

Badania symulacyjne zużycia energii trakcyjnej w zależności od profilu trasy

W artykule przedstawiono analizę zależności między profilem trasy a zużyciem energii na trakcję w odniesieniu do czterech wybranych pociągów regionalnych w Wielkopolsce. Podstawą do analizy wpływu profilu trasy na zużycie energii trakcyjnej było odtworzenie symulacyjne przejazdów pociągów. Opisano programy komputerowe symulujące ruch pociągu. Następnie przedstawiono wybór pociągów do symulacji oraz wyniki badań symulacyjnych.

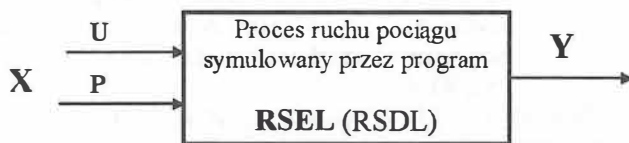
1. Wstęp

Proces ruchu pociągu jako układu wielomasowego jest złożonym zjawiskiem fizycznym możliwym do opisu deterministycznego, stochastycznego lub w postaci rozmytej na różnych poziomach dokładności. Jak w ruchu każdego systemu rzeczywistego można wyróżnić podstawowy ruch roboczy i jego zaburzenia. Zaburzenia ruchu podstawowego (drgania) oraz problemy prowadzenia pojazdu (pociągu) w torze tworzą rozległy obszar badań z zakresu dynamiki pojazdów szynowych. Wyodrębniony ruch podstawowy jest przedmiotem badań w ramach teorii trakcji (zwanej też, teorią napędu i hamowania lub teorią ruchu pociągu). W teorii i praktyce obliczeń trakcyjnych przedstawia się zazwyczaj ruch pociągu jako ruch bryły sztywnej o masie skupionej w środku ciężkości układu. Rozłożenie masy na długości pociągu uwzględnia się w pewnych szczególnych procedurach obliczeń, na przykład do wyznaczania oporów ruchu przy zmieniającym się na długości pociągu profilu toru.

2. Modele symulacyjne RSEL i RSDL

Przejazdy pociągów trakcji elektrycznej symulowane są za pomocą programu komputerowego RSEL (Run Simulation of Electric Locomotives). Szczegółowy opis m.in. programu RSEL zawiera praca [1], tu przytoczono tylko informacje ogólne i schemat przetwarzania.

Uproszczony schemat modelu - programu RSEL (RSDL), przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy symulatorów jazdy

Zbiór wartości wejściowych X (dane WE przygotowane przed obliczeniami i wykorzystywane podczas ich przebiegu, tj. podczas wykonywania eksperymentów symulacyjnych) rozdzielono na podzbiory wielkości sterujących U oraz parametrów pojazdu, trasy i infrastruktury P.

Zbiór Y (dane WY, czyli wyniki eksperymentów symulacyjnych) zawiera przebiegi zmiennych stanu oraz innych zmiennych i parametrów obliczanych i/lub wykorzystywanych podczas symulacji przejazdu pociągu.

Wielkością sterującą jest siła $F(v)$ na obwodzie kół pojazdu (pociągu), jej wartość zmienia się w przedziale od $F_{hmax} < 0$ (maksymalnej siły hamującej na kołach pociągu) do F_{kmax} (maksymalnej siły rozruchowej na kołach lokomotywy).

Spośród innych wielkości wejściowych do najważniejszych należą przebiegi oporów ruchu $R(v)$, parametry toru (trasy), parametry pojazdu trakcyjnego i składu wagonów oraz ograniczenia wynikające z organizacji ruchu pociągów.

Przyjęte przebiegi i parametry danych WE mają decydujący wpływ na wiarygodność wyników symulacji [2]. Dane WE są bowiem na ogół wielkościami losowymi, natomiast symulację jazdy pociągu prowadzi się jak dla danych zdeterminowanych, uwzględniając jedną z dostępnych charakterystyk zmiennych lub parametrów losowych. Dokładniejsze przedstawienie problemów wiarygodności danych i wyników obliczeń zawarto w [1].

2.1. Procedury obliczeniowe

Obliczenia jazdy pociągu mogą być wykonywane wg różnych sposobów prowadzenia pojazdu (sterowania przejazdem), zależnie od przyjętego kryterium oceny przejazdu.

