

Elektryczna lokomotywa akumulatorowa „Electra” ze zmiennym rozstawem kół

Paweł Lasek, Rafał Setlak, Wojciech Zieleźny, Szymon Kupczak

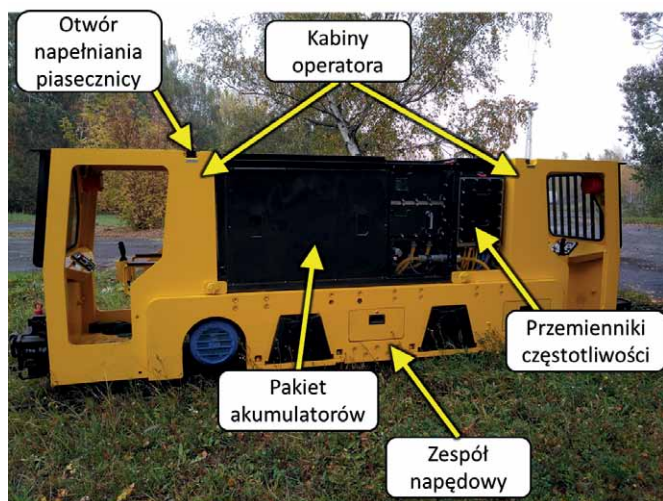
1. Wstęp

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).

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

Celem symulacji było określenie stanów energetycznych i elektrycznych układu napędowego, w szczególności akumulatorów w różnych stanach zużycia lub nierównomierności naładowania, lub uszkodzeń ogniów. 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.



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

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.

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

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

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.

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

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: 10 800 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 szlaków 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].

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

gdzie:

$k_f = 1,06$ – współczynnik mas wirujących;

m – masa całkowita;

$C_{rr} = 0,009$ – współczynnik oporów toczenia koło – szyna (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 os. W oparciu o dane katalogowe wyznaczono parametry schematu zastępczego maszyny (rys. 2).

Silniki zasilane są z falowników napięcia i sterowane częstotliwościowo. Przy wykorzystaniu schematu zastępczego silnika wyznaczona została analitycznie mapa sprawności napędu dla silnika zasilanego z falownika napięcia. Na mapie sprawności uwzględniony został obszar dopuszczalnych momentów i prędkości obrotowych silnika, w tym pracy 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 została wyznaczona w oparciu o punkty na charakterystyce mechanicznej, zatem korzystniejsze jest sformułowanie równania opisującego straty na podstawie danych na niej zawartych, czyli prędkości obrotowej, a nie częstotliwości.

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

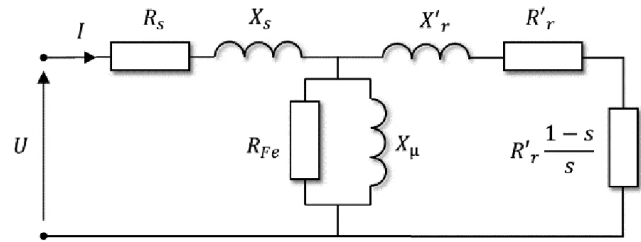
Straty mechaniczne w napędzie przyjęto w uproszczony sposób jako 1% strat znamionowych, zależnych liniowo od prędkości obrotowej (4).

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

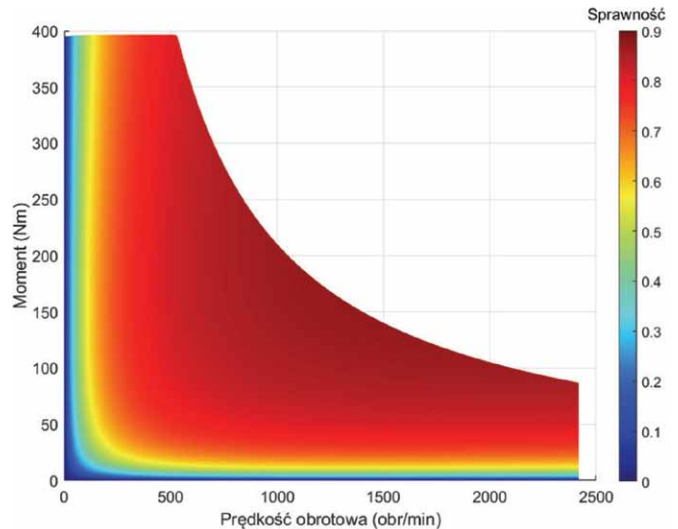
Straty całkowite stanowią sumę wszystkich strat (5). Znając moment i prędkość obrotową maszyny oraz straty w niej występujące, wyznaczona została sprawność dla każdego punktu pracy (6). Mapa sprawności przedstawiona została na rys. 3.

