XIII KONFERENCJA NAUKOWA ZN POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1998
„POJAZDY SZYNOWE '98" Seria: TRANSPORT z.31, nr kol. 1392

Jerzy KWAŚNIKOWSKI

WYBRANE CHARAKTERYSTYKI POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

Streszczenie. Przedstawiono propozycje definiowania charakterystyk pojazdów trakcyjnych i wskaźników liczonych na podstawie symulacji przejazdów pociągów, w celu umożliwienia określania jakości przejazdu, niezbędnej do wyznaczenia kosztów użytkowania. Przykładowe eksperymenty symulacyjne wykonano dla pociągów na trasie Poznań-Wrocław.

SOME PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF LOCOMOTIVES

Summary. Suggestion of some locomotives preformance characteristics and coefficients definitions based on results of run simulation is presented. The characteristics could be used to running quality evaluation and exploitation cost estimation.

1. WSTĘP

W okresie umacniania się gospodarki rynkowej przydatne może być opracowanie skutecznego i szybkiego narzędzia do oceny efektywności techniczno-ekonomicznej przedsięwzięć transportowych. Ocena i sterowanie efektywnością jest niezbędne do zwiększenia konkurencyjnego udziału transportu szynowego w rynku usług transportowych oraz w zdobywającym coraz więcej klientów rynku pakietowych (kompleksowych) usług logistycznych, w których przewozy stanowią bardzo znaczącą pozycję rzeczową i kosztową. Z punktu widzenia inwestora jedną z najważniejszych informacji jest oczywiście cena pojazdu oraz sposób finansowania zakupu; te ustalenia są zawsze przedmiotem szczegółowych negocjacji, często okrytych tajemnicą kupiecką. Równie ważne są koszty użytkowania urządzeń technicznych, przewyższające często koszty inwestycji.

Określenie efektywności użytkowania infrastruktury i pojazdów wymaga znajomości składowych kosztów i ich relacji do przychodów. W referacie przedstawiono możliwości wykorzystania bardzo wielu obliczanych symulacyjnie wskaźników techniczno-ruchowych jazdy pociągu do oceny efektywności użytkowania szynowego pojazdu trakcyjnego. Do takiej oceny (nie tylko zresztą pojazdu) niezbędne są: decyzja o potrzebie oceny, zdefiniowanie lub wybór kryteriów oceny oraz narzędzia służące do wyznaczenia wartości kryterium, prostego lub złożonego z prostych. Wartość kryterium można wyznaczyć w zasadzie tylko dla mierzalnych

wielkości liczbowych. Ocena według kryteriów jakościowych, trudnych do określenia liczbowego, jest na ogół trudno przekształcalna na wartości liczbowe.

Jednym z obszarów własności pojazdu są jego parametry i charakterystyki trakcyjno-ruchowe. Pojęcie to jest dość często stosowane, aczkolwiek różnie rozumiane, można powiedzieć, że jest ono słabo zdefiniowane. Jednym z wyróżników może być to, czy własności można scharakteryzować na podstawie danych konstrukcyjnych, czy tylko na podstawie wyników przejazdów (teoretycznych lub rzeczywistych).

