

RADOSŁAW BURAK-ROMANOWSKI*, KAZIMIERZ WOŹNIAK**

ENERGETYCZNE ASPEKTY MODERNIZACJI LINII KOLEJOWYCH

ENERGY ASPECTS OF MODERNIZATION OF RAILWAY LINES

Streszczenie

Przedstawiono podstawowe zasady trakcji elektrycznej w zakresie właściwości trakcyjnych, oporów ruchu pojazdów oraz zużycia trakcyjnej energii elektrycznej. W związku z intensywnymi pracami związanymi z modernizacjami w Polsce linii kolejowych przeprowadzono badania nad aspektami energetycznymi z tego wynikającymi. Wytypowano do tego celu dwie trasy na obecnie eksploatowanych ciągach kolejowych, które przygotowywane są do przeprowadzenia modernizacji. W jednym przypadku prędkość miała być podniesiona do 160 km/h, zaś w drugim założono nawet opcję podniesienia prędkości do 300 km/h. Wykazano wpływ zwiększenia płynności jazdy pojazdów trakcyjnych na ilość zużywanej przez nie energii elektrycznej. Na bazie charakterystyk nowoczesnych jednostek trakcyjnych przeprowadzono analizę wielkości zużycia energii w zależności od prędkości poszczególnego rodzaju taboru oraz jego masy. W badaniach wykorzystano rzeczywiste profile linii kolejowych oraz dydaktyczne narzędzia informatyczne stosowane w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, opory ruchu, zużycie energii trakcyjnej, modernizacja linii kolejowych

Abstract

This material presents the basic principles of electric traction on traction properties, resistance to motion of the traction vehicle and the consumption of electricity. Any railway line modernization made in Poland was analyzed on energetic aspects. We have chosen for this purpose two routes of currently operated railway arteries, which are prepared to carry out modernization. In one case, the speed would be raised to 160 km/h, while the second assumes even an option to raise the speed to 300 km/h. It has been shown the impact of increase of the liquidity of driving traction on the amount consumed by electricity. On the basis of the characteristics of modern traction units volume of energy consumption was analyzed, depending on the speed of a particular type of rolling stock and its mass. The studies used actual rail lines profiles and teaching tools used in Department of Electric Traction Warsaw University of Technology.

Keywords: electric traction, tractive resistance, power consumption, modernization of the railway lines

* Mgr inż. Radosław Burak-Romanowski, Instytut Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska.

** Kazimierz Woźniak, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Biuro Energetyki.

1. Wstęp

Dla przewoźnika kolejowego koszt przewozu w postaci zużytej energii elektrycznej lub paliwa ciekłego stanowi znaczący wydatek związany z prowadzoną działalnością. Jest on tylko jednym ze składników związanym z przejazdem taboru z jednego miejsca do drugiego. Równie znaczącym składnikiem jest koszt dostępu do infrastruktury drogi kolejowej dla poszczególnych rodzajów pociągów. Warto też zapewne wiedzieć, jaki wpływ mają zakłócenia w ruchu tych pociągów powodowane stanem technicznym infrastruktury kolejowej, prędkość jazdy elektrycznego taboru trakcyjnego na ilość zużytej energii, co ma wpływ na koszt przewozu stanowiący o konkurencyjności tej gałęzi transportu. Zagadnienia te zostaną rozpatrzone w niniejszym artykule.

2. Charakterystyki elektrycznych pojazdów trakcyjnych

Właściwości trakcyjne lokomotyw określają ich charakterystyki trakcyjne. Stanowią one zbiór charakterystyk naturalnych pojazdów z uwzględnieniem wszystkich ograniczeń wynikających z dopuszczalnych stanów pracy urządzenia. Na wykresach tych sporządzonych w układzie współrzędnych (v, F – prędkość, siła pociągowa) znaleźć się mogą charakterystyki trakcyjne dla różnych grup połączeń silników, różnym stopniu zmniejszenia wzbudzenia, krzywe oporów ruchu dla różnych nachyleń terenu, krzywa granicy przyczepności oraz stałej mocy maksymalnej $N_{\max} \leq \alpha \cdot N_n = \text{const.}$, gdzie: α – współczynnik krótkotrwałego przeciążenia silników, N_n – moc godzinna silnika trakcyjnego.

Współczynnik przyczepności maleje wraz ze wzrostem prędkości. Zależność współczynnika przyczepności od prędkości można określić wzorem Parodiego, w postaci [2]

$$f = \frac{f_0}{1 + 0,01 \cdot v} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

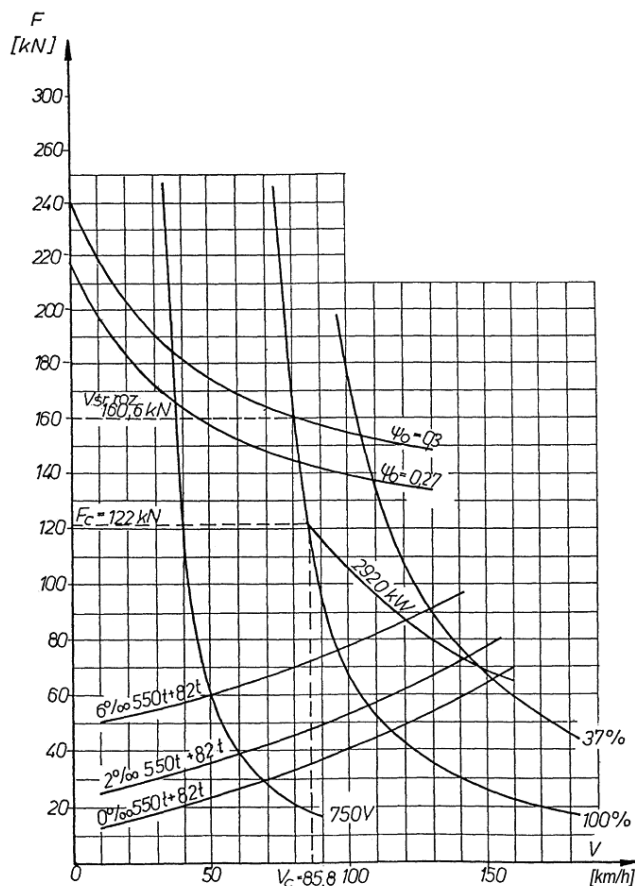
- f – współczynnik przyczepności,
- f_0 – statyczny współczynnik przyczepności wynoszący:
dla szyn suchych – 0,33, dla szyn średnich – 0,30, dla szyn mokrych – 0,25.