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

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



Rys.2. Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej



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

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.

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 dynamicznych, konieczne było opisanie charakterystyk w zależności od głębokości rozładowania i pobieranego prądu.

$$U(I, E_{DOD}) = 2 - \exp\left(\frac{Ic}{E_{DOD}}\right) - V_d E_{DOD} - N \cdot R(E_{DOD}) \cdot I - (1 - V_{pc}) + (1 - V_{pc})e^{-V_{DOD}E_{DOD}} \quad (7)$$

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 rys. 4 dla różnych prądów rozładowania zasobnika.

Rezystancja pojedynczego akumulatora R zależna jest od poziomu jego rozładowania E_{DOD} . Rezystancja opisana została za pomocą wzoru analitycznego (8), pozwalającego uwzględnić wpływ starzenia się na wartość rezystancji.

$$R(E_{DOD}) = R_{bat} [\cosh[(E_{DOD} - E_{min})] - R_{min}] \quad (8)$$

gdzie:

R_{bat} – rezystancja akumulatora [Ω];

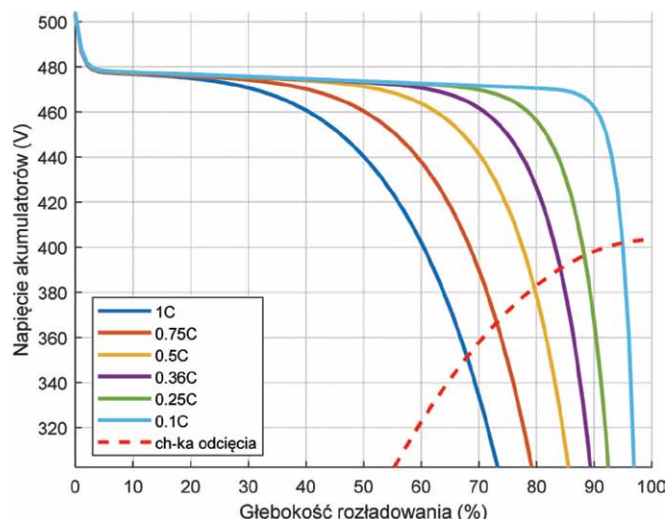
$R_{min} = 0,99$ – minimalna względna wartość rezystancji akumulatora;

$E_{min} = 0,6$ – względny poziom rozładowania, przy którym występuje minimum rezystancji.

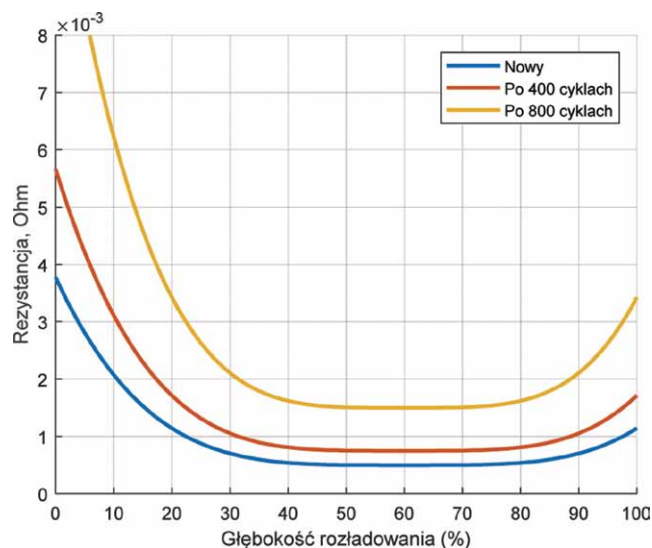
Wartość R_{bat} zależy od liczby cykli ładowania i rozładowania akumulatora i została przyjęta na drodze pomiarów po określonej liczbie cykli. Dla nowego akumulatora jest równa 0,05 Ω , natomiast wraz ze starzeniem się układu wzrosła 1,5 raza po 400 cyklach oraz 3 razy po 800 cyklach. Charakterystyki rezystancji względem poziomu rozładowania zostały przedstawione na rys. 5.