Można wyróżnić kilka grup własności (parametrów lub funkcji) uporządkowanych według różnej kolejności, na przykład tak, jak się je wymienia w różnych materiałach informacyjnych, od prospektów reklamowych poczynając, na opisach technicznych kończąc. Nie przesądzając o randze, zachowując jednak zasadę przechodzenia od ogółu do szczegółu, można przykładowo wpierw określać rodzaj trakcji, układ osi, prędkość maksymalną, najmniejszą prędkość ciągłą, moc znamionową (moc nominalną, moc ciągłą, moc na oś napędną) i moc maksymalną (rozruchową, chwilową - w czasie kilku minut), siłę pociągową rozruchową, końcową prędkość rozruchu w sensie przyczepności, maksymalną masę składu wagonów lub maksymalną masę doczepną na oś napędną, z jaką na torze prostym i poziomym można osiągnąć prędkość maksymalną. W następnej grupie, ważnej z punktu widzenia obliczeń trakcyjno-ruchowych, można opisać rodzaj układu napędu, postać i rozkład krzywych i/lub pól charakterystyk trakcyjnych F(v), opory zasadnicze, charakterystyki nagrzewania urządzeń napędowych, układ przeniesienia siły pociągowej, w tym współczynnik wykorzystania ciężaru napędowego, oraz układ śledzenia i ograniczania poślizgu kół napędnych. Inną grupę istotną ze względu na koszty użytkowania i napraw stanowić mogą na przykład zakładane lub realizowane charakterystyki niezawodności, w szczególności współczynnik gotowości, harmonogram i zakres obsługi, przeglądów i napraw oraz ich związek ze wskazaniami układu diagnostyki bieżącej i okresowej.

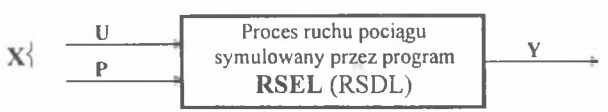
Istnieje też szereg wskaźników, których nie można obliczyć bez określenia zadań przewozowych i wykonania obliczeń trakcyjnych. Tu do najważniejszych należą chyba czas przejazdu i zużycie energii. Zależnie od użytego narzędzia można obliczyć również wiele innych wielkości, potrzebnych do oceny przejazdu.

W referacie przedstawiono wybrane wskaźniki przejazdów liczonych przez program RSEL symulujący przejazdy pociągów trakcji elektrycznej. Szczegółowszy opis zawiera praca [3], poniżej przedstawiono tylko wybrane własności pakietu programów autora.

2. MODELE SYMULACYJNE RSEL I RSDL

Przejazdy pociągów trakcji elektrycznej symulowane są za pomocą programu komputerowego RSEL (Run Simulation of Electric Locomotives), w trakcji spalinowej przejazdy odtwarza program RSDL.

Uproszczony schemat modelu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy symulatorów jazdy
Fig. 1. Simple schema of train running simulators

Zbiór wielkości wejściowych **X** zawiera podzbiory sterowania **U** oraz niezbędnych danych o pojeździe (pociągu), trasie i infrastrukturze **P**. W zbiorze **P** do najważniejszych danych należą przebiegi zasadniczych oporów jazdy R(v), parametry toru (trasy), parametry i charakterystyki pojazdu trakcyjnego, parametry składu wagonów oraz ograniczenia zmiennych procesu ruchu wynikające ze względów technicznych lub organizacji ruchu. Wielkością sterującą jest siła F(v) na obwodzie kół, pociągowa i hamująca, o wartościach granicznych F_{kmax} i $-F_{hmax}$ odpowiednio.

Zbiór wyników **Y** zawiera przebiegi zmiennych stanu oraz innych zmiennych i parametrów obliczanych i/lub wykorzystywanych podczas symulacji jazdy oraz przydatnych do oceny przejazdu. Zawiera trzy podzbiory w postaci znakowej numerycznej i α-numerycznej:

◊ wyniki szczegółowe z każdego kroku obliczeń, 24 zmienne i wskaźniki, w tym prędkość, drogę, czas, siłę F(v) na obwodzie kół, przyspieszenie, opory ruchu, prąd silnika, temperaturę silnika i inne;

◊ podsumowanie przejazdu, w tym histogramy prędkości, sterowań, obciążenia zestawu kół siłą pociągową, bilans energii przejazdu oraz około 800 różnych wskaźników, z których kilka wybranych przedstawiono dalej w referacie;

◊ trajektorię prędkości v(s); ta z jazdy forsownej wykorzystywana jest do regulacji czasu w procedurze energooszczędnej jazdy w zadanym czasie, a wszystkie symulowane do zbiorowego wykresu v(s).