Aby możliwy był ruch pojazdu, siła działająca na obwodzie koła F musi spełniać następującą zależność

$$F \leq f \cdot G [\text{N}] \quad (2)$$

gdzie:

- $G = m \cdot g$ – siła nacisku koła na tor [N],
- m – masa części pojazdu przypadająca na jedno koło wraz z masą tego koła [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$.



Rys. 1. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy EP09 [7]

Fig. 1. EP09 locomotive traction characteristic

3. Opory trakcji

Ruch pojazdu ograniczany jest przez siły, które nazywane są oporami ruchu. Opory ruchu sprawiają, że jadący na poziomej trasie pojazd zatrzyma się po pewnym czasie (bez hamowania), ponieważ wykona pracę na pokonanie oporów ruchu. Aby więc pojazd poruszał się ruchem jednostajnym, trzeba opory trakcji przewyżczyć, przykładając siłę równoważną, zwaną siłą pociągową o przeciwnym zwrocie.

Opory ruchu dzielą się na opory zasadnicze i dodatkowe. Zgodnie z rys. 1 opory zasadnicze rosną wraz ze wzrostem prędkości. Opory zasadnicze mogą być aproksymowane parabolą [1, 2, 3]

$$W_p = W_0 + W_1 v + W_2 v^2 \quad (3)$$

gdzie: $W_0 \geq 0$, $W_1 \geq 0$, $W_2 \geq 0$.

Opory stałe W_0 nie zależą od prędkości i są to opory wynikające z tarcia tocznego kół po podłożu, opory wynikające z drobnych nierówności oraz opory tarcia czopów osiowych w łożyskach. Opory zależne liniowo od prędkości W_1 wynikają z tarcia obrzeży kół o szyny. Zależą one również od siły docisku i współczynnika tarcia. Opory W_2 , zależne od kwadratu prędkości, to przede wszystkim opory aerodynamiczne.

Na opory dodatkowe (W_d) składają się opory od pionowego i poziomego profilu linii oraz oporów lokalnych wynikających z dodatkowego parcia powietrza podczas jazdy w tunelach i wykopach, mijania się pociągów oraz wynikających z oddziaływania wiatru.

Opory zależne od profilu pionowego (W_i) wynikają z ruchu po spadkach i wzniesieniach. Kąt nachylenia toru i określa się zwykle w tysięcznych częściach, jako stosunek wysokości wzniesienia w [m] do jego długości w [km]. Jeżeli ciężar pociągu G wyrażony jest w [kN], dodatkowy opór na wzniesieniu w [N] będzie wynosił

$$W_i = G \cdot i \quad (4)$$

Przy wzniesieniach wartość oporu ma znak dodatni, przy spadkach – ujemny.

Opory zależne od profilu poziomego (W_B) wynikają z poruszania się po łukach. Wartość tych oporów wynika z promieni łuków i oblicza się ją według różnych wzorów empirycznych, a jeden z nich jest następujący [1]

$$W_B = \frac{S_B}{S} \cdot \frac{700}{R_p - 20} \quad (5)$$

gdzie:

- S_i – suma długości wszystkich łuków danej linii,
- S – całkowita długość linii,
- R_p – przeciętny promień krzywizny.

Obliczenie oporów wynikających z parcia powietrza (W_t) jest trudne, gdyż zależą one od prędkości wiatru i jego kierunku względem poruszającego się pociągu. Z tego powodu często przyjmuje się je jako 10–15% wartości oporów wynikających z profilu pionowego i poziomego. Podsumowując, opory dodatkowe można zapisać w postaci

$$W_d = W_i + W_B + W_t \quad (6)$$

a zatem

$$W = W_p + W_d = W_0 + W_1 v + W_2 v^2 + W_i + W_B + W_t \quad (7)$$

Istnieje wiele wzorów aproksymujących podstawowe opory ruchu. Najczęściej stosowanymi w Polsce są następujące zależności [3]:

– dla lokomotyw

$$W_t = 150n_0 + \left(9 + 1,5 \frac{v}{10}\right) \cdot m_1 + 35 \left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ [N]} \quad (8)$$

gdzie:

- m_1 – masa lokomotywy w [t],
- n_0 – liczba osi lokomotywy;

– dla wagonów

$$W_l = 150n_0 + \left(K_B + 1,5 \frac{v}{10}\right) \cdot m_w + f \cdot (2,5 + n) \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad [\text{N}] \quad (9)$$

gdzie:

K_l – współczynnik rodzaju łożysk, który wynosi 6,5 dla łożysk tocznych lub 9,0 dla łożysk ślizgowych,

m_w – masa wagonów [t],

n_0 – liczba osi w pociągu,

f – współczynnik rodzaju pociągu, który wynosi 10 dla wagonów pasażerskich lub 8 dla wagonów towarowych,

n – liczba wagonów w pociągu;

– dla zespołów elektrycznych i spalinowych

$$W_l = 150n_0 + \left(K_B + 1,5 \frac{v}{10}\right) \cdot m_j + 10 \cdot (2,7 + n) \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad [\text{N}] \quad (10)$$

gdzie:

K_l – współczynnik rodzaju łożysk, jak we wzorze dla wagonów,

m_j – masa zespołu wraz z pasażerami [t],

n_0 – liczba osi w zespole,

n – liczba wagonów w zespole.