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 $v = 0$ m/s przyjęto jako 0,12. Dla toru niepokrytego 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 (9a) dla toru bez piachu oraz (9b) dla toru pokrytego piachem. Oba równania zostały przedstawione w postaci charakterystyk na rysunku 6.

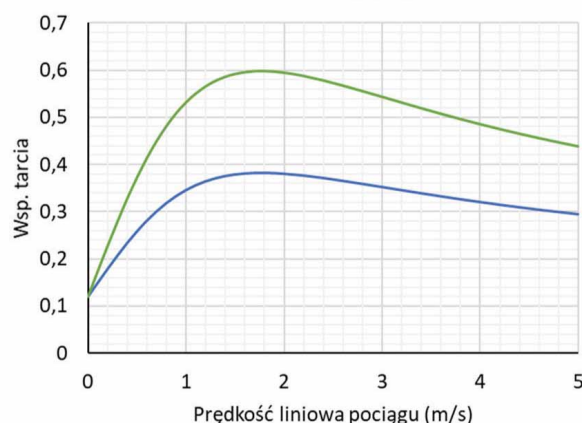


Rys. 4. Charakterystyka akumulatorów kwasowo-ołowiowych

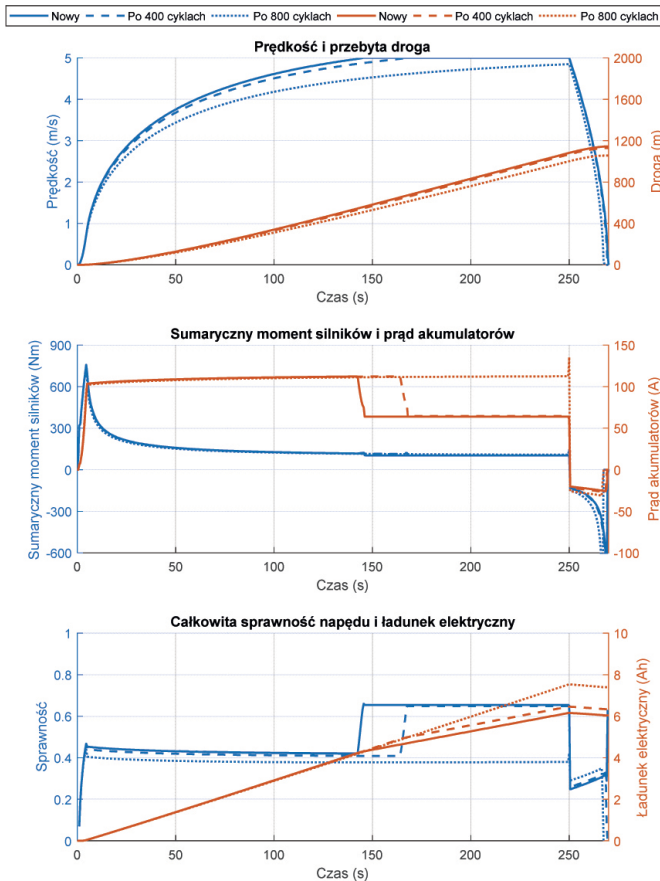


Rys. 5. Zmiana rezystancji akumulatorów w zależności od poziomu rozładowania i liczby cykli