W programie RSEL (RSDL) symuluje się 3 sposoby przejazdu pociągu: przejazd forsowny (minimalnoczasowy, procedura MR), przejazd w zadanym czasie z regulacją czasu przez obniżanie prędkości dopuszczalnej v_{max} (quasi-forsowny, procedura SL), przejazd w zadanym czasie z regulacją czasu przez wymuszenie odcinków jazdy wybiegiem (energooszczędny, procedura FC).

Symulacja przejazdu minimalnoczasowego (forsownego) dostarcza informacji o granicznych możliwościach ruchowych pojazdu trakcyjnego podczas prowadzenia zadanego składu pociągu na danej trasie. W szczególności powinien zostać obliczony najkrótszy możliwy czas przejazdu t_{min} oraz zużycie energii podczas takiego przejazdu, zużycie maksymalne. Rozkład jazdy opracowywany jest w oparciu o informacje o czasach minimalnych, ale wymaga na ogół jazdy w czasie t_f dłuższym od minimalnego t_{min} o wartość rezerwy czasowej t_{rez}. To znaczy zachodzi związek:

$$t_f = t_{min} + t_{rez},$$

gdzie najczęściej jest $t_{rez} > 0$.

Rezerwa czasowa t_{rez}, w stanach bez zakłóceń ruchu, może być wykorzystana na różne sposoby, z których zdefiniowano dwa sposoby graniczne regulacji czasu jazdy pociągu do wartości zgodnej z rozkładem jazdy. Pierwszy polega na ograniczeniu maksymalnej prędkości przejazdu z wartości realizowanej podczas przejazdu forsownego do odpowiednio niższej, tak aby czas jazdy wydłużyć z minimalnego do rozkładowego [4]. Drugi sposób realizowany jest przez wprowadzenie odcinków jazdy z wybiegiem, tak aby maksymalnie wykorzystać energię kinetyczną i potencjalną pociągu. Sposób pierwszy nazwano quasi-forsownym, a drugi jest niewątpliwie energooszczędnym (w wielu przypadkach nawet energooptymalnym). Przejazd rzeczywisty jest raczej kombinacją obu przypadków granicznych. Oba mogą być symulowane w modelach RSEL i RSDL. Tak więc podczas regulacji czasu przejazdu wykorzystuje się rezerwę czasu między zadanym rozkładem jazdy i czasem minimalnym jazdy forsownej - dla zmniejszenia zużycia energii na trakcję poprzez realizację różnych strategii kierowania.

3. WYBRANE WSKAŹNIKI

Określenie wartości liczbowych charakteryzujących przejazd możliwe jest po wykonaniu przejazdów w określonych warunkach techniczno-ruchowych. Programy symulacyjne RSEL i RSDL umożliwiają obliczenie, obok podstawowych wskaźników, takich jak czas jazdy i zużycie energii, wieluset innych, mogących być podstawą do prostej lub wielokryterialnej oceny przejazdu (i pojazdu), w tym wpływu własności pojazdu trakcyjnego i czynników ruchowych (na przykład ostrzeżeń stałych i czasowych) na zdefiniowaną efektywność użytkowania [5, 6].

Tak więc oprócz prędkości największej v_{max} oraz średniej prędkości technicznej v_{st}, prędkości handlowej v_{sh}, czasu jazdy czystej t_j, otrzymuje się między innymi:

- prąd zastępczy

$$I_z = \sqrt{\frac{\sum_n I_i^2 \Delta t_i}{t_{prz}}} \quad [A],$$

gdzie I_i, Δt_i - prąd silnika i czas jego przepływu na i-tym kroku obliczeń,
t_{prz} - całkowity czas przejazdu, łącznie z postojami,

