0.6$ [4]. Uwzględniono, że współczynnik tarcia zależny jest od prędkości liniowej pojazdu i opisano go równaniami (10a) dla toru bez piachu, oraz (10b) dla toru pokrytego piachem. Oba równa-

nia zostały przedstawione w postaci charakterystyk na rysunku 6.

$$\mu(v) = 0.33 \frac{v(3.6v + 100)0.45}{(18v^2 + 50)} + 0.12 \quad (10a)$$

$$\mu(v) = 0.6 \frac{v(3.6v + 100)0.45}{(18v^2 + 50)} + 0.12 \quad (10b)$$



Rys. 6. Współczynnik tarcia koło-szyna w zależności od prędkości pojazdu

Model lokomotywy posiadał dwa odmienne modele poruszania się: jeden dla normalnej pracy, gdy koła toczą się bez poślizgu a współczynnik tarcia obliczany jest z równań (10a) i (10b) oraz występują straty toczenia (1); oraz drugi model dla pracy z poślizgiem kół [5], w którym jedynymi stratami są straty tarcia wynikające ze względnego ruchu kół i szyny. Przełączenie pomiędzy modelami zależne jest od obliczanego współczynnika tarcia (11) i porównywania go z wartością dopuszczalną opisana wzorami (10a) i (10b) [4].

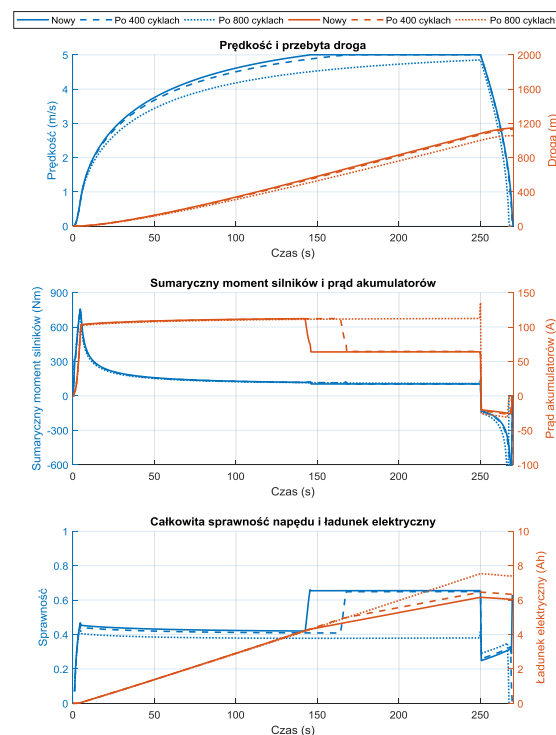
$$\mu = \frac{M}{rmg} \quad (11)$$

gdzie: M – moment obrotowy na kołach;
 r – promień koła; m – masa lokomotywy;
 g – przyspieszenie ziemskie;

4. Wyniki symulacji wpływu starzenia się akumulatorów na pracę napędu

Na rysunkach 8 i 9 zaprezentowano wybrane wyniki symulacji prostego cyklu jezdny lokomotywy, w których uwzględniono wpływ starzenia się akumulatorów, i tym samym wzrost rezystancji (Rys. 5). Cykl jezdny polegał na rozpędzaniu się lokomotywy z różnymi obciążeniami w czasie 260 sekund. Najtrudniejsze warunki do pracy lokomotywy stwarza