4. Zakłócenia w ruchu kolejowym

Ruch kolejowy jest ruchem trasowym odbywającym się według ściśle ułożonego planu. Plan ten w postaci rozkładu jazdy każdemu pociągowi przydziela trasę w określonym czasie. Kierujący pojazdem trakcyjnym prowadzi go według danych ze służbowego rozkładu jazdy, z uwzględnieniem doraźnych (dla jednego pociągu) lub okresowych (dla wszystkich pociągów) ograniczeń prędkości. Ograniczenia prędkości wynikać mogą:

- ze złego stanu technicznego toru lub obiektów inżynierskich,
- z ograniczeń widoczności,
- z awarii lub braku urządzeń SHP (samoczynnego hamowania pociągu),
- ze stanu urządzeń trakcji elektrycznej,
- z awarii urządzeń srk (sterowania ruchem kolejowym).

5. Zużycie energii trakcyjnej

Pobierana przez pojazd energia elektryczna używana jest na pokonanie oporów ruchu, na pokrycie strat w układzie napędowym i na zasilanie obwodów pomocniczych. W jej bilans należy uwzględnić:

- 1) pracę użyteczną silników na pokonanie oporów:
 - a) zasadniczych,
 - b) krzywizn,
 - c) wzniesień;

- 2) straty przy hamowaniu na większych spadkach,
- 3) straty w oporach rozruchowych przy silnikach prądu stałego i straty w transformatorach przy prądzie przemiennym,
- 4) straty dodatkowe w silnikach spowodowane ich pracą przy obniżonym napięciu (szeregowe połączenie silników),
- 5) straty przy hamowaniu na stacjach,
- 6) straty normalne silników w połączeniu zasadniczym.

Jako że opory ruchu są funkcją prędkości, stosując uproszczony wzór na jednostkowe opory ruchu, zapisany w formie [1]

$$w = w_0 + \frac{1}{K} \left(\frac{v}{10} \right)^2 \quad (11)$$

jednostkowe zużycie energii na pokonanie zasadniczych oporów ruchu na drodze S można określić zależnością [1]

$$q_1 = \frac{2,725}{S} \int_0^S w dS = \frac{2,725}{S} \int_0^S \left[w_0 + \frac{1}{K} \left(\frac{v}{10} \right)^2 \right] dS = 2,725 \left[w_0 + \frac{1}{100KS} \int_0^S v^2 dS \right] \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (12)$$

Do rozwiązania tej całki potrzebna jest znajomość przebiegu $v = f(s)$, ale można przyjąć, że istnieje pewna prędkość zastępcza v_z , z którą pociąg przebywa większą część drogi i która spełnia równanie

$$v_z^2 = \frac{1}{S} \int_0^S v^2 dS \approx v_t \cdot v_m \quad (13)$$

gdzie:

v_t – prędkość techniczna,

v_m – prędkość maksymalna.

W ten sposób jednostkowe zużycie energii wyraża się wzorem

$$q_1 = 2,725 \cdot \left(w_0 + \frac{v_t v_m}{100K} \right) \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (14)$$

Łuki na trasie powodują wzrost jednostkowego zużycia o składnik

$$q_2 = 2,725 \cdot w_B \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (15)$$

przy czym w_l oznacza średni dla całej trasy opór jednostkowy łuków. Jednostkowe zużycie energii na pokonanie wzniesień określa zależność

$$q_3 = \pm 2,725 \frac{h}{S} \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (16)$$

gdzie:

h – różnica poziomów między stacją końcową i początkową [m],

S – odległość stacji początkowej i końcowej [km].

Na linii o długości S średnie dodatkowe opory wywołane przyhamowaniem wynoszą

$$i_{sp} = \frac{1}{S} \sum (i_x - w_x) \cdot \Delta S_x \quad (17)$$

gdzie:

i_x – spadek przekraczający opory ruchu przy prędkości dopuszczalnej,

w_x – opory ruchu pociągu przy prędkości na danym spadku dopuszczalnej,

ΔS_x – droga przyhamowania.

Jednostkowe zużycie energii na pokrycie przyhamowań na spadkach wynosi

$$q_4 = 2,725 \cdot i_{sp} \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (18)$$

Podczas hamowania aż do zatrzymania energia kinetyczna pociągu w chwili hamowania zostaje wytracana w hamulcach oprócz pracy użytecznej na drodze hamowania, potrzebnej na pokonanie oporów ruchu. Długość drogi hamowania S_h przy założeniu stałego opóźnienia a_h i początku prędkości początku hamowania v_h , wyniesie

$$S_h = \frac{v_h^2}{2a_h \cdot 3,6^2 \cdot 1000} \text{ [km]} \quad (19)$$

Użyteczna praca na drodze S_h obliczona na jednostkę masy pociągu wyrazi się w [m] jako iloczyn tej drogi w [km] i średnich oporów ruchu pociągu w_h w [%]

$$q'_5 = w_h \cdot S_h = \frac{w_h \cdot v_h^2}{2a_h \cdot 3,6^2 \cdot 1000} \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t}} \right] \quad (20)$$

gdzie w_h oznacza średnie jednostkowe opory ruchu przy hamowaniu.

Opóźnienie hamowania a_h w funkcji jednostkowej siły hamującej, czyli siły przypadającej na 1 t masy pociągu wyniesie

$$a_h = \frac{F_h \cdot g}{G \cdot k \cdot 1000} = \frac{f_h \cdot g}{1000k} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (21)$$

gdzie:

F_h – siła hamująca [N],

k – współczynnik mas wirujących,

f_h – jednostkowa siła hamująca [N/t].