W modelach RSEL i RSDL dostępne są następujące sposoby kierowania przejazdem pociągu, nazywane procedurami obliczeń:

- procedury minimalno-czasowe MT (Minimum Time, jazda forsowna)
 - MB - z zupełnym ignorowaniem rozkładu jazdy,
 - MR - z przestrzeganiem tylko rozkładowych (zadanych) czasów odjazdu z poszczególnych punktów kontroli czasu (stacji),
- procedura quasi-forsowna SL (Speed Limit), z regulacją czasu jazdy przez obniżenie prędkości do-puszczalnej v_{max} ,
- procedura energooszczędna FC (Fixed Coasting), umożliwiającą regulację czasu przejazdu przez wymuszenie odcinków jazdy wybiegiem, przy czym:

¹o Przejazd w najkrótszym czasie (forsowny, minimalno-czasowy), odwzorowuje w pewnym stopniu dawniej wykonywane ręcznie tzw. przejazdy teoretyczne. Traktowany jest jako źródło informacji o możliwościach trakcyjnych lokomotywy w ekstremalnych warunkach

obciążenia, o rezerwie czasowej w stosunku do zadanego rozkładem jazdy czasu przejazdu i o przebiegu trajektorii $v(s)$, wykorzystywanych w programie pomocniczym COPRE do wyznaczania odcinków wybiegu dla jazdy energooszczędnej.

2^o *Przejazd w zadanym czasie* (quasi-forsowny) przy konwencjonalnym sposobie sterowania, podobnym do obserwowanego u maszynistów nie przeszkolonych w realizacji jazdy energooszczędnej. Nazwano to jazdą quasi-forsowną, podczas której czas przejazdu reguluje się wprowadzając nowe ograniczenie prędkości dopuszczalnej v_{max} i realizując w tych nowych warunkach przejazd podobny do forsownego.

3^o *Przejazd w zadanym czasie*, przy regulacji czasu jazdy przez wymuszanie odcinków jazdy *wybiegiem* i dodatkowe ograniczenia prędkości. Taką jazdę nazwano energooszczędną. Jako efekt w postaci oszczędności energii przyjąć można różnicę wyników jazdy energooszczędnej i quasi-forsownej, wykonywanych w takim samym czasie, na przykład w czasie zadanym rozkładem jazdy.

Symulacja przejazdu minimalno-czasowego (forsowne-go) dostarcza więc 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 maksymalne zużycie energii podczas takiego przejazdu, zużycie. 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 granicznej regulacji czasu jazdy pociągu do wartości zgodnej z rozkładem jazdy. Pierwszy (*jazda quasi-forsowna*) polega na ograniczeniu maksymalnej prędkości przejazdu z wartości realizowanej podczas przejazdu forsownego do od-powiednio niższej tak, aby czas jazdy wydłużyć z minimalnego do rozkładowego. Drugi sposób (*jazda energooszczędna*) realizowany jest przez wprowadzenie odcinków jazdy z wybiegiem tak, aby maksymalnie wykorzystać energię kinetyczną i potencjalną pociągu przed koniecznym hamowaniem i/lub podczas jazdy na znacznym spadku profilu toru. Przejazd rzeczywisty jest 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.

2.2. Eksperymenty symulacyjne

Do eksperymentów symulacyjnych wybrano 4 pociągi rozkładowe pasażerskiego transportu regionalnego (osobowe), na trasach Poznań-Września-Poznań (poc. nr

71132/17135) oraz Poznań-Zbąszyń-Poznań (poc. nr 235/232).

Do obliczeń wykorzystano rzeczywiste dane odnoszące się do:

- profilu torów (nachyleń i promieni łuków),
- ograniczeń prędkości,
- rozkładów jazdy,
- parametrów składów wagonów (typu 111A),
- parametrów i charakterystyki trakcyjnej lokomotywy (elektrycznej serii EU07).

Przyjęto składy wagonów zgodne z rozkładami jazdy - 6 wagonów 4-osiowych o łącznej masie 300 t i łącznej długości 150 m. Przejazdy pociągów symulowano wg procedury forsownej (minimalno-czasowej - MR) oraz quasi-forsownej (przejazd w czasie z rozkładu jazdy - SL).

Dla składu wagonów przyjęto przebieg oporów zasadniczych według wzorów CNTK dla wagonów pasażerskich 4-osiowych (na przykład typu 111A):

$$R(v) = 8.34 m_w + 153 l_{op} + 0.0706 (2,5+n) v^2 [N],$$

gdzie: m_w [t] - masa wagonów, l_{op} - liczba osi wagonów, n - liczba wagonów (lokomotyw) w składzie pociągu, v [km/h] - prędkość jazdy;

a dla lokomotywy 4-osiowej EU07:

$$R_L(v) = 1,295 + 0,01777 v + 0,000345 v^2 [kN].$$

Granice przyczepności dla warunków przeciętnych przyjęto wg [3, 4].