- iloraz prądu zastępczego i ciagłego I_c,

$$c_{zc} = \frac{I_z}{I_c}$$

- maksymalny osiagnięty prąd jednego silnika i na pantografie
- najwyższą osiagniętą temperaturę ϑ_{max} i współrzędną toru, na której ją osiągnięto oraz temperaturę koncową ϑ_k,
- zużycie energii na trakcję na obwodzie kół (praca mechaniczna trakcyjna siły pociągowej)

$$E_k = \sum_n F_i \, \Delta s_i \quad [kWh],$$

gdzie F_i, ΔS_i - siła na obwodzie kół i droga na kroku obliczeń,

- zużycie energii na pantografie, na napędy pomocnicze,
- pracę przewozową

$$P_p = m_w \, s \quad [tkm],$$

gdzie m_w, s - masa doczepna (wagonów) i droda przejazdu,

- jednostkowe zużycie energii,

$$e_j = \frac{E_k}{P_p} \quad [kWh/tkm],$$

- wydatek energii na pracę oporów biegu,
- iloraz czasu jazdy i pracy przewozowej

$$c_{jpp} = \frac{t_{prz}}{P_p} \quad [s/tkm],$$

- iloraz masy pociągu i czasu zajęcia trasy

$$c_{m_w t} = \frac{m_w}{t_{prz}} \quad [t/s],$$

- moc umowną na kołach

$$N_{uk} = \frac{E_k}{t_{prz}} \quad [kW],$$

- iloraz mocy umownej i ciągłej

$$c_N = \frac{N_{uk}}{N_c},$$

- wydajność czasową (tj. iloczyn masy i prędkości średniej)

$$w_{tt} = m_w v_{st}$$

w odniesieniu do średniej prędkości technicznej, lub

$$w_{th} = m_w v_{sh}$$

w odniesieniu do średniej prędkości handlowej,
- podsumowanie faz jazdy w odniesieniu do drogi, do czasu i do zużycia energii (wartości bezwzględne oraz procentowy udział w całym przejeździe), z rozbiciem na:
  - rozruch (bezoporowy i oporowy),
  - jazdę ustaloną (bezoporową i oporową, wybiegiem i z hamowaniem),
  - wybieg ogółem i wybieg czysty,
  - hamowanie ogółem, mechaniczne i elektryczne,
  - jazdę z ograniczeniem cieplnym,
  - jazdę z dużą wartością prądu silnika i na pantografie,
  - energię straconą w oporach rozruchowych,
  - bilans energii przejazdu, w wartościach bezwzględnych i w odniesieniu do zużycia energii na pantografie (w lokomotywach spalinowych do zużycia paliwa), w tym energia hamowania mechanicznego i elektrycznego, zużycie energii na napędy pomocnicze, łączne straty energii, straty w rezystorach rozruchowych i w układzie poza rezystorami,
  - histogram zmian prędkości jazdy,
  - histogram zmian sterowania (nastawnika jazdy) podczas całego przejazdu,
  - histogram obciążenia zestawów kół siłą pociągową, z podziałem na przedziały klasowe sił i prędkości jazdy, w rozbiciu na wartości bezwzględne i względne drogi i czasu obciążenia.

4. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

Dla ilustracji wykonano eksperymenty symulacyjne z pociągiem ekspresowym „Pomorzanin" relacji Gdynia-Wrocław, na odcinku Poznań-Wrocław o długości 164,46 km. Na odcinku Poznań-Leszno dopuszczalna prędkość wynosi 120 km/h, a na odcinku Leszno-Wrocław 140 km/h. Pociąg ciągnięty jest lokomotywą EP08 o mocy ciągłej 2 MW, ze składem 8 wagonów przedziałowych o masie łącznej 360 ton.