Podstawiając wzór (21) do wzoru (20) otrzymuje się

$$q'_5 = \frac{v_h^2 w_h k}{2 \cdot f_h \cdot g \cdot 3,6^2} = \frac{k w_h}{2,54 f_h} \left(\frac{v_h^2}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t}} \right] \quad (22)$$

Natomiast całkowita energia kinetyczna pociągu o masie zastępczej $m = Gk/g$ przy prędkości v_h w [km/h] w przeliczeniu na jedną tonę ciężaru pociągu wyniesie

$$q'_6 = \frac{mv_h^2}{2G \cdot 3,6^2} = \frac{Gv_h^2 k}{2 \cdot 3,6^2 \cdot Gg} = \frac{k}{3,54} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t}} \right] \quad (23)$$

Energia rzeczywiście stracona przy hamowaniu będzie więc różnicą pomiędzy całkowitą energią kinetyczną pociągu i pracą użyteczną na drodze hamowania

$$q'_7 = q'_6 - q'_5 = \frac{k}{2,54} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 - \frac{w_h k}{2,54 f_h} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 = \frac{k}{2,54} \left(1 - \frac{w_h}{f_h} \right) \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 = \frac{k'}{2,54} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t}} \right] \quad (24)$$

gdzie $k' = k \left(1 - \frac{w_h}{f_h} \right)$.

Jeśli pociąg zatrzymuje się co L [km], to na hamowanie traci średnio na całej trasie energię

$$q_7 = \frac{2,725}{L} \cdot q'_7 = \frac{2,725 k'}{2,54 L} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 = \frac{1,073 k'}{L} \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (25)$$

Podobnie jak przy hamowaniu suma energii kinetycznej i pracy wykonanej do pokonania oporów ruchu podczas rozruchu wyrazi się wzorem

$$q_8 = \frac{1,073 k''}{L} \left(\frac{v_r}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (26)$$

gdzie $k'' = k \left(1 + \frac{w_r}{f_r} \right)$ lub $k'' = k \frac{f}{f - w_r}$, przy czym

w_r – średnie jednostkowe opory ruchu w okresie rozruchu,

f_r – średnia jednostkowa siła rozruchowa.

Uwzględniając fakt występowania podczas rozruchu strat w rezystorach rozruchowych, otrzymamy

$$q_9 = \frac{1,073 k'' \xi}{L} \left(\frac{v_r}{10} \right)^2 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}} \right]. \quad (27)$$

Całkowite jednostkowe zużycie energii mierzone na obwodzie kół napędnych wyniesie

$$q = q_1 + q_2 \pm q_3 + q_4 + q_7 + q_9 \quad (28)$$

W ten sposób uzyskuje się wzór na jednostkowe zużycie energii liczone na obwodzie kół

$$q = 2,725 \left(w_o + w_B + i_{sp} \pm \frac{h}{S} + \frac{v_t v_m}{100K} \right) + \frac{1,073}{L} \left[k' \left(\frac{v_h}{10} \right)^2 + \xi k'' \left(\frac{v_r}{10} \right)^2 \right] \left[\frac{W \cdot h}{t \cdot \text{km}} \right] \quad (29)$$

Większość danych do tego wzoru uzyskuje się z charakterystyki trasy oraz parametrów lokomotywy i całego pociągu, a niektóre dane należy przyjąć i tak np. [1, 2]:

w_o – stały czynnik oporów zwykle przyjmowany jako 2, choć można go obniżyć do 1,5 szczególnie dla ciężkich pociągów towarowych,

w_i – opór krzywizn można przyjmować: 0,25–0,50 dla linii równinnych, 1,0–2,0 dla górskich, a dla równinnych magistrali kolejowych można przyjąć wartość bliską zeru,

K – współczynnik rodzaju pociągu, wynoszący:

- 40 dla ciężkich pociągów towarowych,
- 40 dla lokomotyw pociągów pasażerskich z wagonami 4-osioowymi,
- 30 dla lokomotyw pociągów pasażerskich z wagonami 2- i 3-osioowymi,
- 30 dla długich składów jednostkowych,
- 25 dla średnich składów jednostkowych,
- 20 dla krótkich składów jednostkowych,
- 20 dla lekkich pociągów towarowych, np. w połowie naładowanych,
- 15 dla samych lokomotyw i wagonów motorowych,
- 10 dla pociągów towarowych próżnych.

v_t – prędkość techniczna (średnia),

v_m – prędkość maksymalna,

h – różnica poziomów między stacją końcową i początkową,

S – odległość stacji początkowej i końcowej,

i_{sp} – średnie dodatkowe opory ruchu wywołane przyhamowaniem,

ξ – współczynnik strat w rezystorach podczas rozruchu: 0,52–0,59 dla pojazdów czterosilnikowych z przełączaniem, a 0,36–0,45 dla pojazdów sześciocylnikowych,

v_h – prędkość początku hamowania,

v_r – końcową prędkość rozruchu, którą, jeśli nie znamy, możemy przyjąć następująco:

- 35–45 km/h dla lokomotyw towarowych i dla jednostek podmiejskich,
- 45 km/h dla lokomotyw uniwersalnych,
- 60 km/h lokomotyw pośpiesznych.

Wartość jednostkowego zużycia energii liczonego na zaciskach silnika oblicza się, dzieląc wartość q ze wzoru (29) przez sprawność przekładni mechanicznej η_c i sprawność silnika η .

Bazując na przedstawionych założeniach, obliczone zostały przykładowe jednostkowe zużycia energii dla pociągów użytych w przeprowadzonych badaniach, w celu ich porównania z wynikami otrzymanymi z programu symulacyjnego. Przyjęto następujące założenia wspólne dla wszystkich rodzajów pociągów: $\eta_c = 0,97$; $\eta = 0,90$; $w_o = 2$; $w_i = 0,3$; $h/S \approx 0$; $\xi = 0,44$ dla lokomotyw sześciocylnikowych oraz $\xi = 0,55$ dla lokomotyw czterosilnikowych; $K = 40$ dla pociągów towarowych; $K = 30$ dla pociągów pasażerskich z lokomotywą; $K = 25$ dla składów jednostkowych. Założono również wielkość współczynnika $k' = 1$ dla wszystkich pociągów oraz $k'' = 1,2$ dla pociągów pasażerskich i $k'' = 1,4$ dla towarowych. Początkową prędkość hamowania V_h pociągu Ic/Ex oraz pośpiesznego przyjęto równą V_m w związku z jazdą forsowną tych pociągów. Otrzymane wyniki zestawiono w poniższej tabeli.