Porównywano dla przejazdu „tam” i przejazdu „z powrotem” dwie wartości:

- 1) zużycie energii na cele trakcyjne,
- 2) zużycie energii na pokonanie oporów profilu toru - „pracę oporów wzniesień”, które są jednymi z bardzo licznych wskaźników przejazdów, obliczanych przez program RSEL.

Drugi wskaźnik w dużym stopniu charakteryzuje ogólną tendencję profilu trasy na analizowanym odcinku torów - do wznoszenia lub opadania.

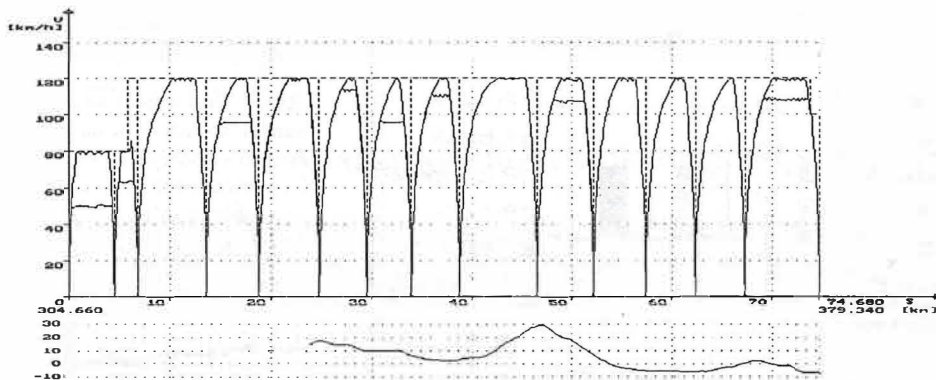
Wyniki symulacji dane są w postaci:

- trajektorii $v(s)$ prędkości w funkcji drogi, na tle profilu pionowego trasy (rys. 2 i 3),
- tabel, jako fragmenty plików podsumowania przejazdu z programu RSEL (tab. 1 i 2),
- wykresów porównawczych przejazdów wykonanych w arkuszach kalkulacyjnych Excel (rys. 4 i 5).

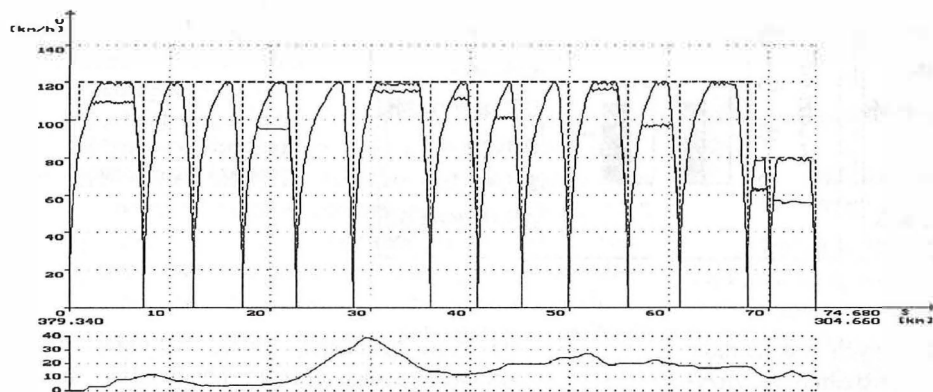
Zawarte w tabeli 2 porównania przedstawiono też w postaci graficznej na rysunkach 4 i 5.

6. Podsumowanie

W pracy określono ilościowo wpływ profilu trasy na zużycie energii trakcyjnej dla zadanego warunków ruchu i zdefiniowanego zadania przewozowego. Wykonano numeryczne porównanie wyników obliczeń wielu wskaźników przejazdów dla typowego, konkretnego pociągu komunikacji regionalnej, złożonego z lokomotywy i wagonów. Spośród ponad 800 wskaźników liczonych przez program symulacyjny wybrano te, które odnoszą się do zużytej energii z różnych przyczyn zapotrzebowania na energię (opory ruchu zasadnicze i dodatkowe, rezystory ruchowe, hamulce itd.) podczas przejazdu.