Wybrane wyniki przedstawiono w postaci numerycznej w tabelach 1 i 2, w pierwszej tylko czas jazdy czystej i pracę siły trakcyjnej (czyli zużycie energii trakcyjnej w odniesieniu do obwodu kół napędnych) dla trzech różnych sposobów prowadzenia, opisanych w punkcie 2. W tablicy drugiej zawarto również inne, wybrane spośród wielu liczonych, wskaźniki charakteryzujące przejazd, lokomotywę i jej wykorzystanie przy wykonywaniu zadania przewozowego. Wyniki numeryczne z tab. 1 przedstawiono w postaci diagramów porównawczych na rysunkach 3 i 5. Na rysunkach 2 i 4 pokazano trajektorie prędkości w funkcji drogi, czyli v(s), z profilami torów. Można na nich rozróżnić trajektorie jazdy forsownej, quasi-forsownej oraz odcinki jazdy wybiegiem.

Tabela 1

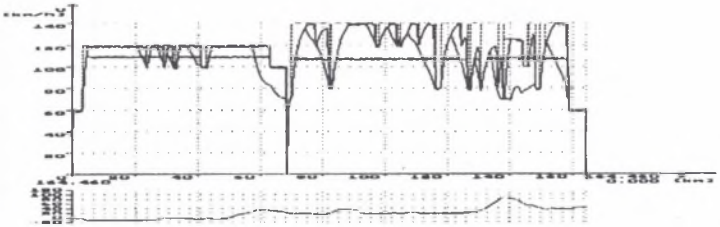
Praca siły trakcyjnej E_k i czas jazdy czystej, pociągi 5600 (Poznań-Wrocław) i 6501 (Wrocław - Poznań), stacja pośrednia Leszno

Procedura		5600		6501	
		E_k[kWh]	t[s]	E_k[kWh]	t[s]
forsowna MR	pierwszy odcinek	639	2311	1261	3168
	drugi odcinek	1254	3198	600	2306
	cała trasa	1893	5509	1861	5474
quasi-forsowna SL	pierwszy odcinek	553	2448	876	3478
	drugi odcinek	861	3584	446	2572
	cała trasa	1414	6032	1322	6050
energo-oszczędna FC	pierwszy odcinek	498	2456	745	3451
	drugi odcinek	690	3596	435	2562
	cała trasa	1188	6052	1180	6013