Rodzaj pociągu	Masa	L	V_m	V_t	V_h	V_r	q
	[t]	[km]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[Wh/tkm]
Ic/Ex EP09	473	96	160	134	160	60	33,0
Pośpieszny EU07	504	19,2	120	93	120	60	29,5
Osobowy EW55	208	5,6	110	61	90	40	37,2
Towarowy ET22	1600	96	120	102	80	45	17,8
Towarowy ET22	1200, 800	224	120	118	80	45	18,7

Zgodnie z [2] orientacyjne jednostkowe zużycia energii mierzone na odbieraku pojazdu, czyli z uwzględnieniem sprawności silnika i przekładni oraz urządzeń pomocniczych i ogrzewania, kształtuje się następująco:

- zespoły trakcyjne podmiejskie 30–50 [W · h/t · km],
- zespoły trakcyjne dalekobieżne 25–50 [W · h/t · km],
- pociągi pasażerskie 20–30 [W · h/t · km],
- pociągi towarowe dalekobieżne 9–15 [W · h/t · km].

Otrzymane wyniki są zbliżone do podanych w literaturze. Różnice pomiędzy wartościami obliczonymi i wyznaczonymi za pomocą symulatora mogą wynikać z przyjęcia założeń dla wielu wskaźników.

6. Badania zużycia energii trakcyjnej

W celu zbadania wpływu stanu infrastruktury kolejowej na ilość zużytej, przez pojazdy trakcyjne, energii trakcyjnej przyjęto następującą metodologię:

- 1) wybrano dwie różne trasy kolejowe:
 - a) I – o długości 96 km,
 - b) II – o długości 224 km;
- 2) przewidziano następujące opcje wykonywania jazdy:
 - a) dla trasy I:
 - jazda przy obecnych parametrach linii,
 - jazda po likwidacji ograniczeń prędkości,
 - jazda po modernizacji do prędkości 160 km/h;
 - b) dla trasy II:
 - opcja 1 – modernizacja do prędkości 200 km/h,
 - opcja 2 – modernizacja do prędkości 220 km/h,
 - opcja 3 – modernizacja do prędkości 250 km/h,
 - opcja 4 – modernizacja do prędkości 300 km/h;
- 3) dla wybranych tras określono rodzaje pociągów, które obecnie kursują po tych liniach oraz jakie kursować mogłyby po ich modernizacjach;
- 4) określono masy tych pociągów, dla trasy I ich liczbę w ciągu doby;
- 5) dysponując odpowiednimi danymi, określono profile pionowe oraz poziome rozpatrywanych tras;

- 6) dla trasy I, na podstawie rozkładu jazdy oraz wykazu ostrzeżeń stałych, określono prędkości maksymalne i ograniczenia tej prędkości dla poszczególnych pociągów;
- 7) dla trasy I, zgodnie z aktualnym rozkładem jazdy, dla pociągów kwalifikowanych (Ic/Ex), międzywojewódzkich (pośpieszny) i regionalnych (osobowy) określono przystanki i przyjęto czas zatrzymania pociągów równy 1 minutę;

Do przeprowadzenia analiz wykorzystano Symulator Przejazdu Teoretycznego opracowany w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej. Symulator ten uwzględnia [5]:

- przejazd trasy pociągu z uwzględnieniem postojów,
- przejazd według charakterystyki trasy, z uwzględnieniem ograniczeń prędkości,
- przejazd dowolnego pociągu, z dowolną liczbą i masą wagonów,
- opory ruchu dla poszczególnych pociągów,
- wahania napięcia zasilającego pojazd.

Podstawowymi wielkościami przyjmowanymi do obliczeń są [5]:

- charakterystyka trakcyjna $F_p(v)$ pojazdu oraz odpowiadająca jej charakterystyka poboru prądu przez pojazd w funkcji prędkości, które są wprowadzone na podstawie danych katalogowych pojazdu,
- charakterystyka trasy decydująca o dodatkowych oporach trakcji w funkcji położenia pociągu na trasie.

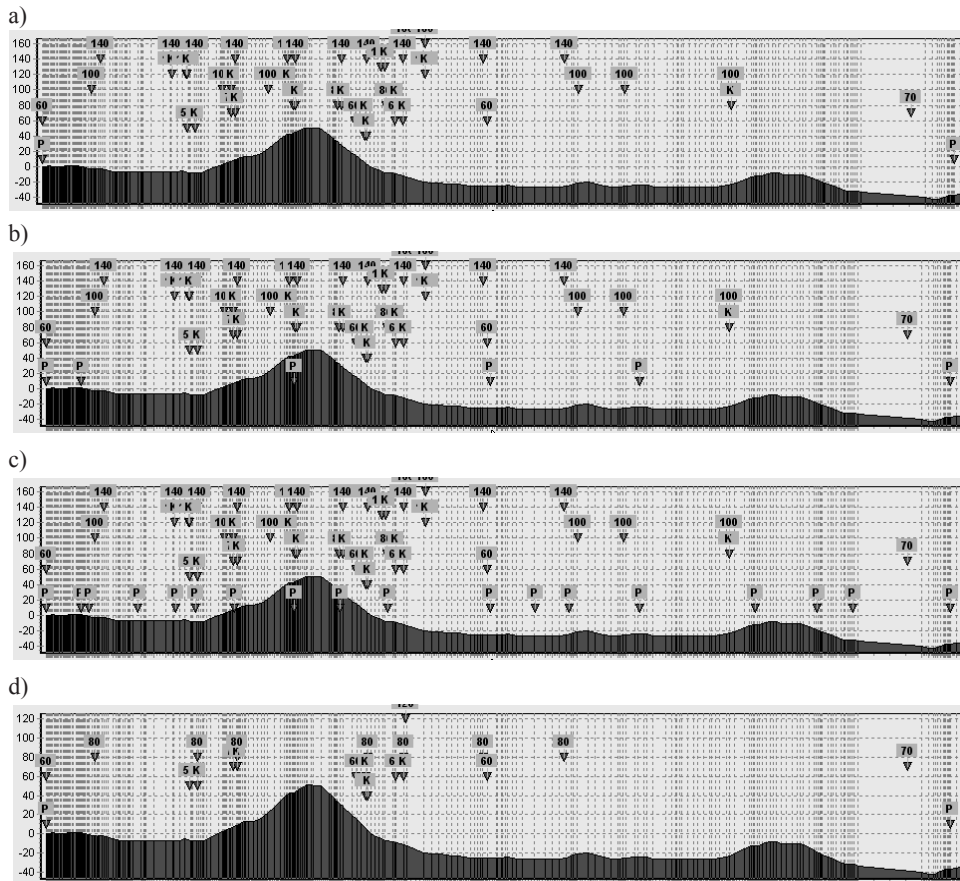
W pierwszym etapie dla dokładnie opisanej trasy I dokonano jazd dla 4 reprezentatywnych pociągów tej trasy, którym przypisano odpowiednie zespoły napędowe [7].