Rys. 2. Trajektorie v(s) pociągu na trasie Poznań - Zbąszyń



Rys. 3. Trajektorie v(s) pociągu na trasie Zbąszyń - Poznań

Lp.	Oceniana wielkość	MR		SL	
		kWh	% udz.	kWh	% udz.
1	Energia całkowita pobrana z sieci	1334.07	100.00	1211.93	100.00
2	Praca trakcyjna (siły pociągowej)	1101.00	82.53	989.98	81.69
3	Praca oporów jazdy R(v,s)	391.95	29.38	375.08	30.95
4	Praca oporów zasadniczych R(v)	378.08	28.34	361.25	29.81
5	Praca oporów wzniesień R(i)	10.24	0.77	10.06	0.83
6	Praca oporów krzywizn R(K)	4.14	0.31	4.14	0.34
7	Praca oporów profilu zast. R(iz)	14.38	1.08	14.20	1.17
8	Praca sił hamowania ogółem	-709.05	-53.15	-614.90	-50.74
9	Praca sił hamowania mechanicznego	-709.05	-53.15	-614.90	-50.74
10	Zużycie energii na nap. pomocnicze	68.76	5.15	69.92	5.77
12	Łączne straty energii :1.-2.-10.	164.31	12.32	152.03	12.54
13	Straty w oporach rozruchowych	67.65	5.07	67.64	5.58
14	Straty w układzie poza oporami:	96.66	7.25	84.39	6.96
15	Praca oporów biegu lokomotywy Rl(v)	130.40	9.77	123.29	10.17
16	Praca oporów biegu wagonów Rw(v)	247.69	18.57	237.96	19.63

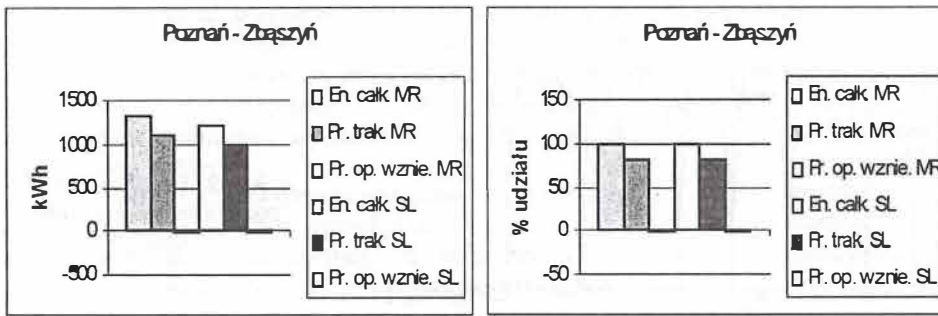
Tabela 1

Bilans energii przejazdu
Zbąszyń – Poznań wg procedur
forsownej MR i quasi-forsownej
SL

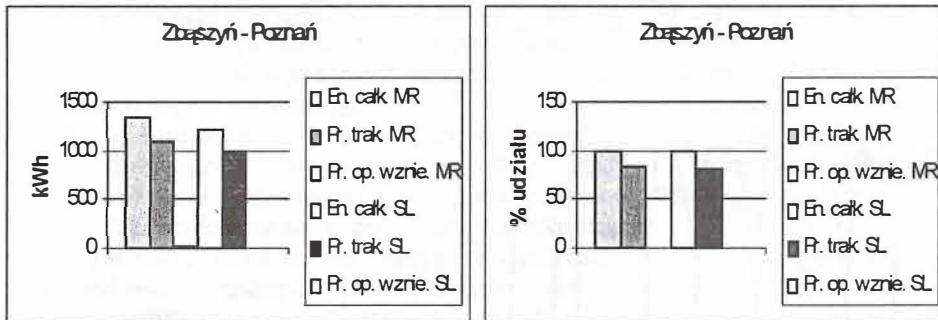
Lp.	Oceniana wielkość	MR		SL		Trasa
		kWh	% udz.	kWh	% udz.	
1	Energia całkowita pobrana z sieci	852,5	100,0	726,1	100,0	Poznań - - Września
2	Praca trakcyjna (siły pociągowej)	700,0	82,1	566,0	78,0	
3	Praca oporów wzniesień R (i)	33,3	3,9	33,4	4,6	
4	Energia całkowita pobrana z sieci	803,9	100,0	667,0	100,0	Września - - Poznań
5	Praca trakcyjna (siły pociągowej)	649,5	80,8	510,9	76,6	
6	Praca oporów wzniesień R (i)	-34,1	-4,2	-33,9	-5,1	
7	Energia całkowita pobrana z sieci	1328,4	100,0	1203,7	100,0	Poznań - - Zbąszyń
8	Praca trakcyjna (siły pociągowej)	1100,7	82,9	983,6	81,7	
9	Praca oporów wzniesień R (i)	-9,3	-0,7	-9,2	-0,8	
10	Energia całkowita pobrana z sieci	1334,1	100,0	1211,9	100,0	Zbąszyń - - Poznań
11	Praca trakcyjna (siły pociągowej)	1101,0	82,5	990,0	81,7	
12	Praca oporów wzniesień R (i)	10,2	0,8	10,1	0,8	