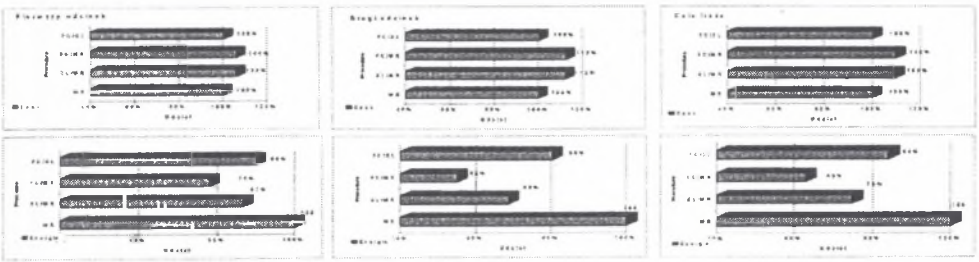
Tabela 2

Inne wybrane wskaźniki przejazdów pociągów 5600 i 6501

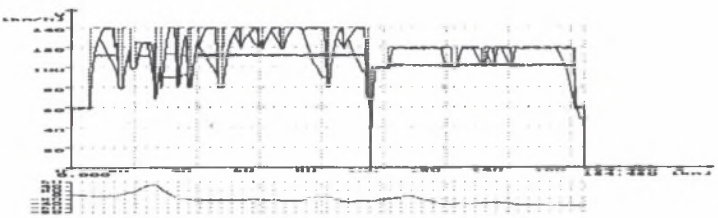
	Wskaźnik	Miara	Pociąg 5600			Pociąg 6501		
			Procedura			Procedura		
			MR	SL	FC	MR	SL	FC
1	Czas jazdy czystej	sek	5509	6032	6052	5474	6050	6013
2	Średnia prędkość techniczna	km/h	107	98	98	108	99	100
3	Zużycie energii na pantografie E_t	kWh	2110	1547	1326	2078	1468	1336
4	Zuż. en. na kołach (praca trakcyjna) E_k	kWh	1893	1414	1188	1861	1322	1180
5	Praca przewozowa L_p	tkm	58890					
6	Jednostkowe zużycie energii E_k / L_p	Wh/tkm	32.1	24.0	20.2	31.6	22.5	20.2
7	Średnia sprawność		0.858	0.857	0.832	0.856	0.824	0.829
8	Prąd zastępczy	A	299	229	835	291	217	238
9	Iloraz prądu zastępczego i ciągłego		0.842	0.645	0.663	0.819	0.61	0.67
10	Moc średnia na kołach	kW	1619	1311	1586	1634	1217	1642
11	Iloraz mocy średniej i ciągłej		0.809	0.655	0.793	0.817	0.609	0.821
12	Wydajność czasowa	10^3tkm/h	38.5	35.1	35.0	38.7	35.0	36.0
12	Straty energii w rezyst. rozruchowych	kWh	5.3	5.3	5.3	6.3	6.3	6.3
14	Straty energii poza rezystorami	kWh	212	129	133	210	139	146
15	Energia hamowania	kWh	655	330	64	720	348	149
16	Praca oporów zasadniczych	kWh	1180	1025	1067	1192	1025	1092
17	Praca oporów wzniesień	kWh	50	50	50	-58	-58	-58



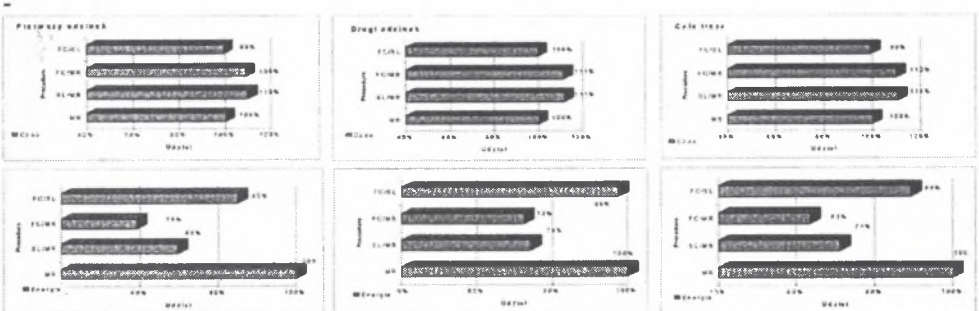
Rys. 2. Trajektorie v(s) i profil toru, pociąg 5600, na odcinku Poznań-Wrocław
Fig. 2. Speed versus distance *v(s)* trajectory, train No 5600



Rys. 3. Diagramy czasu jazdy i zużycia energii, pociąg 5600 na odcinku Poznań-Wrocław
Fig. 3. Running time and energy consumption, train No 5600



Rys. 4. Trajektorie v(s) i profil toru, pociąg 6501, na odcinku Wrocław-Poznań
Fig. 4. Speed versus distance *v(s)* trajectory, train No 6501



Rys. 5. Diagramy czasu jazdy i zużycia energii, pociąg 6501 na odcinku Wrocław-Poznań
Fig. 5. Running time and energy consumption, train No 6501

5. PODSUMOWANIE

Modele RSEL i RSDL były wykorzystane do różnych prac badawczych z zakresu teorii trakcji, w tym także w Ośrodku Informatyki Kolejnictwa w Olsztynie do symulacji jazd energooszczędnych, w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w Warszawie do opracowania instrukcji energooszczędnego prowadzenia pociągów dla maszynistów PKP i do prac dla ORE, w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu w fazie projektowania rodziny lokomotyw elektrycznych dużej mocy, z której to rodziny powstała tylko EP09. Wartość użytkowa wyników eksperymentów symulacyjnych może polegać na możliwości bezpośredniego ich wykorzystania do oceny jakości wykonania aktualnych i planowanych zadań przewozowych z wykorzystaniem różnych składów pociągów. Modele istnieją w postaci pakietu programów komputerowych, zdolnych do odtwarzania rzeczywistych i planowanych, zadanych warunków pracy analizowanych przejazdów.