Tabela 2

Reprezentatywne pociągi dla trasy I

Rodzaj pociągu	Zespół napędowy	Masa składu
Ic/Ex	EP-09	473 t
Pośpieszny	EU-07	504 t
Osobowy	EW-55	208 t
Towarowy	ET-22	1600 t

Jazdy wykonano kolejno przez każdy z pociągów z uwzględnieniem obecnych parametrów trasy I, w tym prędkości rozkładowych oraz ograniczeń prędkości. Zobrazowano to na rys. 2, gdzie liczby oznaczają prędkości rozkładowe i ograniczone, „K” oznacza koniec ograniczenia, a „P” przystanek pojazdu.



Rys. 2. Obecne parametry trasy I dla pociągu kwalifikowanego (a), międzywojewódzkiego (b), regionalnego (c) i towarowego (d) – długość 96 km

Fig. 2. The current route parameters for the qualified train (a), international train (b), regional train (c) and freight train (d) – length 96 km

Dodatkowo przyjęto różne ustawienia programu dla rezystancji sieci trakcyjnej oraz średniego spadku napięcia od pozostałych pociągów dla stanu przed i po modernizacji infrastruktury kolejowej. Przyjęto następujące parametry dla stanu przed modernizacją:

- napięcie stanu jałowego – 3600 V,
- rezystancja sieci trakcyjnej – 0,07 Ω /km,
- rezystancja podstacji – 0,2 Ω ,
- wartość średnia spadku napięcia od pozostałych pociągów – 400 V.

Dla stanu po modernizacji zmniejszono do 0,05 jednostkową rezystancję sieci oraz zmniejszono do 300 V średnią wartość spadku napięcia od pozostałych pociągów. Następnym etapem było założenie likwidacji doraźnych i okresowych ograniczeń prędkości i ponowne wykonanie jazd każdym z pociągów. Ostatnie jazdy wykonano dla założonych prędkości na linii kolejowej po jej modernizacji z dostosowaniem do prędkości 160 km/h. Otrzymane wyniki opisanych badań zestawiono w tabelach zamieszczonych poniżej.

Tabela 3

Wyniki dla pociągu IC/Ex z lokomotywą EP-09

Wielkości	Jedn. miary	Obecny stan techniczny	Po likwidacji ograniczeń	Po modernizacji do $V \leq 160$ km/h
Czas przejazdu	[min]	64,9	58,4	42,9
Prędkość średnia	[km/h]	88,7	98,6	134,2
Napięcie średnie	[V]	3 044,8	3 000,0	3 040,9
Prąd średni	[A]	704,2	769,1	891,3
Zużycie energii	[kWh]	2 634,3	2 373,3	2 028,3
Jednostkowe zużycie energii	[Wh/(brt t-km)]	49,4	44,5	38,1

Tabela 4

Wyniki dla pociągu międzywojewódzkiego z lokomotywą EU-07

Wielkości	Jedn. miary	Obecny stan techniczny	Po likwidacji ograniczeń	Po modernizacji do $V \leq 160$ km/h
Czas przejazdu	[min]	74,6	70,7	62,2
Prędkość średnia	[km/h]	77,3	81,5	92,5
Napięcie średnie	[V]	3 124,7	3 100,5	3 118,3
Prąd średni	[A]	470,6	502,1	521,4
Zużycie energii	[kWh]	2 102,4	1 949,6	1 819,1
Jednostkowe zużycie energii	[Wh/(brt t-km)]	37,5	34,8	32,5

Tabela 5

Wyniki dla pociągu osobowego EW-55

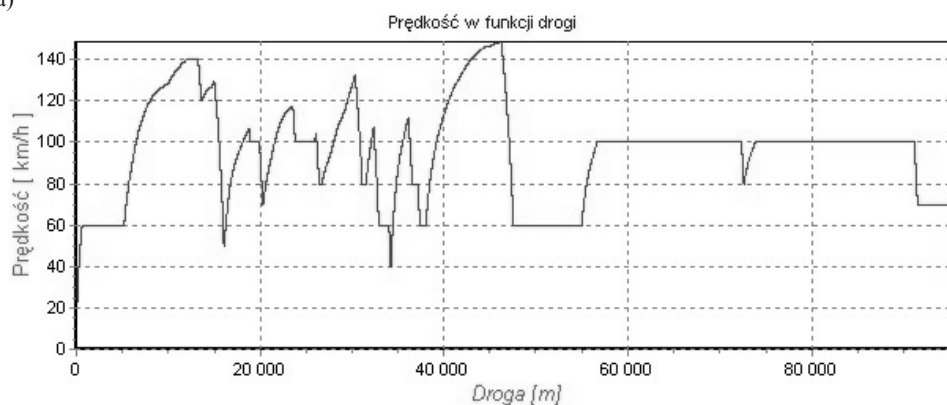
Wielkości	Jedn. miary	Obecny stan techniczny	Po likwidacji ograniczeń	Po modernizacji do $V \leq 160$ km/h
Czas przejazdu	[min]	100,5	98,1	94,0
Prędkość średnia	[km/h]	57,3	58,7	61,3
Napięcie średnie	[V]	3 105,1	3 159,2	3 168,9
Prąd średni	[A]	271,6	278,5	291,3
Zużycie energii	[kWh]	1 522,8	1 527,8	1 583,1
Jednostkowe zużycie energii	[Wh/(brt t-km)]	38,1	38,3	39,6