Tabela 2

Zestawienie porównawcze wybranych wyników symulacji



Rys. 4. Porównanie analizowanych wskaźników na trasie Poznań - Zbąszczyń a) - wartości bezwzględne, b) - udziały procentowe; MR - przejazd forsowny, SL - przejazd quasi-forsowny



Rys. 5. Porównanie analizowanych wskaźników na trasie Zbąszczyń - Poznań a) - wartości bezwzględne, b) - udziały procentowe; MR - przejazd forsowny, SL - przejazd quasi-forsowny

Ponadto program liczy dziesiątki innych wskaźników eksploatacyjnych, nie związanych bezpośrednio ze zużyciem energii, od prostych poczynając (średnie prędkości techniczne i handlowe), przez prąd zastępczy, wydajność czasową aż do histogramów (po drodze i po czasie) nastawień sterownika jazdy/hamowania i histogramów obciążeń zestawów kół siłą pociągową. Głównym celem pracy było pokazanie możliwości wszechstronnej, teoretycznej analizy przejazdów pociągów, która może być wykorzystana do konstrukcji rozkładów jazdy, zestawiania pociągów na konkretne trasy do obsłużenia zdefiniowanych potoków ruchu oraz, na przykład, do liczbowej oceny skutków energetycznych i czasowych, a także finansowych - zakłóceń ruchu, w tym nieplanowych zatrzymań lub zwolnień ruchowych. Do konstrukcji rozkładów jazdy z przedstawionych wskaźników można wykorzystać informację z przebiegu trajektorii $v(s)$ na rysunkach 3 i 4, na których widać odcinki międzystacyjne, na których musi być realizowana jazda forsowna (o największym zużyciu energii) i takie, na których można jechać wolniej, niż dopuszczają to ograniczenia torowe.

Dla przypadków analizowanych szczegółowo, porównując otrzymane wyniki należy stwierdzić, iż są one zgodne z oczekiwaniami. Oczekiwania (jakościowe) można pokrótce sformułować następująco:

- na trasie wznoszącej się, poza oporami zasadniczymi $R(v)$ należy dodatkowo pokonać opory wynikające z przyrostu energii potencjalnej (opory profilu) trasy,

- na trasie opadającej można natomiast wykorzystać traconą energię potencjalną zmniejszając zużycie energii trakcyjnej.

Taki proces straty/odzysku energii potencjalnej oraz jego wpływ na zużycie energii trakcyjnej w układzie napędowym lokomotywy mógłby być zgrubnie oszacowany ilościowo nawet bez symulacji, ale tylko wtedy, gdyby ten proces ruchu pociągu nie był zniekształcany częstymi zatrzymaniami pociągu, a więc koniecznością hamowania a następnie rozruchu pociągu. Natomiast dokładniejsze wyniki przejazdów otrzymać można tylko wykonując obliczenia symulacyjne.

Literatura

- [1] Kwaśnikowski J.: *Modelowanie i symulacja komputerowa procesu ruchu pociągu*. Wyd. Pol.Pozn. serii rozprawy, nr 264. Poznań 1992.
- [2] Kwaśnikowski J.: *Wiarygodność danych do symulacji przejazdu pociągu*. Mat.X.Kraj. Konf.Nauk. Poj.Szynowe, Wrocław 1994, t.2, s.150-160.
- [3] Kwaśnikowski J.: *Wybrane charakterystyki pojazdów trakcyjnych*. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej nr 1392, seria Transport, z.31, Gliwice 1998, s.127-135. (XIII Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe 1998”).
- [4] Kwaśnikowski J.: *Ograniczenie siły pociągowej przyczepnością, na przykładzie lokomotywy EU43*. Mat XIV Konf. Poj.Szyn 2000, Kraków-Artamów 2000, t. 2, s.113-122.