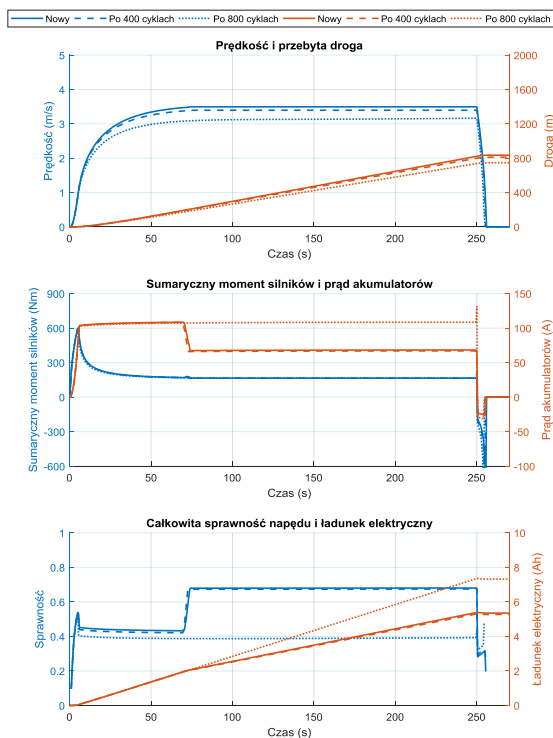
załadowany skład towarowy (76.6 t) poruszający się po upadzie -4‰ (Rys. 8).



Rys. 8. Przebiegi dla lokomotywy ze składem towarowym pełnym (76.7 t) poruszający się po upadzie -4‰

Kolejnym skrajnym przypadkiem, jest skład osobowy załadowany (47.1 t) poruszający się pod wzniesienie +4‰ (Rys. 9).

Symulacje pokazały, że proces starzenia się akumulatorów wpływa niekorzystnie na pracę układu, do tego stopnia, że przy znacznym wzroście rezystancji akumulatorów nie jest możliwe osiągnięcie prędkości ustalonej 5 m/s w zadanym czasie (Rys. 8) lub osiągnięcie maksymalnej prędkości 3.1 m/s (Rys. 9) pomimo znacznie mniejszej masy składu. Porównując oba przypadki: w pierwszym z nich skład porusza się po upadzie, dzięki czemu osiągnięcie wyższych prędkości jest łatwiejsze niż w drugim przypadku, gdzie skład porusza się pod wzniesienie.



Rys. 9. Przebiegi dla lokomotywy ze składem osobowym pełnym (47.1 t) poruszający się po wzniesieniu +4%

8. Podsumowanie

Opracowane modele symulacyjne pojazdu szynowego z napędem elektrycznym przeznaczonego do pracy w warunkach kopalni węgla kamiennego pozwoliły na określenie niezbędnych parametrów jakie powinien posiadać taki pojazd, aby zastąpić podobnego zastosowania lokomotywy z napędem spalinowym. Przy opracowywaniu modeli wzięto pod uwagę wiele czynników tj. współczynnik tarcia, charakterystyki zastosowanych akumulatorów trakcyjnych w tym zmianę ich rezystancji wraz z liczbą cykli pracy. Wykazano istotny wpływ procesów starzenia zasobnika na osiągi lokomotywy oraz korzyści płynące z zastosowania piasecznicy zwiększając bezpieczeństwo poruszania się pojazdu w trudnych warunkach ruchowych.

7. Literatura

- [1]. § 589 Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.
- [2]. Polnik B. „Badania wybranych konfiguracji napędów górniczej lokomotywy akumulatorowej”, Praca Dyplomowa Magisterska, promotor dr inż. Rafał Setlak, Gliwice, 2011.
- [3]. 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.
- [4]. J. Madej, “Teoria ruchu pojazdów szynowych”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 2012.
- [5]. Uyulan, Çağlar & Gokasan, M, Bogosyan, Seta. “Modeling, simulation and slip control of a railway vehicle integrated with traction power supply”. *Co-gent Engineering*. 4, 2017.

Autorzy

mgr inż. Paweł Lasek,
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Gliwice, e-mail: pawel.lasek@polsl.pl
dr inż. Rafał Setlak,
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Gliwice, e-mail: rafal.setlak@polsl.pl
mgr inż. Wojciech Zieleźny,
Urządzenia i Konstrukcje S. A., Żory
e-mail: w.zielezny@uiksa.pl
mgr inż. Szymon Kupczak,
Urządzenia i Konstrukcje S. A., Żory
e-mail: s.kupczak@uiksa.pl

Informacje dodatkowe

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”*