Wyniki dla pociągu towarowego z lokomotywą ET-22

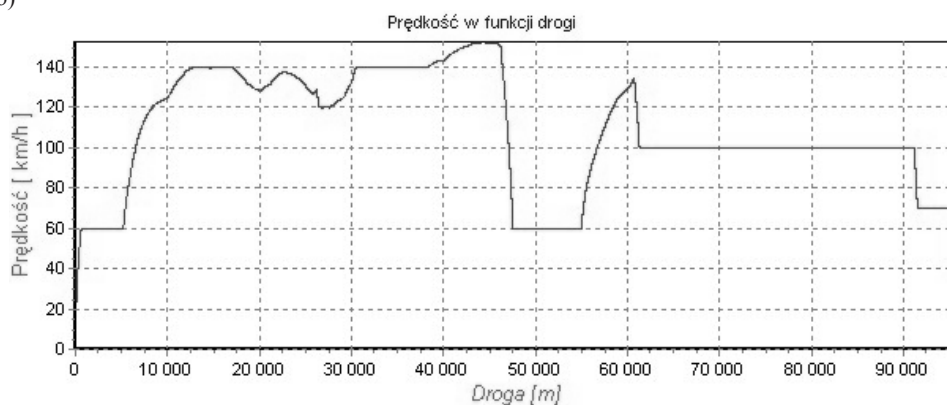
Wielkości	Jedn. miary	Obecny stan techniczny	Po likwidacji ograniczeń	Po modernizacji do $V \leq 160$ km/h
Czas przejazdu	[min]	79,6	77,1	56,7
Prędkość średnia	[km/h]	72,4	74,7	101,6
Napięcie średnie	[V]	3 010,8	3 011,4	2 630,4
Prąd średni	[A]	704,9	709,8	881,1
Zużycie energii	[kWh]	3 086,9	2 941,5	2 630,4
Jednostkowe zużycie energii	[Wh/(brt t·km)]	18,7	17,8	15,9

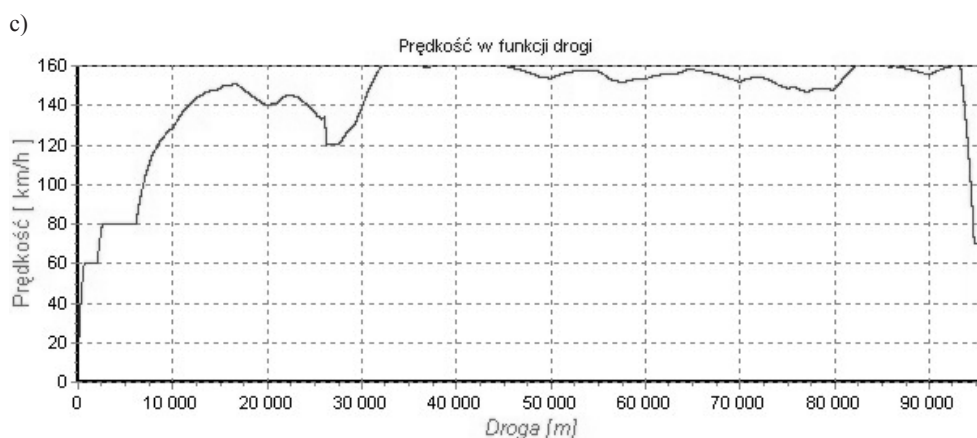
W przypadku pociągu kwalifikowanego (IC/Ex) obserwuje się około 10% zmniejszenie zużycia energii elektrycznej po założonej likwidacji doraźnych i czasowych ograniczeń prędkości. Dalsze zmniejszenie zużycia energii obserwuje się po zmodernizowaniu linii kolejowej do prędkości 160 km/h.

a)



b)





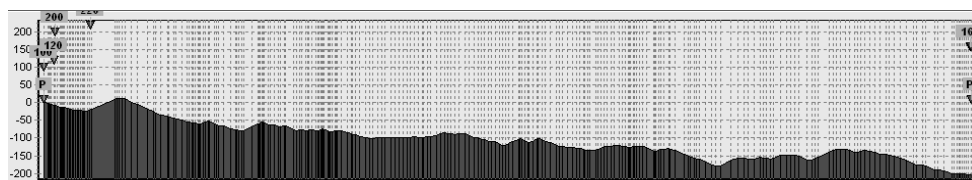
Rys. 3. Wykresy prędkości pociągu IC/Ex – a) obecnie z ograniczeniami, b) bez ograniczeń prędkości, c) po modernizacji

Fig. 3. Train speed charts IC/Ex – a) currently restricted, b) without speed limits, c) after modernization

Pociąg międzywojewódzki (pośpieszny) podobnie jak kwalifikowany również zużyje mniej energii elektrycznej po zlikwidowaniu ograniczeń prędkości. Po zmodernizowaniu linii występuje dalsze zmniejszenie zużycia energii przez ten pociąg.

Nie odnotowano zmniejszenia ilości zużywanej energii elektrycznej przez pociąg osobowy, ani po likwidacji ograniczeń prędkości ani też po modernizacji linii kolejowej. Stan taki wynika z częstych postojów pociągu osobowego, które powodują znaczące zniwelowanie wpływu ograniczeń prędkości na płynność prowadzenia jazdy.

Następnym etapem było przeprowadzenie badań dla trasy II.