Informacjami początkowymi są: istniejąca infrastruktura sieci, własności i charakterystyki taboru oraz wykonywane i planowane zadania przewozowe. Modele mogą liczyć, oprócz wymienionych już wskaźników, na przykład stopień wykorzystania taboru trakcyjnego (moc, temperatura) i ciągnionego (ładowność), w stosunku do możliwości granicznych, zapotrzebowanie na tabor trakcyjny i ciągniony oraz inne, które mogą się wyłonić się podczas analizy problemu i konsultacji, m in. uwzględnić można w dużej mierze czynniki kosztowe przewozów w oparciu o opracowania OBET.

Warunkiem podstawowym do wykonywania takich badań są odpowiednie wymagania wobec dostawców taboru, aby w dokumentacji zawarte były niezbędne informacje o parametrach i funkcjach opisujących własności produktu. W odniesieniu do pojazdów trakcyjnych, na przykład lokomotyw 112E i 113E z PAFAWAG-u, można by zażądać, aby producent dostarczył w szczególności:

- charakterystyki elektromechaniczne elektrycznych silników trakcyjnych, przebiegów momentu obrotowego i prędkości obrotowej w funkcji prądu silnika, $M_s(\omega)$,$I_s(\omega)$,
- chrakterystyki trakcyjne lokomotywy, tj. przebiegi sił pociągowych F(v) w funkcji prędkości jazdy, sprawności silnika i całego układu napędu (od pantografu do zestawów kół) oraz dokładne charakterystyki przetwarzania energii (falowniki, półprzewodnikowe generatory prądu trójfazowego itd.),
- charakterystyki B(v) sił hamowania lokomotywy, w tym hamowania elektrodynamicznego, również z odzyskiem energii hamowania,
- zasadnicze opory ruchu R(v), w postaci wzorów, wykresów lub tabel,
- zakładane charakterystyki przyczepności,
- charakterystyki nagrzewania elektrycznych silników trakcyjnych, w funkcji prądu silnika,
- ew. inne parametry: masy, prędkości maksymalne, znamionowe parametry zasilania z sieci trakcyjnej itp.

LITERATURA

1. Kacprzak J., Koczara W.: Podstawy napędu elektrycznych pojazdów trakcyjnych. WKŁ, Warszawa 1990.

2. Kwaśnikowski J., Voß G., Sanftleben D.: Simulation of energy saving high speed train operation. Modelling and Simulation 1995, Proc. 1995 European Simulation Multiconf., Prague 1995, s.370-373.
3. Kwaśnikowski J.: Modelowanie i symulacja komputerowa procesu ruchu pociągu. Wyd. Pol.Pozn. Seria Rozprawy, nr 264. Poznań 1992.
4. Kwaśnikowski J.: Regulacja czasu jazdy pociągu przez redukcję prędkości maksymalnych. Mat. XII Konf.Nauk. Pojazdy Szynowe'96, Poznań-Rydzyna 1996, t.2, s. 173-176.
5. Kwaśnikowski J.: Energetyczne i czasowe skutki ograniczeń prędkości dla pociągu prowadzonego lokomotywą EU07. Technika Transportu Szynowego, 1994, nr 3, s.28-30.
6. Kwaśnikowski J.: Wpływ wzniesień i zakłóceń ruchu na zużycie energii i czas jazdy lokomotywy ET22 z pociągiem towarowym. Technika Transportu Szynowego, 1994, nr 6, s.38-41.

Recenzent: Dr hab.inż. Eugeniusz Kałuża
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

Suggestion of some locomotives preformance characteristics and coefficients definitions based on run simulation results is presented. These characteristics could be used to evaluate train running quality and exploitation cost estimation. As example medium speed train performance calculation on 160 km track is shown in details.