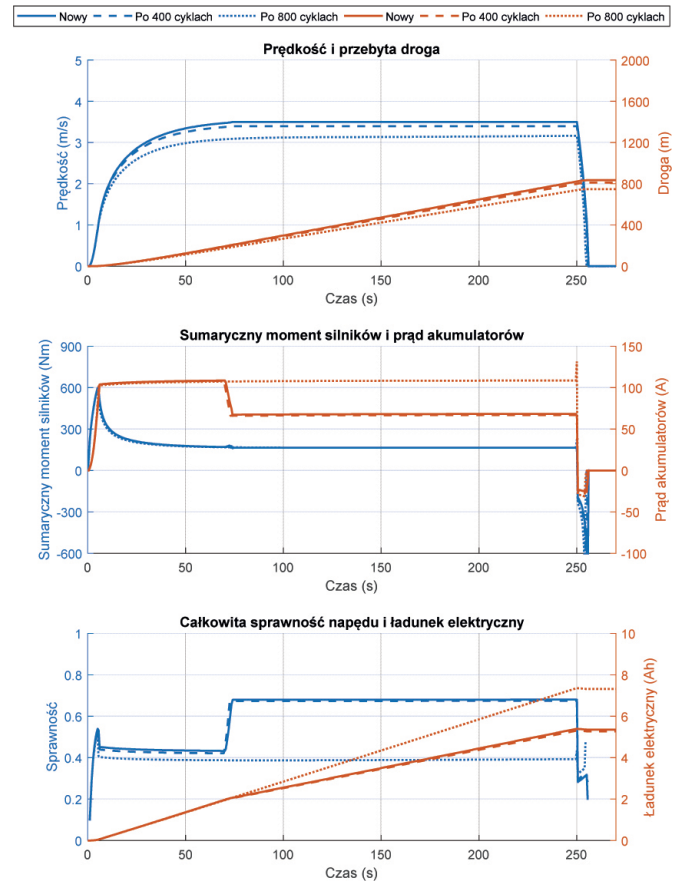
Współczynnik tarcia koło-szyna w funkcji prędkości



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



Rys. 7. Przebiegi dla lokomotywy ze składem towarowym pełnym (76,7 t) poruszającym się po upadzie -4‰



Rys. 8. Przebiegi dla lokomotywy ze składem osobowym pełnym (47,1 t) poruszającym się po wzniesieniu +4‰

$$\mu(v) = 0.33 \frac{v(3.6v + 100)0.45}{(18v^2 + 50)} + 0.12 \quad (9a)$$

$$\mu(v) = 0.6 \frac{v(3.6v + 100)0.45}{(18v^2 + 50)} + 0.12 \quad (9b)$$

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 (9a) i (9b) oraz występują straty tocznienia (1); oraz drugi model dla pracy z poślizgiem kół [5], w którym jedynymi stratami są straty tarcia wynikające ze względnego ruchu kół i szyny. Przelączenie pomiędzy modelami zależne jest od obliczanego współczynnika tarcia (10) i porównywania go z wartością dopuszczalną opisaną wzorami (9a) i (9b) [4].

$$\mu = \frac{M}{rmg} \quad (10)$$

gdzie:

M – moment obrotowy na kołach;

r – promień koła;

m – masa lokomotywy;

g – przyspieszenie ziemskie;

3. Wyniki symulacji wpływu starzenia się akumulatorów na pracę napędu

Na rysunkach 7 i 8 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. 7).

Kolejnym skrajnym przypadkiem jest skład osobowy załadowany (47,1 t), poruszający się pod wzniesienie +4‰ (rys. 8).

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. 7) lub osiągnięcie maksymalnej prędkości 3,1 m/s (rys. 8) 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.

4. 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, co zwiększa bezpieczeństwo poruszania się pojazdu w trudnych warunkach ruchowych.

Literatura

- [1] § 589 Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. 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 M., BINGHAM CH., SCHOFIELD N.: *Predictive control for energy management in all/more electric vehicles with multiple energy storage units*. IEMDC'03, vol. 1, 2003.

- [4] MADEJ J.: *Teoria ruchu pojazdów szynowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [5] UYULAN Ç., GOKASAN M., BOGOSYAN S.: *Modeling, simulation and slip control of a railway vehicle integrated with traction power supply*. Cogent Engineering, 4, 2017.

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”

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

reklama



Darmowa e-prenumerata!

www.nis.com.pl

napędy i sterowanie miesięcznik naukowo-techniczny

Przemysłowa • energoelektronika • aparatura kontrolno-pomiarowa • mechatronika • systemy zasilające • bezpieczeństwa • hydraulika • pneumatyka • robotyka • systemy transportowe • utrzymanie ruchu

Nr 1 (grudzień)
Rok: 72/II
Ogłoszeń: 252/1
ISSN 1502-2794
Cena: 10 zł netto
Cena brutto: 11 zł

Napędzaj z nami przemysł
www.nis.com.pl

Image: Freepik.com