Rys. 4. Trasa II dla opcji 220 km/h – długość 224 km

Fig. 4. II route for 220 km/h – the length 224 km

Na podstawie danych podawanych przez producentów przyjęto następujące współczynniki oporów we wzorze (3) [4, 7]:

- | | | |
|---|---|--|
| – PESA 7 wagonów | – | $y = 0,538 + 0,00604v + 0,00006v^2,$ |
| – Ic/EX o masie 620 t z lokomotywą E412 | – | $y = 1,39 + 0,00123v + 0,000139v^2,$ |
| – Ic/EX o masie 560 t z lokomotywą E412 | – | $y = 1,26 + 0,00123 v + 0,000139v^2,$ |
| – ETR460 z 9 wagonami o masie 620 t | – | $y = 1,36 + 0,000871v + 0,000114 v^2,$ |
| – ETR460 z 9 wagonami o masie 560 t | – | $y = 1,23 + 0,000786v + 0,000103v^2,$ |
| – AGV11 o masie 385 t | – | $y = 0,61 + 0,00188v + 0,0000441v^2.$ |

Wyniki badań dla trasy II zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Wyniki jazd dla trasy II

Opcja trasy	Rodzaj pociągu	Czas przejazdu	Prędkość średnia	Zużycie energii	Jednostkowe zużycie energii
		[min]	[km/h]	[kWh]	[Wh/ (brt t · km)]
1	Towarowy z lok. E412, 1200 t, $V_{\max} = 120$ km/h	113,7	117,8	4 926,7	17,2
	Towarowy z lok. E412, 800 t, $V_{\max} = 120$ km/h	113,3	118,3	3 685,6	18,6
	PESA, 7 wagonów, $V_{\max} = 160$ km/h	85,8	156,2	2 256,0	18,1
	IC, Ex z lok. E412, 620 t, $V_{\max} = 200$ km/h	70,0	191,4	5 205,6	33,4
	IC, Ex z lok. E412, 560 t, $V_{\max} = 200$ km/h	69,8	191,8	5 089,9	35,7
2	ETR460, 9 wagonów 620 t, $V_{\max} = 220$ km/h	65,8	203,5	5 345,0	22,1
	ETR460, 9 wagonów 560 t, $V_{\max} = 220$ km/h	65,5	204,4	4 875,1	21,3
3	ETR460, 9 wagonów 620 t, $V_{\max} = 250$ km/h	60,5	221,4	6 274,5	25,9
	ETR460, 9 wagonów 560 t, $V_{\max} = 250$ km/h	59,8	224,0	5 781,1	25,3
	AGV11, 385 t, $V_{\max} = 250$ km/h	56,9	235,5	2 764,1	32,1
4	AGV11, 385 t, $V_{\max} = 300$ km/h	49,6	270,0	3 681,3	42,7

7. Podsumowanie

Podczas badań wykazano, że poprawa stanu technicznego infrastruktury kolejowej wpływa na zwiększenie średniej prędkości pociągów, co skraca czas przejazdu. Likwidacja doraźnych i okresowych ograniczeń prędkości powoduje, w każdym niemalże przypadku, zmniejszenie zużycia energii elektrycznej pobieranej przez pociąg. Zaobserwować można wyraźne zmniejszenie jednostkowych zużyć energii poprzez wyeliminowanie ograniczeń prędkości powodujących straty z powodu wyhamowywania i ponownego rozbiegania pociągów. Dla linii o długości 96 km pociągi wykazały odpowiednio następujące różnice w zużyciu energii:

- IC/Ex – zmniejszenie o 261,0 kWh,
- pośpieszny – zmniejszenie o 152,8 kWh,
- osobowy – zwiększenie o 5,0 kWh,
- towarowy – zmniejszenie o 145,4 kWh.

Uwzględniając liczbę poszczególnych rodzajów pociągów poruszających się po rozpatrywanym kierunku badanej trasy I, otrzymano 4 887,6 kWh oszczędności energii elektrycznej w każdej dobie. W ciągu roku oszczędność ta wyniesie około 1785 MWh. Zgodnie z cennikiem energii elektrycznej, zamieszczonym na stronie PKP Energetyka S.A., dla odbiorców energii elektrycznej trakcyjnej z sieci średniego napięcia 3 kV, zgodnie z taryfą Bt21, cena za 1 MWh wynosi około 387 zł. Zatem w ciągu roku opłaty za energię elektryczną trakcyjną, tylko na badanym odcinku linii kolejowej, powinny zmaleć o około 691 tys. zł. Pamiętać należy, że rozpatrywana była jazda tylko w jednym kierunku. Przypuszczając, że podobne wyniki otrzymanoby dla pociągów jadących w stronę przeciwną, roczne zmniejszenie opłat za zużywaną energię elektryczną na trasie I wyniosłoby około 1 382 tys. zł.

Poprawa stanu infrastruktury kolejowej poprzez przeprowadzenie remontów polegających na likwidacji ograniczeń prędkości powoduje zmniejszenie zużycia energii przez pojazdy trakcyjne, co przekłada się na zmniejszenie kosztów ponoszonych przez przewoźników.

Na podstawie drugiej części badań wnioskować można, że zwiększanie prędkości na liniach kolejowych nie musi się wiązać z odczuwalnym wzrostem zużycia energii elektrycznej. Wynika to z tego, że producenci nowoczesnego taboru dokładają starań w zakresie zmniejszenia oporów ruchu. Nie bez znaczenia w tym zakresie będzie również właściwe zestawianie składów, aby w maksymalny sposób dopasować liczbę oferowanych miejsc do zapotrzebowania.

Literatura

- [1] Jaworski C., *Teoria trakcji elektrycznej*, WK, Warszawa 1956.
- [2] Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J., *Zasady trakcji elektrycznej*, WKŁ, Warszawa 1980.
- [3] Rojek A., *Tabor i trakcja kolejowa*, ZPK, Warszawa 2010.
- [4] Szeląg A., *Wykłady z teorii trakcji elektrycznej*, 2010.
- [5] Opis programu symulacyjnego „Symulator Przejazdu Teoretycznego” będący pracą dyplomową Rafała Wagnera pod kierunkiem prof. dr hab. inż. A. Szeląga.
- [6] Raulin B., *Badania i analiza wpływu zakłóceń w ruchu pociągów elektrycznych na zużycie energii*, Praca magisterska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. A. Szeląga.
- [7] Materiały własne.